INGENIEUR-
FERNSTUDIUM

Kirmße

Steuerungs- und Regelungstechnik 2

Herausgeber:
Institut für Fachschulwesen
der Deutschen Demokratischen Republik
Karl-Marx-Stadt

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Ing. P. A. Kirmße

S T E U E R U N G S - U N D R E G E L U N G S T E C H N I K

2

V e r ö f f e n t l i c h t :
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
K A R L - M A R X - S T A D T

2. Auflage

Alle Rechte vorbehalten

Ag 613/52/65/800 Best.-Nr. 5034-02

Vorzugsschutzgebühr MDN 3,50

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	5
1. Meßeinrichtungen	6
1.1 Meßeinrichtungen, deren Wirkung auf Veränderung des Ohmschen Widerstandes beruht	6
1.1.1 Widerstandsgeber	6
1.1.2 Widerstandsthermometer	7
1.1.3 Dehnungsmeßstreifen	9
1.1.4 Fotowiderstände	13
1.1.5 Fotozellen	14
1.2 Meßeinrichtungen, deren Wirkung auf der Veränderung des elektronischen Feldes beruht	16
1.2.1 Kapazitive Geber	16
1.2.2 Piezoelektrische Meßeinrichtungen	18
1.3 Meßeinrichtungen, deren Wirkung auf der Veränderung des magnetischen Feldes beruht	19
1.3.1 Abtastspulen mit veränderlichem Eisenkern	19
1.4 Meßgeräte, deren Wirkung auf der Erzeugung einer Urspannung beruht	21
1.4.1 Thermoelemente	21
1.4.2 Tachometergeneratoren	24
Zusammenfassung zum Abschnitt 1	25
Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1	25
2. Verstärker	26
2.1 Elektronische Verstärker	26
2.1.1 Verstärker mit Hochvakuumröhren	26
Zusammenfassung zum Abschnitt 2.1.1	33
Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.1	34
2.1.2 Verstärker mit gasgefüllten Röhren	34
Zusammenfassung zum Abschnitt 2.1.2	43
Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.2	44
2.1.3 Halbleiterverstärker	44

Seite

Zusammenfassung zum Abschnitt 2.1.3 51
Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.3 52

2.2 Magnetische Verstärker 52
2.2.1 Induktivitätssteuernde magnetische Verstärker 53
2.2.2 Der stromsteuernde magnetische Verstärker 56
2.2.3 Der spannungssteuernde magnetische Verstärker 64
Zusammenfassung zum Abschnitt 2.2 73
Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.2 74

2.3 Elektromaschinenverstärker 75
2.3.1 Längsfeldmaschinenverstärker 75
2.3.1.1 Gleichstromnebenschlußgeneratoren 75
2.3.1.2 Leonard-Schaltung 77
2.3.2 Querfeldmaschinenverstärker 79
2.3.2.1 Metadyne-Maschinen 80
2.3.2.1.1 Generatormetadyne 80
2.3.2.1.2 Umformermetadyne 82
2.3.2.1.3 Anwendungsbeispiele für eine Metadyne-maschine 84
2.3.2.2 Amplidyne-Maschinen 85
2.3.2.3 Anwendungsbeispiele für eine Amplidyne-Verstärkermaschine 86
Zusammenfassung zum Abschnitt 2.3 87
Übungsaufgaben zum Abschnitt 2.3 88

3. Stelleinrichtungen 88
3.1 Die Hochvakuumröhre als Stelleinrichtung 88
3.2 Thyratron als Stellglied 90
3.3 Der Gleichstromnebenschlußmotor als Stelleinrichtung 92
3.4 Der Ferrarismotor als Stelleinrichtung 94
3.5 Die Kohlesäule als Stellorgan 95
Zusammenfassung zum Abschnitt 3 96

Lösungen der Wiederholungsfragen und Übungsaufgaben 97

Literaturverzeichnis 101

Einleitung

Vor dem Regelungstechniker steht in vielen Fällen die Aufgabe, in einem gegebenen technologischen Prozeß eine Größe, "fortlaufend durch Eingriffe auf Grund von Messungen dieser Größe", auf einem vorgeschriebenen Wert zu halten. Die Regelgröße, von der hier die Rede ist, kann eine beliebige physikalische Größe sein. Eine Regelung des angeführten Prozesses ist jedoch nur möglich, wenn die Regelgröße mit irgendwelchen Mitteln meßbar ist.
In diesem Lehrbrief sollen Sie Bauelemente des Regelkreises, speziell des Reglers, kennenlernen, deren Wirkungsweise auf elektrische, elektronische und magnetische Vorgänge beruht. Es ist verständlich, daß diese Bauelemente, soweit es sich um Verstärker handelt, als Eingangsgröße eine elektrische Größe verlangen. Wir werden uns deshalb im ersten Hauptabschnitt mit Meßgliedern beschäftigen, deren Ausgangsgröße eine elektrische Größe ist. Entsprechend dem Signalfluß im Regelkreis behandeln wir in den weiteren Hauptpunkten Verstärker und Stelleinrichtungen.

1. Meßeinrichtungen

Meßeinrichtungen haben die Aufgabe, physikalische Größen (Meßgrößen) zu erfassen, umzuformen und so weiterzuleiten, daß der Meßwert angezeigt oder zur Verarbeitung in einem Regler verwendet werden kann.

1.1. Meßeinrichtungen, deren Wirkung auf Veränderung des Ohmschen Widerstandes beruht

1.1.1 Widerstandsgeber

Unter Widerstandsgeber versteht man einen Schiebe- oder Drehwiderstand, dessen beweglicher Kontakt durch eine mechanische Größe verstellt werden kann. Der Widerstandsdraht ist dabei geradlinig (wie z.B. bei der Wheatstone-Meßbrücke) oder als Wendel auf einen Isolierkörper aufgebracht. Der Widerstandsträger (Isolierkörper) selbst kann dabei geradlinig, kreisförmig oder spiralförmig sein. Ist er geradlinig, so ist die Eingangsgröße des Widerstandsgebers

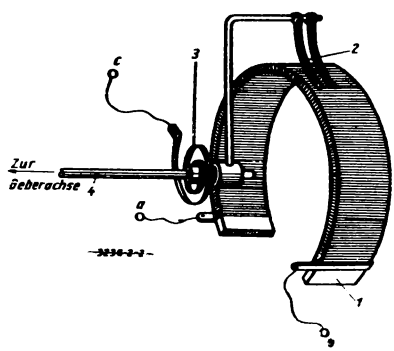


Bild 1

ein Weg, bei Kreis- oder Spiralform ein Drehwinkel. Bild 1 zeigt einen Widerstandsgeber zur Umwandlung einer Winkeländerung in eine Widerstandsänderung. Auf einem Isolierkörper 1 ist der Widerstandsdraht wendelförmig angeordnet. Ein Schleifer 2 stellt einen durch die Drehachse 4 veränderlichen Abgriff dar. Der Anschluß des Schleifers erfolgt über die Spiralfeder 3. Wird die Drehachse 4 um einen bestimmten Winkel verstellt, so kann bei linearer Anordnung des Widerstandsdrahtes auf dem Isolierkörper, zwischen den Klemmen a und c, eine proportionale Änderung des Widerstandes festgestellt werden.

Werden alle drei Anschlüsse (a,b und c) des in Bild 1 gezeichneten Gebers benutzt, so kann dieser als Spannungsteiler geschaltet werden.

1.1.2 Widerstandsthermometer

Elektrische Widerstandsthermometer werden für Temperaturmessungen von - 200 bis + 750 °C verwendet. Sie bieten besondere Vorteile, wenn die Meßstelle weit vom Verarbeitungsort des Meßwertes entfernt ist.
Die Wirkungsweise der Widerstandsthermometer beruht auf der Veränderung des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur. Als Widerstandsmaterial verwendet man hauptsächlich Platin und Nickel, bei denen der Widerstand der Temperatur direkt proportional ist. Diese physikalische Tatsache können Sie sich so erklären, daß bei höheren Temperaturen die Eigenbewegung der Elementarteilchen größer wird , und so die freien Elektronen in ihrer Weiterbewegung stärker behindert werden.
Die Widerstandswicklung des Thermometers besteht aus dünnem Draht, der in einem Glaskörper eingeschmolzen oder von einer Hülse umgeben ist. Um den Widerstandsmeßkopf vor mechanischer Zerstörung zu schützen, ist er in ein Schutzrohr eingeschoben. Von den Herstellerfirmen werden die Widerstandsthermometer so bemessen, daß sie bei 0°C

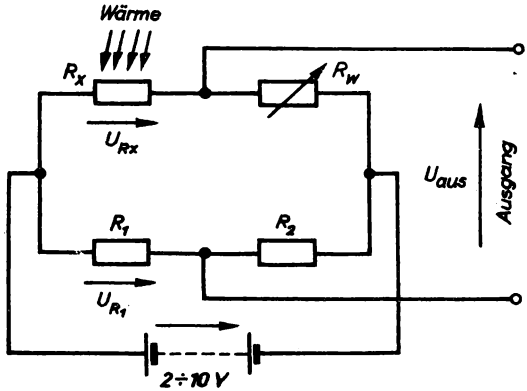
einen Widerstandswert von 100 Ohm haben (siehe auch Tabelle Bild 2). Da die Zuleitungen zum Thermometer in den

°C	Ni 100 DIN	Pt 100 DIN
- 200		18,50
- 100	60,20	60,20
- 50	74,20	80,25
0	100,00	100,00
+ 50	129,10	119,40
+ 100	161,70	138,50
+ 150	198,70	157,30
+ 200		175,85
+ 300		212,08
+ 400		247,07
+ 500		280,94

Bild 2

Widerstand mit eingehen, muß dieser bei der Projektierung der Anlage berücksichtigt werden. Bei der Eichung von Meßgeräten (Kreuzspulmeßwerke) für Widerstandsthermometer sieht die Norm für die Zuleitungen einen Widerstand von 10 Ohm vor. Ist die Entfernung zwischen Widerstandsthermometer und Meßgerät nur klein, so ist dieser Normwert durch einen Zusatzwiderstand herzustellen. In der Regelungstechnik verwendet man Widerstandsthermometer meist in Verbindung mit Brückenschaltungen, in denen gleichzeitig der Soll- Istwertvergleich durchgeführt werden kann. (Bild 3)

Bei der Brückenschaltung handelt es sich um den Vergleich eines festen Spannungsteilers (R_1, R_2) mit einem Spannungsteiler, dessen Teilerverhältnis in diesem Fall temperaturabhängig ist. Bei Veränderung der Temperatur ändert sich die Ausgangsspannung ($U_{aus} = U_{Rx} - U_{R1}$).



$R_1 = R_2$; R_W = Sollwerteinstellung

Bild 3

1.1.3 Dehnungsmeßstreifen

Der OHMsche Widerstand eines elektrischen Leiters, z.B. eines Drahtes, berechnet sich aus

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{A}$$

R = Widerstand
l = Leiterlänge
ϱ = spez.elektr.Widerst
A = Querschnitt des Leiters

Wird der genannte Draht einer Dehnung, unterworfen, so kann man erwarten, daß sich wegen der Verlängerung und der dadurch eintretenden Querkontraktion sein Widerstand vergrößern wird. Bereits im Jahre 1856 endeckte Lord KELVIN, daß bei Dehnungsbeanspruchung eines Widerstandsdrahtes die auftretende Widerstandsänderung viel größer ist als man nach der vorstehenden Überlegung belegen kann. Die Ursache dafür ist darin zu suchen, daß ϱ ebenfalls von den äußeren Belastungen des Widerstandsmaterials abhängig ist. Diese Abhängigkeit ist direkt proportional, d.h. mit steigender Dehnungsbeanspruchung wird ϱ ebenfalls größer.

Die angeführten Erscheinungen wertete SIMMONS und RUNGE im Jahre 1939 technisch aus, indem sie einen dünnen Metalldraht auf einem Papierträger befestigten, um das so entstandene Meßelement zur Bestimmung der Verformung einer Oberfläche zu benutzen. Die Befestigung des Dehnungsmeßstreifens auf dem Meßobjekt erfolgt dabei mittels eines speziellen Klebers. Bei den zur Zeit handelsüblichen Dehnungsmeßstreifen lassen sich zwei Gruppen unterscheiden: Dehnungsmeßstreifen mit Papier als Drahtträger und Dehnungsmeßstreifen, deren Meßdrähte in einem Lackträger eingebettet sind. Der zur Herstellung von Dehnungsmeßstreifen verwendete Draht wird entsprechend den nachstehenden Erwägungen ausgewählt:

1. Die in spezifischen Widerstandsschwankungen je Dehnungseinheit auszudrückende Empfindlichkeit k muß möglichst groß sein. Unter Empfindlichkeits- oder k-Faktor versteht man die Größe

$$k \approx \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

Darin ist R der Ausgangswiderstand des Meßdrahtes mit der Ausgangslänge l vor der Belastung. Bei Belastung (Zug) vergrößert sich die Länge um den Betrag Δl und der Widerstand um den Betrag ΔR. Δl und ΔR können Sie berechnen aus:

Δl = Ausgangslänge minus Länge nach der Belastung

ΔR = Ausgangswiderstand minus Widerstand nach der Belastung

Aus der Festigkeitslehre übernehmen wir für den Quotienten $\frac{\Delta l}{l}$ die Bezeichnung "Dehnung" ε .

2. Der Gesamtwiderstand des Streifens muß möglichst groß sein, um den Einfluß unerwünschter Widerstandsschwankungen im Meßkreis (Kabel, Klemmen, Schalter usw.) niedrig zu halten. Der Nennwiderstand moderner Dehnungsmeßstreifen beträgt je nach Bauart 75 bis 2000 Ohm.

3. Der Temperaturkoeffizient α muß niedrig sein, um Fehler durch Temperaturschwankungen auf ein Minimum zu beschränken.
4. Der Draht muß in einem möglichst großem Gebiet den denkbar besten linearen Zusammenhang zwischen der Widerstandsschwankung und der Dehnung ausweisen.

Diesen Bedingungen entspricht weitgehend das Material Konstantan mit einem Empfindlichkeitsfaktor von k = 2. Es genügt besonders gut den Anforderungen 2, 3 und 4 der obigen Aufstellung. Materialien mit höheren k- Faktoren haben den Nachteil, daß auch deren Temperaturkoeffizient wesentlich höher ist. Als Beispiel nennen wir Ihnen Iso-Elastik mit k = 3,6 aber einen 50 mal größeren Temperaturkoeffizienten als Konstantan. Die praktischen Formen der Drahtspirale auf dem Trägermaterial sind vielfältig. Am gebräuchlichsten ist die in Bild 4a gezeigte Verlegung

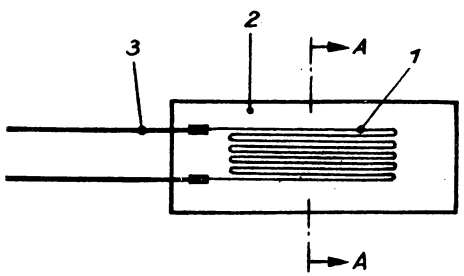


Bild 4a

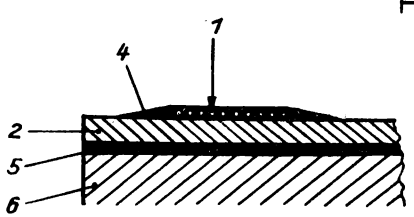


Bild 4b

des Drahtes. Der Dehnungsdraht 1 ist auf dem Papierträger 2 festgeklebt. Zur besseren Anschlußmöglichkeit sind verstärkte Anschlußelektroden 3 vorhanden. Einen Schnitt durch einen aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen zeigt Bild 4b (4 = Leimschicht, mit welcher der Draht auf das Papier

geklebt ist; 5 = Leimschicht zwischen Papierträger und Meßfläche; 6 = Meßobjekt).
Die Verarbeitung der mit Dehnungsmeßstreifen aufgenommenen Meßwerte erfolgt bei statischer oder quasistatischer Belastung mit der Wheatston'schen Meßbrücke, deren prinzipiellen Aufbau Sie schon im Abschnitt 1.1.2 kennengelernt haben. Bild 5 zeigt Ihnen den Aufbau einer solchen Brücke

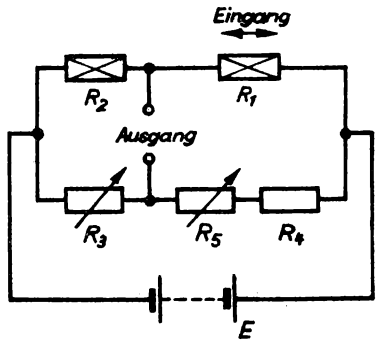


Bild 5

speziell für Dehnungsmessungen. R_1 ist ein Dehnungsmeßstreifen, welcher die geometrischen Veränderungen des Meßobjektes erfassen soll. R_2 ist ebenfalls ein Dehnungsmeßstreifen mit den gleichen Fertigungsdaten wie R_1. Der Meßstreifen R_2 ist auf das Meßobjekt an einer dehnungsmäßig nicht beanspruchten Stelle aufgeklebt. Durch diese Maßnahme werden thermische Widerstandsänderungen weitgehend kompensiert, so daß sie nicht in das Meßergebnis eingehen können. Der veränderliche Widerstand R_5 dient zur Nulljustierung der Meßeinrichtung bei Inbetriebnahme.
Soll die Dehnungsmeßeinrichtung nur zu Meßzwecken und nicht als Meßorgan innerhalb eines Regelkreises benutzt werden, so ist R_3 ein Präzisions-Kurbelwiderstand mit dem, bei einer Widerstandsänderung des aktiven Dehnungsmeßstreifen, das Brückengleichgewicht wieder hergestellt werden kann. Zur Nullanzeige schaltet man in diesem Fall an den Ausgang der Meßeinrichtung ein Galvanometer.

1.1.4 Fotowiderstände

Bei diesem Meßglied handelt es sich um einen OHMschen Widerstand, dessen Widerstandswert von der Beleuchtungsstärke abhängt, der der Widerstand ausgesetzt ist. Als Widerstandsmaterialien verwendet man für diese Zwecke

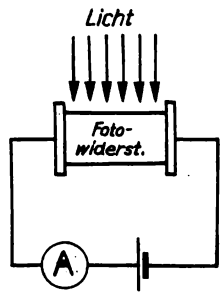


Bild 6

hauptsächlich Halbleiter, wie Selen, Thalliumsulfid, Cadmiumsulfid und ähnliche. Bild 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau zur Messung der Lichtstärken und Anzeige derselben mittels mA-Meter. Zur Verwendung in Regelungsanlagen wird man den Fotowiderstand mit einer Brückenschaltung kombinieren, in welcher gleichzeitig der Soll-Ist-Wertvergleich durchgeführt wird. (Bild 3)

Fotowiderstände sind als Einzelelemente mit Strömen bis etwa 1 mA belastbar. Die Abhängigkeit eines Cadmiumsulfid-Fotowiderstandes von der Beleuchtungsstärke ist in Bild 7

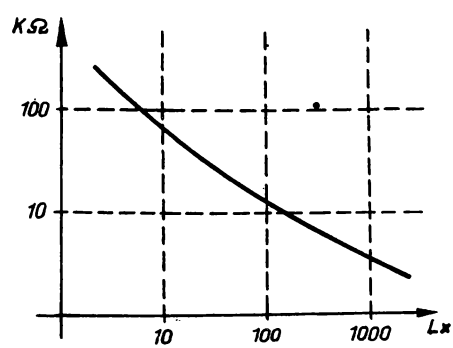


Bild 7

dargestellt. Wir weisen Sie noch darauf hin, daß der Innenwiderstand der Fotowiderstände neben der Beleuchtungsstärke auch noch von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängt.

1.1.5 Fotozellen

Die Fotozellen haben gegenüber den Fotowiderständen einen wesentlich stärkeren Eingang in die Steuerungs- und Regelungstechnik gefunden. Der Grund dafür ist in der größeren Konstanz ihrer Betriebswerte zu suchen, wenn sie auch eine viel größere Spannungsquelle (etwa 100 V) zu ihrem Betrieb benötigen als die Fotowiderstände.

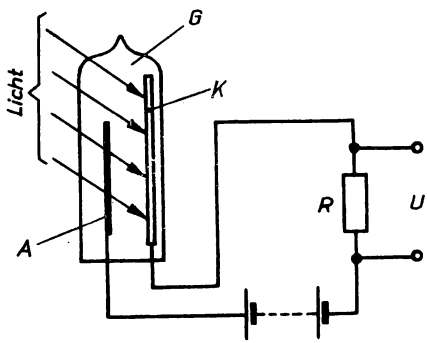


Bild 8

Die Wirkungsweise der Fotozellen geht auf die von Hallwachs 1887 entdeckte Tatsache zurück, daß Metalle durch Lichtstrahlen dazu angeregt werden können, Elektronen abzugeben. Die Ausbeute an Elektronen pro Oberflächeneinheit bei konstanter Beleuchtungsstärke ist dabei bei den Alkalimetallen Kalium und Cäsium besonders hoch. Aufbau und Vorgänge beim Betrieb einer Fotozelle sollen anhand des Bildes 8 besprochen werden. Die Zelle selbst besteht aus 2 in einem evakuierten Glaskolben G eingeschmolzenen Elektroden. Davon ist die Anode A stab- oder gitterförmig ausgebildet, während die Katode K aus einer Metallplatte besteht, welche mit Kalium oder Cäsium belegt ist. Wird die Zelle abgedunkelt, so werden aus der Katode nur ganz wenige Elektronen frei, die ihre Austrittsenergie aus der

Wärmeenergie der Metallplatte beziehen. Da die Katode infolge der außen angeschlossenen Spannungsquelle (Saugspannung) negativ ist und die Anode positives Potential hat, werden die aus der Katode herausgetretenen Elektronen zur Anode hin abgesaugt. Durch den beschriebenen Vorgang bildet sich im Innern der Zelle und folglich auch im äußeren Stromkreis, der sehr geringe Dunkelstrom heraus. Beleuchtet man nunmehr die Katode, so kann man feststellen, daß der im äußeren Kreis fließende Strom sich etwa proportional der Zunahme der Beleuchtungsstärke vergrößert. Der Grund dafür ist in der der Katode zugeführten Strahlungsenergie zu suchen, die einen geringen Teil der dort vorhandenen Elektronen die zum Austritt benötigte kinetische Energie übermittelte. Aus den besprochenen Vorgängen wird ersichtlich, daß der Spannungsabfall am Widerstand R in dem Bild 8 proportional der Beleuchtungsstärke der Fotozelle sein muß. Für den praktischen Betrieb von Fotozellen wollen Sie bitte beachten, daß die Anzahl der pro Flächeneinheit aus der Katode heraustretenden Elektronen neben der Beleuchtungsstärke auch noch von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes abhängt.
Maxima der Elektronenausbeute liegen meistens bei λ = 400 µm und 700 µm.
In der neueren Zeit benutzt man auch Fotozellen, die eine Edel- oder Quecksilbergasfüllung mit dem Druck von einigen mm Hg-Säule aufweisen. Die Elektronenausbeute wird hier durch Stoßionisation um einige Größenordnungen erhöht, jedoch tritt der Nachteil auf, daß der im äußeren Kreis fließende Strom nicht mehr proportional der Beleuchtungsstärke ist.
Unangenehm für Regelungsanlagen kann die große Trägheit werden, die den gasgefüllten Fotozellen eigen ist. Ihre obere Grenzfrequenz liegt nämlich bei etwa 1000 Hz, d.h. sie sind nicht mehr in der Lage Wechsellicht, welches öfter als 1000 mal pro Sekunde seine Stärke ändert, in einen proportionalen Strom umzusetzen.

1.2. Meßeinrichtungen, deren Wirkung auf der Veränderung des elektrischen Feldes beruht

1.2.1 Kapazitive Geber

Bei dieser Art von Meßgeräten wird die Veränderung der Kapazität eines Plattenkondensators durch den Meßvorgang, ausgenutzt. Wie Sie wissen, berechnet sich die Kapazität eines Plattenkondensators aus:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

Darin ist

ε = Dielektrizitätskonstante,
A = Plattenfläche,
d = Plattenabstand.

Am gebräuchlichsten ist es, den Kondensator zur Messung von kleinen Längenänderungen einzusetzen. Dabei wird die Kapazität über eine Veränderung des Plattenabstandes d beeinflußt. Wie Sie aus der vorstehenden Gleichung ersehen, bringt eine Verkleinerung des Plattenabstandes eine Vergrößerung der Kapazität mit sich und umgekehrt. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit einer kapazitiven Meßeinrichtung ist in Bild 9 dargestellt.

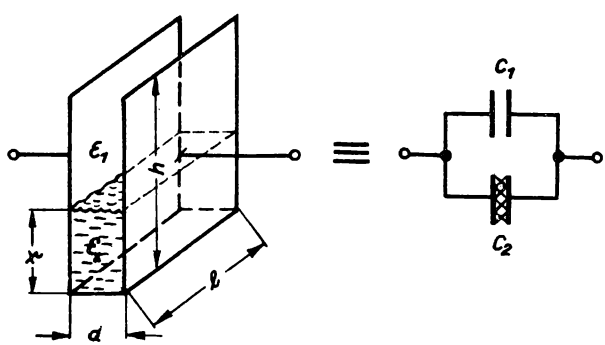


Bild 9

Hierbei soll die Standhöhe einer nichtleitenden Flüssig-

keit in einem Behälter elektrisch gemessen werden. Die skizzierte Anordnung kann elektro-technisch als eine Parallelschaltung von zwei Kondensatoren mit verschiedenen Dialektrika aufgefaßt werden. Hierfür gilt:

$$C = c_1 + c_x = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \,(h-x)\, l}{d} + \frac{\varepsilon_x \cdot \varepsilon_0 \cdot x \cdot l}{d}$$

$$c = \frac{\varepsilon_0 \cdot l}{d}\ \varepsilon_1 \cdot h + (\varepsilon_x - \varepsilon_1)\ \frac{\varepsilon_0 \cdot l}{d}\ x = k_1 + k_2 \cdot x$$

Wie aus der vorstehenden Beziehung zu erkennen ist, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Füllstand und der Kapazität der Meßeinrichtung.
Mit Hilfe der Kapazitätsänderung ist es auch möglich, Dickenmessungen von bandförmigen, nichtleitenden Stoffen durchzuführen.

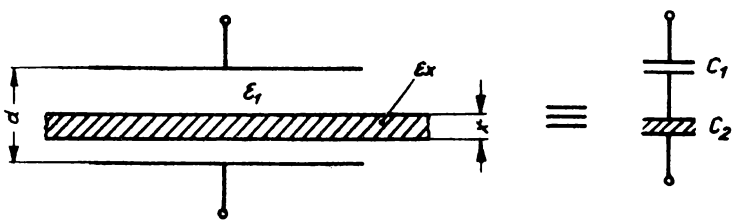


Bild 10

Wie man aus Bild 10 erkennt, kann man sich die dazu benutzte Meßeinrichtung als eine Reihenschaltung von zwei Kondensatoren vorstellen. Für diese findet man:

$$C = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2} \quad \text{mit } c_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{d-x} \quad \text{und } c_2 = \frac{\varepsilon_x \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{x}$$

$$c = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot A \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{x(d-x)\left[\frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{d-x} + \frac{\varepsilon_x \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{x}\right]} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_x \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{\varepsilon_x \cdot d + (\varepsilon_1 - \varepsilon_x)x} = \frac{k_1}{k_2 + k_3 \cdot x}$$

Aus dem Ergebnis der vorstehenden Ableitung erkennt man, daß bei der Meßeinrichtung nach Bild 10 ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen der Dicke x des Bandmaterials und der Kapazitätsänderung besteht.
Vor der Weiterverarbeitung der von den kapazitiven Gebern gelieferten Meßwerte in Regelkreisen ist noch eine Umformung der Kapazitätswerte in proportionale Spannungs- oder Stromwerte nötig.

1.2.2 Piezoelektrische Meßeinrichtungen

Quarz-, Turmalinkristalle und andere zeigen bei mechanischen Beanspruchungen auf ihren Oberflächen Ladungserscheinungen, die auf eine Veränderung des elektrischen Feldes innerhalb der Kristalle zurückzuführen sind. Dieser piezoelektrische Effekt wurde von den Brüdern Curie bereits im Jahre 1880 entdeckt. In der neueren Zeit verwendet man diese Tatsache zur technischen Messung statischer und dynamischer Kräfte (Piezoelektrische Wandler).

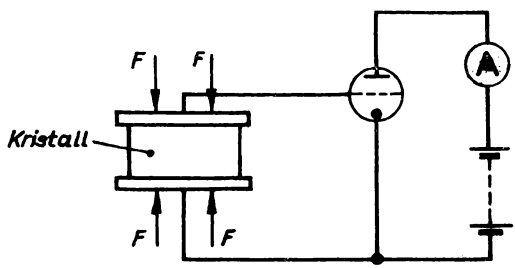


Bild 11

Eine Meßschaltung zur Bestimmung von Kräften ist in Bild 11 dargestellt. Um Verfälschungen des Meßergebnisses zu vermeiden, muß verlangt werden, daß die verwendete Elektronenröhre einen besonders hohen Eingangswiderstand hat (gute Isolation der Zuführungselektroden). Deshalb setzt man zur Verstärkung von Piezospannungen Elektrometerröhren ein, die den vorgenannten Ansprüchen genügen. Über die Wirkungsweise des in Bild 11 gezeichneten Verstärkers wollen Sie sich bitte im Abschnitt 2.1.1 informieren.

1.3. Meßeinrichtungen, deren Wirkung auf der Veränderung des magnetischen Feldes beruht

Das magnetische Feld eines Meßgerätes kann auf drei verschiedene Arten beeinflußt werden:

a. Der Scheinwiderstand einer Spule mit Eisenkern kann dadurch verändert werden, daß man den mechanischen Spannungszustand des magnetischen Kernmaterials ändert. Die Beeinflussung erfolgt dabei über eine Veränderung der Permeabilität (Magnetoelastischer Effekt).

b. Man kann die in einer Spule durch ein Wechselfeld induzierte Spannung durch mechanische Größen beeinflussen. Auf diesem Prinzip beruhen die Drehmelder.

c. Der Scheinwiderstand einer Spule kann durch stärkeres oder schwächeres Eintauchen eines Eisenkernes verändert werden.

1.3.1 Abtastspulen mit veränderlichem Eisenkern

Das Funktionsprinzip beruht darauf, daß durch stärkeres Eintauchen eines Eisenkernes in eine Spule der Widerstand des magnetischen Feldes verkleinert wird. Da die Induktivität L aber dem magnetischen Widerstand R_m umgekehrt proportional ist,

$$L = \frac{W^2}{R_m}$$

wird durch eine Veränderung des magnetischen Kreises auch der Scheinwiderstand der Spule beeinflußt.
Bild 12a zeigt eine auf dem beschriebenen Prinzip aufgebaute Meßeinrichtung. Bild 12b eine zur Umwandlung der Scheinwiderstandsänderung in eine Stromänderung dienende Brückenschaltung.
Darin ist $L_{meß}$ die in Bild 12a skizzierte Meßspule,

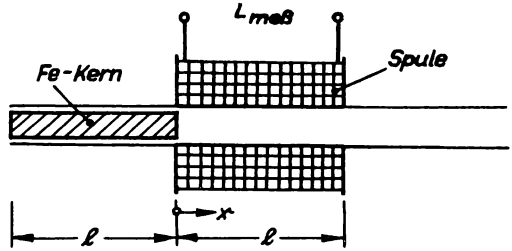


Bild 12a

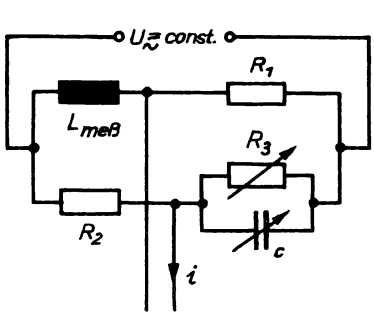


Bild 12b

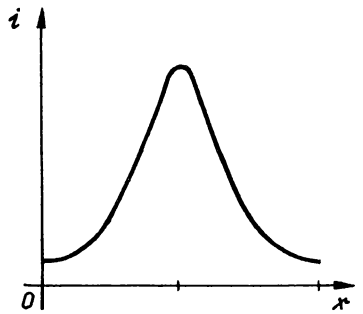


Bild 12c

R_1 und R_2 sind Festwiderstände, während die Parallelschaltung aus C und R_3 für die Sollwerteinstellung bestimmt ist. In Bild 12c ist der experimentell aufgenommene Brückendiagonalstrom (Ausgangsgröße) über der Eintauchtiefe x des Eisenkernes in die Spule qualitativ aufgetragen. Da sich ein sehr stark nichtlinearer Zusammenhang zwischen Eingangsgröße (x) und Ausgangsgröße ergibt, ist diese Anordnung für Regelungszwecke nicht ideal. Günstigere Verhältnisse bezüglich der Linearität erzielt man mit einer Anordnung entsprechend Bild 13a. Die zugehörige

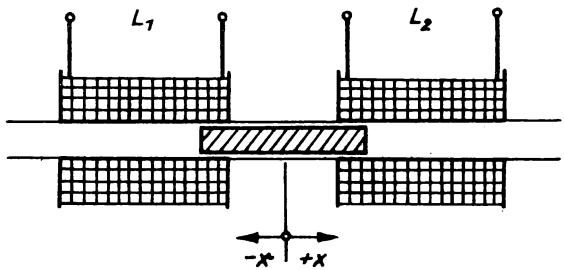
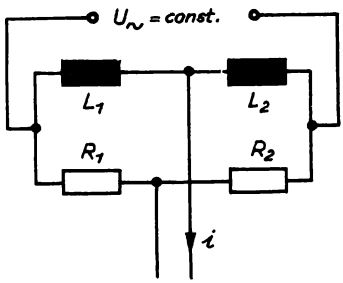


Bild 13a



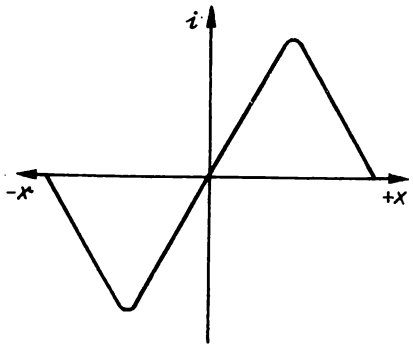


Bild 13b

Bild 13c

Brückenschaltung und der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße sind in den Bildern 13b und 13c skizziert.

1.4. Meßgeräte, deren Wirkung auf der Erzeugung einer Urspannung beruht

1.4.1 Thermoelemente

Im Gegensatz zu den Widerstandsthermometern werden die Thermoelemente zu Temperaturvergleichsmessungen hoher Temperaturen bis etwa 1600 °C benutzt.
Wie Sie aus der Werkstoffkunde wissen, ist jedes Metall in der Lage, aus seiner Oberfläche Elektronen abzugeben. Die Zahl der abgegebenen Elementarteilchen ist eine Funktion der Temperatur, weil für den Austritt der Elektronen aus dem Metallverband eine bestimmte Energie aufgebracht werden muß. Die kinetische Energie der Elektronen ist aber um so größer, je größer die Eigentemperatur des Metalls ist. Die Wirkungsweise eines Thermoelementenpaares wollen

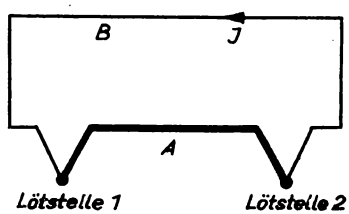


Bild 14

wir Ihnen an Hand des Bildes 14 erklären. Zur besseren Verständlichkeit benutzen wir eine Modellvorstellung:

a. Es bestehe kein Temperaturunterschied zwischen den Lötstellen 1 und 2 !
Vorgang an Lötstelle 1: Metall A gibt 5 Elektronen an Metall B ab. Metall B habe auf Grund seiner Gitterstruktur ein stärkeres Bestreben Elektronen abzugeben als Metall A und stoße deshalb 10 Elektronen nach Metall A. Damit hat Metall A einen Überschuß von 5 Elektronen, es wurde also negativ aufgeladen, während Metall B einen Mangel an 5 Elektronen hat und damit positiv geladen wurde.
Vorgang an Lötstelle 2: Wegen der vorausgesetzten gleichen Temperatur spielt sich hier der gleiche Vorgang ab.
Elektrotechnisch gesehen handelt es sich in diesem Fall um zwei gleiche, gegeneinandergeschaltete Spannungsquellen, die sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben.

b. Es bestehe eine Temperaturdifferenz zwischen den Lötstellen 1 und 2 ! Wir nehmen an, daß die Lötstelle 1 auf der unter a gewählten Temperatur gehalten wird, während man die Lötstelle 2 erwärmt.
Vorgang an Lötstelle 2: Infolge ihres unterschiedlichen Aufbaus gibt das Metall A 6 Elektronen ab, das Metall B aber 12. Durch den beschriebenen Vorgang tritt an dieser Lötstelle ein anderes Ladungsverhältnis auf als an Lötstelle 1 und damit auch eine andere Berührungsspannung.
Als Folge der Differenz zwischen den beiden Berührungsspannungen fließt in dem, aus den beiden Metallen A und B gebildeten Stromkreis ein Strom.

Die Größe der entstehenden Spannungsdifferenz hängt nur von der Art der Metalle und der Temperaturdifferenz, nicht aber vom Querschnitt der beiden Leiter ab. Die Beziehung zwischen Thermospannung und Temperaturdifferenz ist in

Bild 15 für die drei gebräuchlichsten Materialkombinationen dargestellt. Welche Kombination man für eine praktische Messung benutzt, hängt von dem zu messenden Temperaturbereich ab.

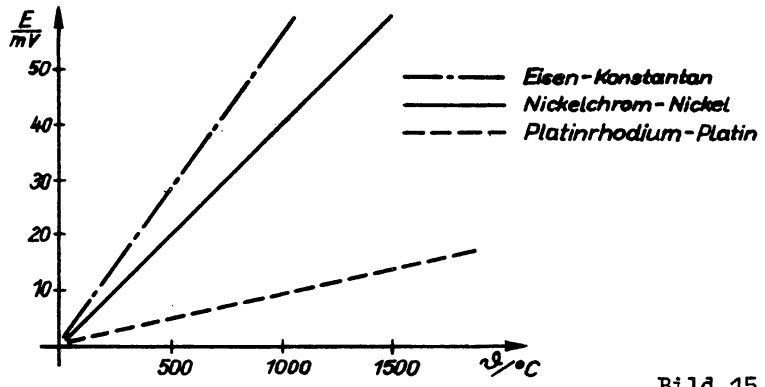


Bild 15

Eine Grundschaltung zur Temperaturmessung mittels Thermoelement ist in Bild 16a dargestellt. Da die unmittelbare Klemmstelle des Thermoelementes A sich als Temperaturvergleichspunkt nicht eignet (sie ist zu großen Temperaturschwankungen unterworfen), schließt man an das Thermoelement Ausgleichsleitungen an, die aus den gleichen Materialien wie dieses bestehen, und verlegt den Vergleichspunkt B dadurch an eine Stelle des Raumes, an dem die Temperaturkonstanz für die verlangte Meßgenauigkeit ausreicht. Wird eine genauere Messung verlangt, setzt man einen Thermostaten ein. Bild 16b! Dieser besteht aus einem Thermo-

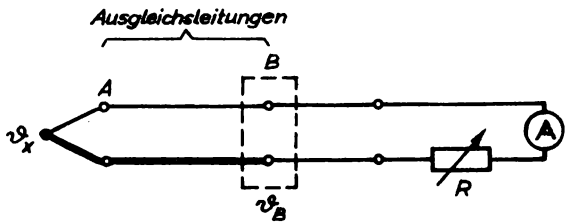


Bild 16a

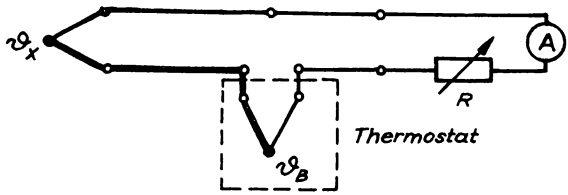


Bild 16b

element gleichen Aufbaus wie das Meßelement. Das Thermostatenelement befindet sich in einem elektrisch beheizten kleinen Kasten mit selbstständiger Temperaturregelung. Die Temperatur des Thermostaten wird je nach den Verhältnissen auf 20 °C oder 50 °C konstant gehalten. Der Widerstand R in den Bildern 16a und 16b dient dem Abgleich der gesamten Meßeinrichtung. Als Anzeigeinstrumente für Thermoströme können Drehspulmeßwerke oder Kompensatoren Verwendung finden. Gegen mechanische Beschädigungen werden Thermoelemente in der Regel in Schutzrohre eingebaut. Regelungstechnisch haben diese Schutzrohre den Nachteil, daß sie der Meßeinrichtung eine beträchtliche Trägheit verleihen.

1.4.2 Tachometergeneratoren

Bei Drehzahlregelungen wird als Meßobjekt in der elektrischen Regelungstechnik heute im überwiegendem Maße der Tachometergenerator eingesetzt. Es ist wie ein normaler Gleichstromkleinmotor aufgebaut, benutzt aber zur Erzeugung des Erregerfeldes keine Erregerwicklung sondern einen Aluminium- Nickel- Dauermagneten. Der Kollektor dieser Maschine ist 6-, 8- oder 12- teilig ausgeführt und liefert einen pulsierenden Gleichstrom, der vor der Weiterverarbeitung im Regelkreis noch eine Siebkette zu seiner Glättung durchlaufen muß. Das Verhalten der Tachometergeneratoren wird durch die Beziehung

$$E = c \cdot \Phi \cdot n = k \cdot n$$

beschrieben. Darin ist c eine Maschinenkonstante, Φ der vom Erregermagneten gelieferte Fluß und E die von dem Tachometergenerator erzeugte Urspannung. Da bei Dauermagneten

in erster Näherung konstant ist, kann diese Größe mit in die neue Maschinenkonstante k einbezogen werden. Wie aus der vorstehenden Gleichung zu ersehen ist, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Eingangsgröße (Drehzahl) und Ausgangsgröße (Spannung). Tachometergeneratoren werden zur direkten Drehzahlmessung bis etwa $n = 2500\ min^{-1}$ eingesetzt. Bei höheren Drehzahlen treten Kollektorschwierigkeiten auf. Sollen mit einer Tachomaschine Drehzahlen über $2500\ min^{-1}$ gemessen werden, schaltet man ein Getriebe vor !

Zusammenfassung zum Abschnitt 1:

Die im vorstehenden Abschnitt behandelten Meßglieder dienen der elektrischen Messung mechanischer Größen. Ihre Ausgangsgröße ist in jedem Falle ein elektrischer Wert im weitesten Sinne des Wortes. Der Meßvorgang beruht bei den besprochenen Meßgeräten auf der Veränderung des elektrischen Widerstandes (OHMscher oder Scheinwiderstand!) oder auf einer Beeinflussung der erzeugten Urspannung.

Wiederholungsfragen zum Abschnitt 1:

1. Auf welcher physikalischen Tatsache beruht der Meßvorgang bei Einsatz eines Dehnungsmeßstreifens ?
2. Wann werden Widerstandsthermometer und wann Thermoelemente zur Messung der Temperatur eingesetzt ?
3. Beschreiben Sie die physikalischen Vorgänge in einer Fotozelle beim Auftreffen eines Lichtstrahles!

2. Verstärker

2.1. Elektronische Verstärker

2.1.1 Verstärker mit Hochvakuumröhren

Zur Verstärkung von Spannungen wird in der Regelungstechnik häufig der Triodenverstärker eingesetzt. Die Triode ist, wie ihr Name schon sagt, eine Dreielektrodenröhre. Sie besteht aus der durch den Heizfaden direkt oder indirekt beheizten Katode, dem der Steuerung dienenden Gitter und der Anode. Durch die Beheizung wird den freien Elektronen innerhalb der Katode kinetische Energie zugeführt, die sie in die Lage versetzt, das Katodenmaterial zu verlassen. Eine äußere Anodenspannungsquelle verleiht der Katode negatives und der Anode positives Potential. Die aus der Katode emitierten Elektronen werden wegen ihrer negativen Ladung von der Anode angezogen. Es entsteht im Inneren der Röhre ein Elektronenstrom. Die der Katode entzogenen Elektronen werden von der Anodenspannungsquelle immer neu nachgeliefert. Verleiht man dem Gitter, welches sich zwischen Katode und Anode befindet, ein negatives Potential gegenüber der Katode, so stößt es die Elektronen ab und es gelangen nicht mehr so viele wie bei neutralem Gitter zur Anode. Der Elektronenstrom hat sich verkleinert! Man erkennt leicht, daß die Stromänderung durch die Röhre bei konstanter Anodenspannung der Gitterspannungsänderung proportional ist. Läßt man den Anodenstrom (Elektronenstrom im äußeren Stromkreis) über einen genügend großen Widerstand fließen, so ist der Spannungsabfall über demselben ein gespiegeltes vergrößertes Abbild der Gitterspannungsänderungen. Man kann bei der Triode also durch kleine Änderungen der Gitterspannung große Änderungen des Spannungsabfalles über dem Anodenwiderstand erzeugen. Untersucht man experimentell die Abhängigkeit zwischen Gitterspannung

und Anodenstrom, so erhält man die in dem Bild 17 dargestellte Kurve. Den grundsätzlichen Aufbau einer Triodenverstärkerschaltung zeigt Bild 18a.

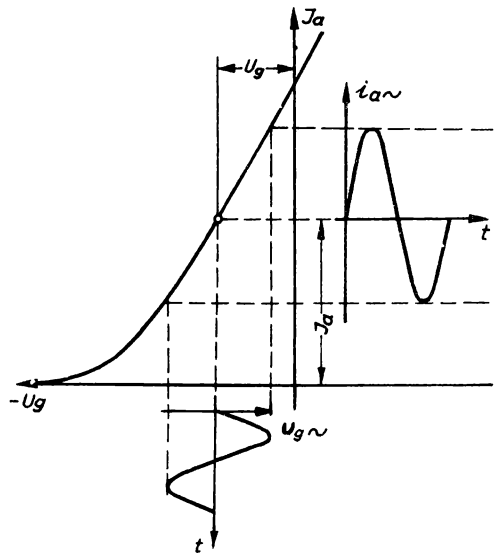


Bild 17

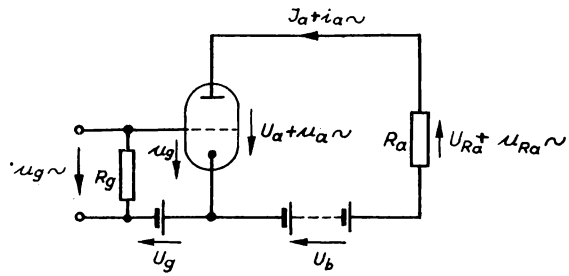


Bild 18a

Die Anodenspannung wird von der Spannungsquelle U_b geliefert. Zur Festlegung des Arbeitspunktes auf der I_a-U_g-Kennlinie liegt die Spannungsquelle U_g im Gitterkreis. Man legt den Arbeitspunkt etwa in den steilsten Teil der Kurve (Bild 17), um größtmögliche Verstärkung zu erreichen. Wird die Gitterspannung durch Veränderung

der an R_g abfallenden Gitterwechselspannung vergrößert oder verkleinert, so gelangen mehr oder weniger Elektronen zur Anode, und der Anodenstrom ändert sich um i_a und die Anodenspannung um u_a . Da über der Röhre auch noch die Gleichspannung U_a (Hilfsenergie) auftritt, muß die Wechselspannung durch Koppelglieder abgetrennt werden. Dafür können RC-Glieder (Bild 18b) oder Übertrager (Bild 18c) Verwendung finden.

Den im Anodenkreis fließenden konstanten Gleichstrom kann man dazu benutzen, die Gittervorspannungsquelle U_g einzusparen. Eine entsprechende Schaltung finden Sie in Bild 18d.

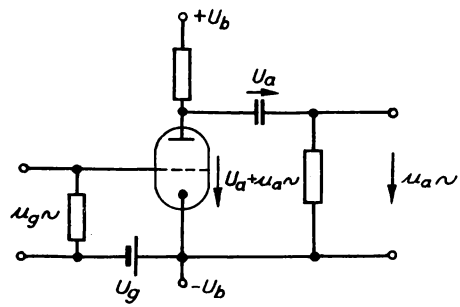


Bild 18b

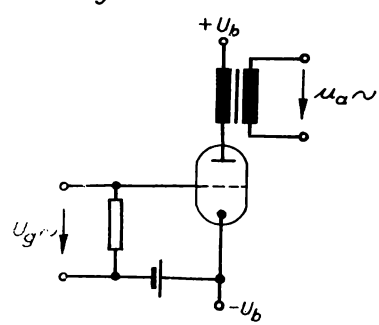


Bild 18c

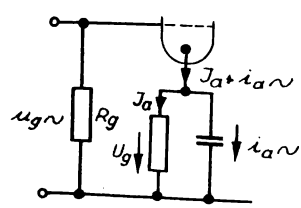


Bild 18d

Bei derselben befindet sich in der Katodenleitung ein OHMscher Widerstand, welche von einem Kondensator überbrückt wird. Für den Anodengleichstrom stellt dieser Kondensator einen unendlich großen Widerstand dar. Er fließt also durch den OHMschen und erzeugt dort einen Spannungsabfall, welcher die Katode positiv gegenüber dem Gitter vorspannt. Der Parallelkondensator ist so ausgelegt, daß sein Wechselstromwiderstand bei den zu verstärkenden Frequenzen klein ist, womit gewährleistet wird, daß man denselben durch die getroffene Schaltungsmaßnahme nicht verändert.
Sehr oft steht man auch in der Regelungstechnik vor der Aufgabe, Spannungen mit sehr niedriger Frequenz oder Gleichspannungen zu verstärken. Zu diesem Zweck können Sie den vorstehend beschriebenen Verstärker nicht benutzen, weil die Übertrager Gleichspannungen nicht übersetzen und Gleichströme im statischen Zustand durch Kapazitäten nicht zu beeinflussen sind. Zur Verstärkung von Gleichspannungen bzw. Wechselspannungen kleiner Frequenz kann man den in Bild 19 im Prinzip skizzierten zweistufigen Triodenverstärker benutzen.

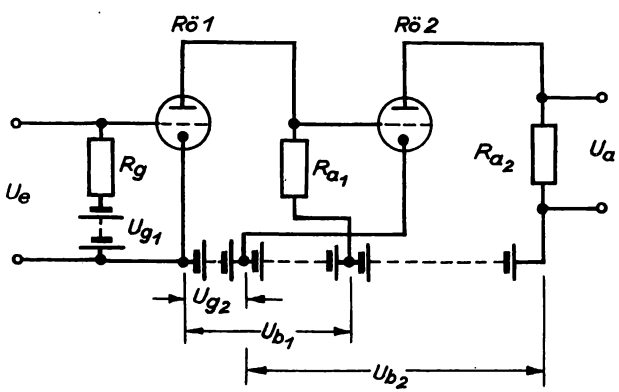


Bild 19

Die Eingangsspannung U_e erzeugt über den durch sie hervorgerufenen Strom einen Spannungsabfall am Gitterwiderstand R_g der Röhre 1. Die Differenz zwischen diesem Spannungsabfall und der negativen Gittervorspannung U_{g1}

stellt die Gitterspannung der Röhre 1 dar. Die Betriebsspannung U_{b1} ist bei dieser Schaltungsart nicht mehr gleich der Anodenspannung von Röhre 1, weil der Anodenstrom am Widerstand R_{a1} einen Spannungsabfall hervorruft. Die Schwankungen desselben sind den Schwankungen der Eingangsspannung proportional. Um eine Verstärkung in der zweiten Stufe zu erreichen, muß das Gitter der Röhre 2, wie bereits beschrieben, gegenüber der Katode ein negatives Potential von einigen Volt haben. Deshalb kann man den Spannungsabfall an R_{a1} nicht direkt auf die Gitter-Katodenstrecke der Röhre 2 geben. Durch den in Bild 19 dargestellten Anschluß der Katode von Rö 2 an die Spannungsquelle, schafft man sich die benötigten Gitterspannungsverhältnisse durch Einschaltung einer entsprechenden Gittervorspannung in den Gitterkreis der Röhre 2. Die Vorgänge innerhalb der zweiten Verstärkerstufe wurden Ihnen bereits am Anfang dieses Abschnittes dargelegt, so daß sie an dieser Stelle nicht noch einmal wiederholt zu werden brauchen. Die Ausgangsspannung des betrachteten Gleichspannungsverstärkers kann über dem Widerstand R_{a2} abgenommen werden.

Sehr oft findet man in der Elektronik oder auch in der elektronischen Regelungstechnik Schaltungen, die durch Erweiterung des in Bild 20a gezeigten Grundschaltbildes entstanden sind. Zum Unterschied zu einer normalen Trioden-

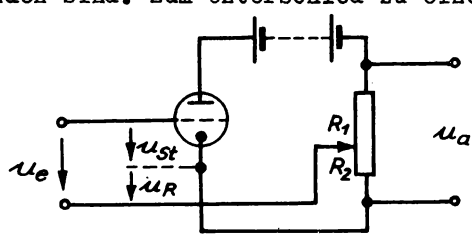


Bild 20a

verstärkerschaltung liegt hierbei die Eingangsspannung nicht zwischen Gitter und Katode, sondern zwischen Gitter und einem Anzapfungspunkt des Anodenwiderstandes. Diese Schaltungsmaßnahme hat zur Folge, daß die an der Röhre

liegende Steuerspannung nicht gleich der Eingangsspannung ist.

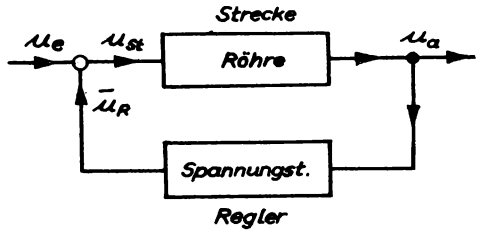


Bild 20b

Vielmehr gilt, wie man leicht aus dem Schaltbild entnehmen kann, die Beziehung:

$$u_{St} = u_e - u_R \qquad (1)$$

Die Tatsache, daß ein Teil der Ausgangspannung negativ auf den Eingang der Schaltung zurückgeführt wird, legt den Vergleich mit einem Regelkreis nahe. Aus diesem Grunde ist in Bild 20b das Blockschaltbild für die Schaltung nach Bild 20a gezeichnet. Man erkennt sofort, daß es sich um einen vollständigen Regelkreis handelt.
Es soll nun untersucht werden, wie sich die negative Rückführung eines Teiles der Ausgangsspannung auf den Gesamtverstärkungsfaktor auswirkt! Dafür gilt:

$$V_{ges} = \frac{u_a}{u_e} \qquad (2)$$

Für die Verstärkung der Triode an sich kann man setzen:

$$V_s = \frac{u_a}{u_{St}} \qquad (3)$$

Als Verstärkungsfaktor des im Rückführzweig liegenden Reglers ergibt sich:

$$V_R = \frac{u_R}{u_a} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad (4)$$

Setzt man die Beziehungen (3) und (4) in die Gleichung (1) ein, so bestimmt man mit Hilfe von (2) den Gesamtverstärkungsfaktor zu:

$$V_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{V_S} + V_R} \qquad (5)$$

Aus der Schaltung ergibt sich, daß $V_R \leqq 1$ sein muß. Wählt man die Röhre so aus, daß $V_S \gg 1$ ist, so kann man (5) durch die Beziehung:

$$V_{ges} \approx \frac{1}{V_R} \qquad (6)$$

annähern. Aus (6) erkennt man, daß durch Veränderung des Abgriffes am Anodenwiderstand zwischen 1 und einem Maximalwert eingestellt werden kann. Neben der gezeigten Einstellmöglichkeit des Gesamtverstärkungsfaktors hat die untersuchte Schaltung noch weitere Vorteile (Unempfindlichkeit gegen Schwankungen der Betriebsspannungen, größerer Frequenzbereich usw.), die Ihnen an gegebener Stelle innerhalb dieser Lehrbriefreihe beschrieben werden.

Als Abschluß dieses Abschnittes geben wir Ihnen mit der Schaltung nach Bild 21 ein praktisches Beispiel für die Anwendung eines Röhrenverstärkers in der Regelungstechnik.

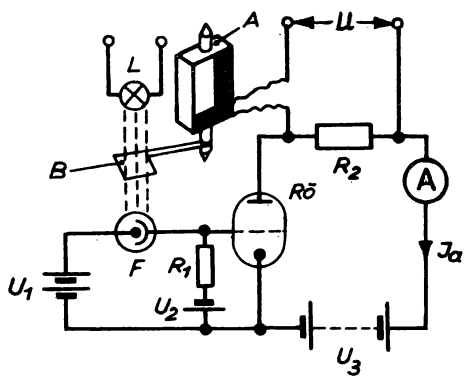


Bild 21

Dabei handelt es sich um einen elektro-optischen Kompensator, der zur Messung von Spannungen eingesetzt werden kann, ohne daß das Meßobjekt belastet wird (eine vorübergehende Belastung tritt auch bei dieser Einrichtung auf, sie verschwindet jedoch, wenn der Kompensator seinen statischen Zustand erreicht hat). Der Kompensator besteht aus einem empfindlichen Drehspulinstrument A, an dessen beweglichem Organ eine Blende B angebracht ist. Diese deckt eine Fotozelle F mehr oder weniger gegen einen

Lichtstrahl, der von der Lampe L ausgeht, ab. Die Fotozelle befindet sich in einem Stromkreis mit dem Widerstand R_1 und den Spannungsquellen U_1 und U_2. U_2 hat die Aufgabe, den Arbeitspunkt der Röhre Rö im I_a- U_g - Kennlinienfeld festzulegen. Der von der Spannungsquelle U_1 hervorgerufene und durch die Fotozelle regulierte Strom, erzeugt am Widerstand R_1 einen Spannungsabfall, der der Gittervorspannung entgegenwirkt. Durch diese Schaltungsmaßnahme erreicht man, daß ein verstärkter Lichtzutritt zur Fotozelle auch ein Ansteigen des Anodenstromes zur Folge hat. Der vom Anodenstrom am Widerstand R_2 hervorgerufene Spannungsabfall ist der zu messenden Spannung (U) entgegengeschaltet. Es ist leicht einzusehen, daß im Meßkreis kein Strom fließt, wenn die Spannung U genau entgegengesetzt gleich dem Spannungsabfall an R_2 ist. Liegt dieser Zustand vor, befindet sich das Rähmchen A in Ruhe und die Spannungsquelle von U wird nicht belastet.
Weil im abgeglichenen Zustand

$$U = I_a \cdot R_2$$

gilt, ist der Anodenstrom und damit der Ausschlag des Amperemeters A ein Maß für die eingegebene Spannung U. Das Meßinstrument kann also direkt in Spannungswerten für die Spannung U geeicht werden.
Da es sich hier ebenfalls wieder um einen Kreisprozeß handelt, kann man auch hier untersuchen, ob ein echter Regelvorgang vorliegt!
Dieses ist tatsächlich der Fall! Man kann nämlich die Kompensatoren in die Gruppe der Folgeregler einordnen, wenn man die zu messende Größe als Führungsgröße ansieht. Regelgröße ist in diesem Fall der Anodenstrom I_a.

Zusammenfassung zum Abschnitt 2.1.1

Die Elektronenröhre stellt ein ideales Gerät zur nahezu leistungslosen Verstärkung von Spannungen dar. Die Verstärkung ist mit geringem Leistungsaufwand auf der Ein-

gangsseite durchzuführen, weil der Gittereingangswiderstand im normalen Betriebsfall sehr hoch ist (besonders bei Elektrometerröhren). - Die Triode kann sowohl zur Verstärkung von Wechsel- als auch von Gleichspannungen verwendet werden. Ein Gleichspannungsverstärker unterscheidet sich jedoch in seinem Aufbau stark von dem eines Wechselspannungsverstärkers (Induktivitäten - Kapazitäten !). Für den Betrieb eines Triodenverstärkers sind grundsätzlich zwei Spannungen nötig: Gittervorspannung und Anodenspannung. Durch eine Kunstschaltung kann man die Gittervorspannung durch den Anodengleichstrom erzeugen und die Gittervorspannungsquelle einsparen.

Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.1

1. Beschreiben Sie den Verstärkungsvorgang einer Wechselspannung an Hand der Verstärkerschaltung nach Bild 18a!
2. Beschreiben Sie den Regelungsvorgang, der sich in der Einrichtung nach Bild 21 abspielt, wenn aus dem statischen Zustand heraus die Spannung U plötzlich verkleinert wird!

2.1.2 Verstärker mit gasgefüllten Röhren

Der wichtigste Vertreter der gasgefüllten Röhren in der Steuerungs- und Regelungstechnik ist das Thyratron. Es hat in seiner Bauart als Triode grundsätzlich den gleichen Aufbau wie eine Hochvakuumtriode: Einer mit Wechselstrom beheizten Katode steht eine Anode gegenüber. Zwischen diesen beiden befindet sich das Gitter. Zum Unterschied gegen die Hochvakuum- Elektronenröhren, die im vorstehenden Abschnitt behandelt wurden, ist der Glaskolben der Thyratrons nicht luftleer, sonder mit Quecksilberdampf oder einem Edelgas gefüllt. Da das Thyratron seiner Wirkungsweise und seiner Verwendung nach für viel größere Stromstärken ausgelegt ist als die Elektronenröhre, ist der Aufbau der Elektroden auch entsprechend robuster. Das Gitter zum Beispiel besteht aus einer Graphitscheibe, in

die für den Durchgang des Elektronen- und Ionenstromes einige Löcher gebohrt sind. Auch die Anode ist aus Graphit aufgebaut.
Die Eigenschaften eines Thyratron sind aus seiner Steuerkennlinie ersichtlich. Zur Aufnahme derselben verwendet man eine Schaltung entsprechend Bild 22. Darin dienen die

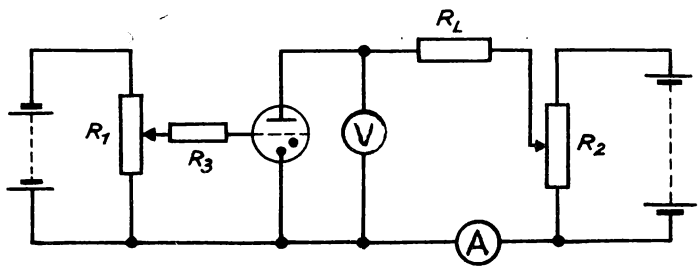


Bild 22

Spannungsteiler R_1 und R_2 der Einstellung der Gitter- und Anodenspannung. Der Widerstand R_3 ist ein Gitterschutzwiderstand, der sehr hochohmig ist und verhindern soll, daß es im Gitterkreis zu einem Stromfluß kommt. Stellt man am Spannungsteiler R_1 eine Gitterspannung ein, die mehr stark negativ ist (etwa -30 V) und erhöht langsam die Anodenspannung U_a, so kann man beobachten, daß der Anodenstrom immer gleich Null bleibt, während die gesamte, am Anodenkreis liegende Spannung über dem Thyratron abfällt. Verkleinert man nunmehr die negative Gitterspannung und fährt den gesamten möglichen Anodenspannungsbereich von Null beginnend durch, so erreicht man bei einem bestimmten Gitterspannungswert eine Anodenspannung, bei der plötzlich im Anodenkreis ein nur noch vom Widerstand R_L abhängiger Anodenstrom fließt. Man sagt: Die Röhre hat gezündet! Welche Vorgänge haben sich im Innern des Thyratrons abgespielt? - Durch die Beheizung der Katode werden von ihr, genau wie bei Hochvakuumröhren, Elektronen ausgestoßen. Bei sehr hoher Gitterspannung können diese aber nicht von der Anode abgesaugt werden, weil die Elektronen von dem sehr stark negativ geladenen Gitter zurückgestoßen werden. Bei Verkleinerung der negativen Gitter-

spannung wird schließlich die Anziehungskraft, die von der Anode auf die Elektronen ausgeübt wird, stärker als die vom Gitter hervorgerufene Gegenkraft. Als Folge davon fliegen die Elektronen durch die Gitterlöcher hindurch zur Anode. Auf ihrem Weg dorthin treffen sie aber auf Atome des Füllgases. Wenn die kinetische Energie (diese hängt, wie Sie wissen, von deren Ladung und dem durchlaufenen Spannungsabfall ab) nun groß genug ist, wird das Gasatom in negativ geladene Elektronen und einem positiven Atomrumpf zerschlagen. Die neu gebildeten Elektronen wandern mit den alten weiter zur Anode. Der positive Atomrumpf wird entweder von dem negativen Gitter oder von der Katode angezogen. Die positiven Atomrümpfe legen sich als eine Raumladungswolke um das Gitter und heben damit seinen Einfluß auf die Vorgänge im Katoden-Anodenraum auf. In dem jetzt vorliegenden gezündeten Zustand der Röhre kann die Gitterspannung in beliebiger Weise verändert werden, ohne die Vorgänge im Anodenkreis zu beeinflussen. Die von der Katode angezogenen Atomrümpfe neutralisieren sich unter Bildung von Gasatomen mit der dort vorhandenen Elektronenwolke. Das Verschwinden dieser Wolke hat ein starkes Ansteigen des Anodenstromes zur Folge.
Im gezündeten Zustand fällt nahezu die gesamte, am Anodenkreis liegende Spannung über dem Lastwiderstand R_L ab. Über dem Thyratron selbst kann man nur die sehr geringe Brennspannung (Bogenspannung) messen. Diese ist unabhängig vom Anodenstrom und wird nur von der Art des Füllgases und dessen Druck bestimmt. Bei Quecksilberdampf-Thyratrons beträgt die Brennspannung normal etwa 16 V.
Soll ein gezündetes Rohr gelöscht werden, so gibt es nur eine Möglichkeit: Die Anodenspannung muß soweit verkleinert werden, bis sie unter die Brennspannung abfällt.
Durch wiederholte Bestimmung der für den Zündeinsatz nötigen Anodenspannung bei immer neuen Gitterspannungen gelangt man zu den in Bild 23 dargestellten Steuerkennlinien. Wie man aus dem genannten Bild erkennt, ist die Lage

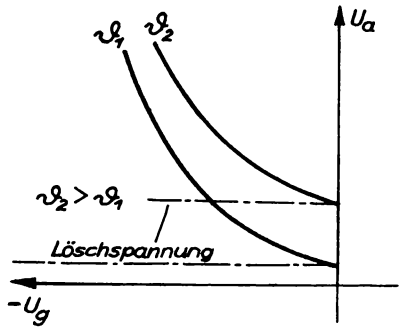


Bild 23

der Zündkennlinie von der Temperatur des Thyratron abhängig. Diese Tatsache ist auch erklärlich, wenn man sich klarmacht, daß Temperatur und Atomkonzentration des Quecksilbergases einander direkt proportional sind (bei höherer Temperatur ist mehr von dem tropfenförmigen Quecksilber verdampft, welches sich im kalten Zustand in der Röhre befindet). Bei gasgefüllten Thyratrons tritt die Temperaturabhängigkeit nicht auf.

Zur besseren Erläuterung der Steuerverfahren, die bei der Anwendung des Thyratrons als gesteuerter Gleichrichter benutzt werden, ist es günstig, wenn man aus der Steuerkennlinie und einer Halbwelle der zu steuernden Anodenspannung (Wechselspannung!), entsprechend Bild 24 die Zünd-

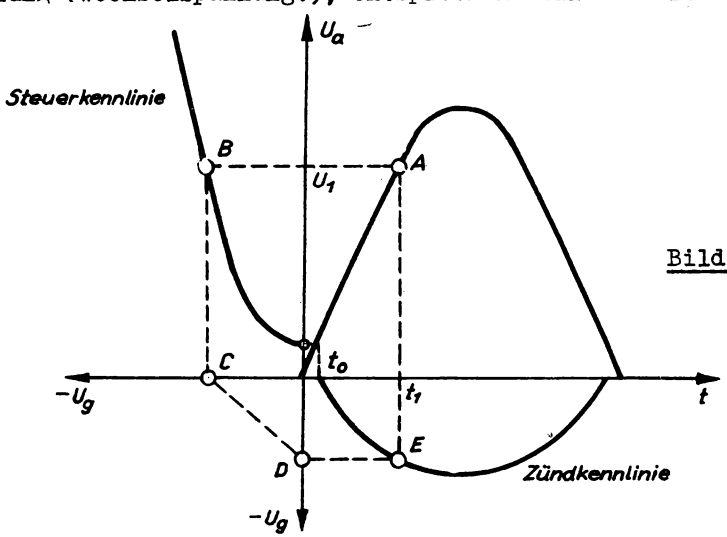


Bild 24

kennlinie konstruiert. - Man erhält den zum Zeitpunkt t_1 gehörigen Zündkennlinienwert, indem man von t_1 auf der Zeitachse die Senkrechte im ersten und vierten Quadranten errichtet. Im ersten Quadranten wird die Anodenwechselspannungshalbwelle durch diese Senkrechte im Punkt A geschnitten. Eine Parallele zur $-U_g$-t-Achse schneidet die Steuerkennlinie im Punkt B. Über die Konstruktion des Punktes C bestimmt man D, welcher den zur Anodenspannung U_1 benötigten Gitterspannungswert darstellt, damit gerade der Zündeinsatz erfolgt. Der Schnittpunkt der Waagerechten durch D mit der verlängerten Verbindungslinie A- t_1 liefert E, den zum Zeitwert t_1 gehörigen Punkt der Zündkennlinie.

Mit Hilfe der Zündkennlinie wollen wir nun den Einfluß der Gittergleichspannung auf den Spannungsabfall am Lastwiderstand bei der in Bild 25 skizzierten Schaltung untersuchen.

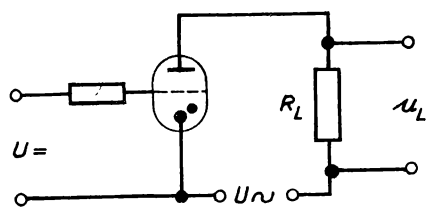


Bild 25

Die zugehörige Zündkennlinie und Anodenspannungshalbwelle ist in Bild 26 dargestellt. Legt man an das Gitter des Thyratrons eine Spannung - U_{g1}, so haben die in Bild 26a gezeichneten Verhältnisse Gültigkeit. Durch Einzeichnung der Gitterspannungsgeraden $-U_{g1}$ erhält man den Schnittpunkt A mit der Zündkennlinie und damit den Zeitpunkt t_1, bei welchem die Röhre zündet. Vom Nulldurchgang an, bis t_1, fällt die gesamte angelegte Anodenwechselspannung über dem Thyratron ab; es fließt kein Anodenstrom, und der Spannungsabfall über dem Lastwiderstand ist gleich Null. Vom Zeitpunkt t_1, bis zum Verlöschen der Röhre bei Absinken der Anodenwechselspannung unter die Brennspannung (t_2), fließt ein im wesentlichen vom Lastwiderstand und der angelegten Anodenspannung bestimmter Anodenstrom,

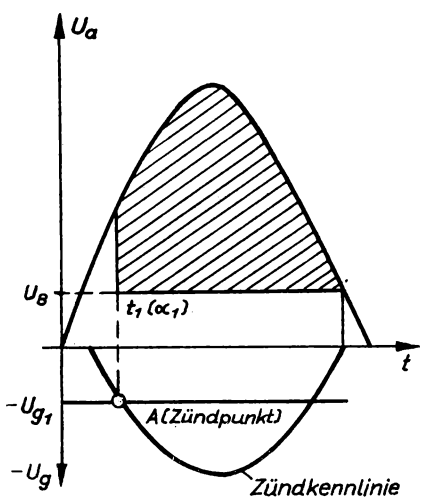


Bild 26a

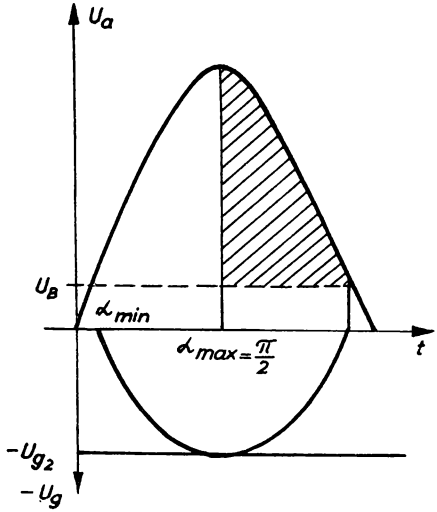


Bild 26b

welcher einen Spannungsabfall an R_L hervorruft, der durch die in Bild 26a schraffierte Fläche gegeben ist. Da man die aufgetragene Anodenspannungshalbwelle auch in 180 elektrische Winkelgrade unterteilen kann, ist es üblich, anstelle der Zündeinsatzzeit t_1, den zugehörigen Zündwinkel α_1 anzugeben. Sie sehen leicht ein, daß man durch eine Vergrößerung der negativen Gitterspannung den Zündwinkel vergrößern und die in R_L umgesetzte Leistung verkleinern kann. Die Grenzen der Beeinflussung des Zündwinkels sind aus Bild 26b ersichtlich. Der minimale Zündwinkel (maximale Leistung an R_L) liegt vor, wenn die Gitterspannung Null wird. α_{min} ist bei gegebener Anodenspannung nur vom geometrischen Aufbau des Thyratrons und seiner Füllung abhängig. Der maximale Zündwinkel liegt bei 90^0, weil für größere negative Gitterspannungen als $-U_{g2}$ die Zündkennlinie durch die Gitterspannungsgerade nicht mehr geschnitten wird und damit auch kein Zündeinsatz erfolgen kann (Thyratron bleibt ständig gelöscht). Für die Praxis ist die untersuchte Schaltung in der Regel unbrauchbar, da die am Lastwiderstand umgesetzte Leistung nicht kontinuierlich bis auf Null herunter gesteuert wer-

den kann. Die nachstehend untersuchten Steuerverfahren weisen diesen Nachteil nicht auf!

Horizontalsteuerung:

Bei der Horizontalsteuerung wird an das Gitter des Thyratrons keine Gleichspannung sondern eine in der Phase gegen die Anodenspannung verschiebbare Wechselspannung gelegt. Das Liniendiagramm dazu ist in dem Bild 27 dargestellt.

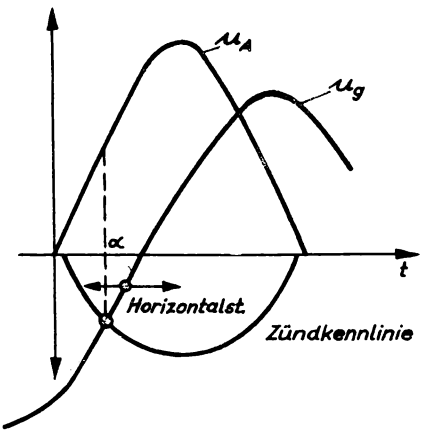


Bild 27

Zu diesem Diagramm ist zu bemerken, daß für Anodenspannung und Gitterspannung verschiedene Maßstäbe zugrundegelegt wurden. Aus dem Bild ist zu ersehen, daß durch Verschiebung der Gitterspannung der Schnittpunkt mit der Zündkennlinie und damit der Zündwinkel selbst, nahezu zwischen 0 und 180° verändert werden kann. Zur Verschiebung der Gitterspannung verwendet man die in Bild 28 dargestellte Phasenbrücke.

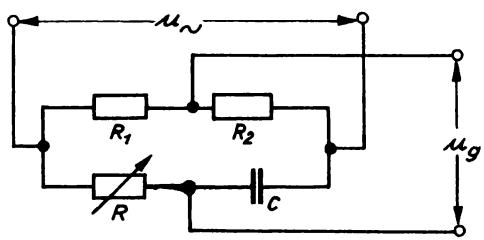


Bild 28

Ihre Wirkungsweise werden Sie in einer Übungsaufgabe selbst untersuchen.
Will man mit der gegebenen Schaltung Zündwinkel in der Nähe von 180° einstellen, so läßt die Genauigkeit stark zu wünschen übrig, weil der Schnittpunkt zwischen Zündkennlinie und Gitterspannungskurve nicht mehr eindeutig definiert ist. Um diesen Nachteil zu beseitigen, steuert man das Gitter des Thyratrons mit Impulsen an, die einer konstanten negativen Gittergleichspannung überlagert sind. Die Phasenlage der Impulse gegenüber der Arbeitswechselspannung ist dabei veränderlich.

Vertikalsteuerung:

Die Wirkungsweise der Vertikalsteuerung ist aus dem Bild 29 ersichtlich. Dem Gitter wird eine veränderbare Gleich-

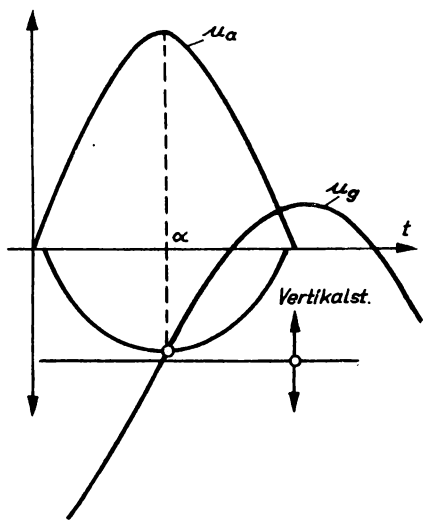


Bild 29

spannung zugeführt, der eine gegen die Anodenwechselspannung konstant um 90° phasenverschobene Wechselspannung überlagert ist. Die zur Gitterspannungserzeugung dienende Phasenbrücke mit Gleichspannungsteil zeigt Ihnen Bild 30. Es ist zu beachten, daß man um ein einwandfreies Arbeiten zu gewährleisten, die Amplitude der Gitterwechselspannung

nicht zu klein wählen darf.

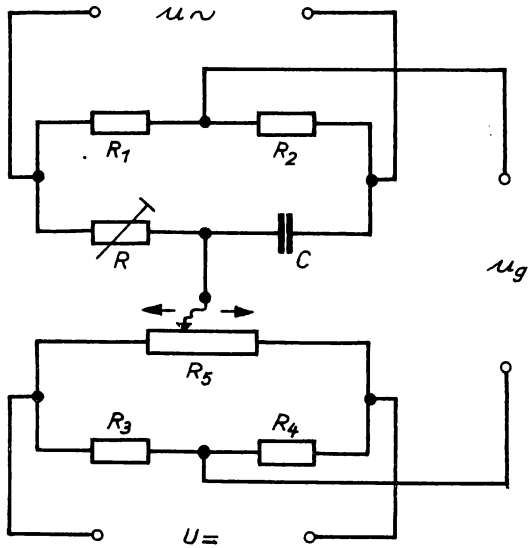
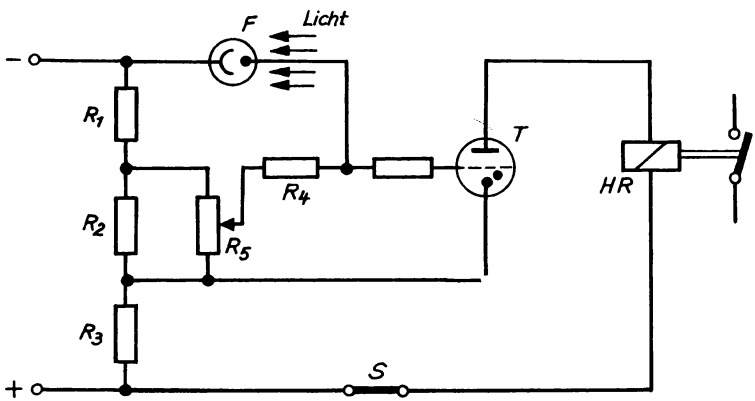


Bild 30

Als Beispiel eines mit einem Thyratron bestückten Verstärkers geben wir in Bild 31 die Schaltung für einen Fotozellenverstärker an, wie er in Raumsicherungsanlagen verwendet wird, wenn bei Unterbrechung des Lichtstrahles zu einer Fotozelle ein Signal ausgelöst werden soll.



$R_1 = 300\ \Omega$
$R_2 = 30\ \Omega$
$R_3 = 500\ \Omega$
$R_4 = 1\ M\Omega$
$R_5 = 10\ k\Omega$

Bild 31

Zum besseren Verständnis der Wirkungsweise der Schaltung sind die Widerstandswerte für die wichtigsten Widerstände der Schaltung eingetragen worden. Der aus den Widerständen R_1, R_2 und R_3 bestehende Spannungsteiler dient der Herstellung der zum Betrieb der Schaltung benötigten Gleichspannungen. Die über den Widerstand R_1 abfallende Spannung stellt die Betriebsspannung für die Fotozelle F dar. Der Widerstand R_3 erzeugt die Spannung für den Anodenkreis, welcher aus dem Thyratron T und dem Hilfsrelais HR besteht. Die am Potentiometer R_5 abgegriffene Spannung dient zur Festlegung des Arbeitspunktes auf der Steuerkennlinie. Bei normalem Auftreffen des Lichtstrahls auf die Fotozelle, ist der vom Fotozellenstrom an R_4 hervorgerufene Spannungsabfall so stark negativ, daß eine Zündung nicht erfolgen kann. Unterbricht man jedoch den Lichtstrahl, so wird der Fotozellenstrom und damit auch der Spannungsabfall an R_4, kleiner. Die Gitterspannung des Thyratrons fällt damit ebenfalls ab, und es kommt zur Zündung der Röhre. Die Folge davon ist ein im Anodenkreis fließender Strom, der das Hilfsrelais HR zum Ansprechen bringt. Die Kontakte dieses Relais können nun Warnvorgänge auslösen. Selbst bei Rückkehr des Lichtstrahles auf die Fotozelle bleiben die Kontakte des Relais in Warnstellung. HR kann nur zum Abfallen gebracht werden, wenn das Thyratron durch Öffnen des Schalters S gelöscht wird. Weitere Anwendungsbeispiele für das Thyratron in der Steuerungs- bzw. Regelungstechnik werden wir Ihnen im Abschnitt 3.1 bringen.

Zusammenfassung zum Abschnitt 2.1.2

Das Thyratron ähnelt in seinem Aufbau einer Hochvakuumtriode. Im Gegensatz zu dieser ist es jedoch mit Quecksilberdampf oder Edelgas gefüllt. Durch diese Gasfüllung erreicht man, daß beim Thyratron nur zwei Betriebszustände möglich sind:

a. Röhre ist gelöscht. In diesem Betriebszustand ist der Widerstand gemessen zwischen Anode und Katode,prak-

tisch unendlich groß.

b. Röhre hat gezündet. Der Widerstand der Röhre ist in diesem Fall sehr klein.

Hauptsächlich werden Thyratrons als gesteuerte Gleichrichter verwendet. Dafür sind grundsätzlich zwei Steuerungsarten vorhanden:

a. Horizontalsteuerung: Dabei wird dem Gitter eine gegen die Anodenwechselspannung phasenverschiebbare Wechselspannung zugeführt. Für hohe Anforderungen wird der Gitterwechselspannung noch eine konstante Gleichspannung überlagert.

b. Vertikalsteuerung: Am Gitter des Thyratrons liegt bei dieser Steuerungsart eine veränderliche Gleichspannung, der eine um 90° gegen die Anodenspannung verschobene Wechselspannung überlagert ist.

Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.2

1. Welche Vorgänge spielen sich im Zündmoment in einem Thyratron ab ?
2. Nennen und beschreiben Sie die verschiedenen Steuerungsarten für Thyrantron !
3. Untersuchen Sie mit den Hilfsmitteln der Grundlagen der Elektrotechnik die in Bild 28 dargestellte Phasenbrücke !

2.1.3 Halbleiterverstärker

Die Halbleiterverstärker besitzen als wichtigstes, die Verstärkung bringendes Bauelement, den Transistor. Den Transistoren wird in der Elektronik sowie in der elektronischen Regelungstechnik heute vielfach der Vorzug gegenüber den Elektronenröhren gegeben. Der Grund dafür liegt in dem um eine Größenordnung geringeren Spannungs- und Leistungsbedarf. Die Transistoren werden auf Grund ihrer speziellen Eigenschaften aber niemals in der Lage sein, die Elektronenröhren vollständig aus der Technik zu verdrängen. Bevor wir Ihnen die Verstärkerwirkung eines

Transistors erklären können, müssen wir uns erst einmal seinen Aufbau ansehen.
Den heute ausschließlich gebräuchlichen Flächentransistor kann man als kleinen dreischichtigen Germaniumkristall betrachten, bei dem die einzelnen Schichten verschiedene Beimengungen aufweisen und an denen je eine Anschlußelektrode angebracht ist.
Nach der Mehrzahl der vorhandenen Ladungsträger unterscheiden wir bei Halbleitern folgende Leitungsformen:

a) p-Leitung (Löcherleitung). Bei dieser Halbleiterschicht überwiegen die positiven Ladungsträger.

b) n-Leitung (Elektronenleitung). Hier sind die negativen Ladungsträger in der Überzahl.

Wir hatten erwähnt, daß die Flächentransistoren aus drei Schichten bestehen. Bei den in der DDR gefertigten werden dabei die beiden äußeren als p-Schichten und die sehr dünne Zwischenschicht als n-Schicht ausgeführt.
Um die Wirkungsweise eines gesamten Transistors verstehen zu können, müssen wir uns nun den Vorgängen an den Grenzschichten zwischen dem p- und n- Germanium zuwenden.
Für die nachstehenden Betrachtungen ist es von Wichtigkeit, daß wir für die p- und n- Schicht gleiche Ladungsträgerkonzentration voraussetzen.
Da die p-Schicht positive und die n-Schicht negative freie Ladungsträger enthält, versuchen diese sich in der Grenzschicht zu neutralisieren. Aus der n-Schicht wandern Elektronen in die p-Schicht, und aus der p-Schicht Löcher in die n-Schicht.

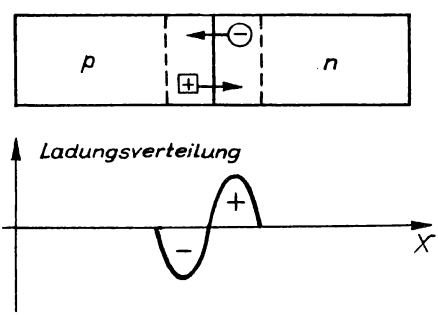
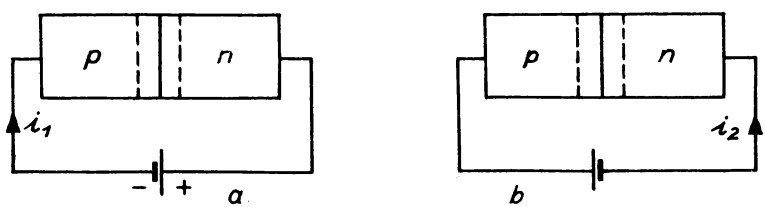


Bild 32

Dadurch ladet sich die Grenzzone zwischen den beiden Schichten auf der p-Seite negativ und auf der n-Seite positiv auf.(Bild 32) Die durch diesen Ladungsträgeraustausch in der Grenzschicht entstandene Spannung wirkt der Diffusion der Ladungsträger entgegen. Durch den beschriebenen Vorgang bildet sich in der Grenzzone eine Potentialstufe heraus, die von außen nicht meßbar ist, weil sich die elektrische Arbeit des Feldes und die Konzentrationsarbeit der Ladungsträger während der Diffusion ausgleichen. Nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes fließt kein Strom zwischen den beiden Schichten. Durch den beschriebenen Austausch von Ladungsträgern in der Grenzzone entsteht dort eine ladungsträgerarme Zwischenschicht, die einem hohen Übergangswiderstand entspricht.

Wir wollen nun untersuchen, welche Vorgänge sich in einem p-n-Kristall abspielen, wenn beide Seiten an die Klemmen einer Spannungsquelle angeschlossen werden. Zuerst soll die p-Seite negatives und die n-Seite positives Potential erhalten (siehe Bild 33a).



$i_2 \gg i_1$ Bild 33a u. b

Durch diese Maßnahme werden auf der p-Seite die noch in der Grenzschicht vorhandenen Löcher und auf der n-Seite die restlichen Elektronen zur Spannungsquelle hin abgesaugt. Die Ladungsträgerkonzentration in der Zwischenschicht verringert sich gegenüber dem spannungslosen Zustand noch mehr, d.h. der Übergangswiderstand der Grenzschicht wird größer. Bei der angegebenen Polung der Spannungsquelle betreiben wir den p-n- Übergang in Sperrichtung und es fließt nur ein sehr geringer Reststrom.

Wird jedoch die p-Seite positiv und die n-Seite negativ durch eine äußere Spannungsquelle vorgespannt, so drückt diese auf der einen Seite Löcher und auf der anderen Elektronen in die Grenzschicht, wodurch der Widerstand des p-n-Überganges sehr stark verringert wird. Es bildet sich ein, gegen den ersten Fall, sehr großer Strom im inneren und äußeren Stromkreis heraus.
In Bild 34 haben wir Ihnen einen Transistor in seiner einfachsten Schaltung dargestellt. Bild 34a zeigt sein Aufbauschema, während in Bild 34b der Transistor durch

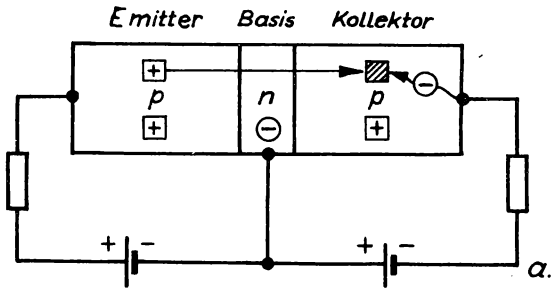


Bild 34a

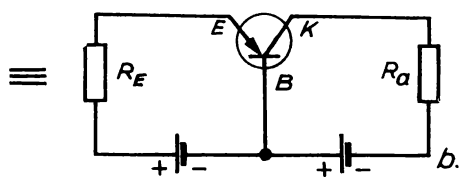


Bild 34b

sein Kurzzeichen symbolisiert wird. Wir erkennen, daß die beiden äußeren p-Schichten als Emitter und Kollektor bezeichnet werden. Die negative Zwischenschicht hat den Namen Basis erhalten. Weil bei dieser Schaltung die Basis sowohl mit einem Pol der Spannungsquelle des Emitterkreises, als auch mit der des Kollektorkreises verbunden ist, bezeichnet man diese Schaltungsart als Basis- Basis-Schaltung (kurz: Basis-Schaltung). Die Vorgänge bei dieser Schaltung an den beiden Grenzschichten und der Verstärkungsvorgang sollen nun im einzelnen überlegungsmäßig untersucht werden:

a. Vorgänge an der Kollektor-Basis-Grenzschicht.
Denken Sie sich die Emitterspannungsquelle aus dem Schaltbild nach Bild 34 herausgenommen, so fließt im Kollektorkreis, wegen der Polung der dort vorhandenen Spannungsquelle in Sperrichtung, nur der sehr geringe Reststrom. Der Übergangswiderstand der Kollektor-Basis-Grenzschicht liegt bei Fehlen der Emitterspannungsquelle in der Größenordnung von 10^5 bis 10^7 Ohm.

b. Vorgänge an der Grenzschicht-Emitterbasis.
Da die äußere Emitterspannungsquelle die Grenzschicht Emitter-Basis in Durchlaßrichtung vorspannt, fließt durch dieselbe, schon bei geringen Emitterspannungen, ein hoher Emitterstrom, der mit steigender Spannung rasch an Größe zunimmt.
Wegen der angegebenen Polarität der Emitterspannungsquelle beträgt der Innenwiderstand der Emitter-Basis-Grenzschicht etwa 100 Ohm.

c. Verstärkungsvorgang bei der Basisschaltung.

Es wurde schon angegeben, daß die Dicke der Basisschicht gegenüber den beiden anderen sehr gering ist. Weiterhin sorgt man bei der Fertigung dafür, daß die Basiselektronenkonzentration gegenüber der Emitterlöcherkonzentration ebenfalls klein ist. Aus den beiden angeführten Gründen wird der durch die Emitterspannung in die Basis injizierte Strom ein Löcherstrom sein, der sich in der Basis selbst nur in ganz geringem Maße rekombinieren kann. Wegen der geringen Dicke der Basis und der kaum stattfindenden Rekombination in derselben, werden die Mehrzahl der aus dem Emitter stammenden Löcher in den Kollektor hineingeweht und rekombinieren sich dort mit Elektronen, die aus der Kollektorspannungsquelle stammen. Durch den beschriebenen Vorgang steigt der Kollektorstrom nahezu auf den Wert des Emitterstroms an. Da der Kollektorstrom aber über den sehr großen Widerstand der Kollektor-Basis-Grenzschicht fließen muß, bewirkt er dort einen sehr

großen Spannungsabfall, während die steuernde Emitterspannung nur klein ist. Wegen des großen Innenwiderstandes des Kollektorkreises kann auch dessen Außenwiderstand hochohmig gewählt werden.

Zusammenfassend können wir folgenden Merksatz formulieren:

Der Transistor in Basisschaltung hat einen großen Spannungsverstärkungsfaktor, weil der Ausgangswiderstand viel größer als der Eingangswiderstand ist, während Ausgangs- und Eingangsstrom nahezu gleich groß sind.

Neben der Basischaltung werden in der Regelungstechnik aber auch Schaltungen mit anderen Eigenschaften benötigt (großer Eingangswiderstand, Stromverstärkungsfaktor größer als 1 usw.). Für diese Zwecke hat man die Emitter-Basis-Schaltung (kurz: Emitterschaltung) und die Kollektor-Basis-Schaltung (kurz: Kollektorschaltung) zur Verfügung. Diese beiden Schaltungen sind im Prinzip in Bild 35a und b dargestellt, während Sie die Eigenschaften aller drei Transistorgrundschaltungen in der Tabelle von Bild 35c zusammengestellt finden.

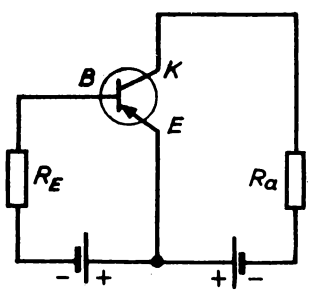


Bild 35a

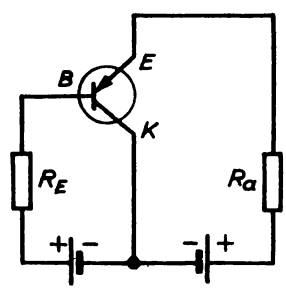


Bild 35b

Wie Sie aus Bild 35c erkennen können, hat die Emitterschaltung für die Regelungstechnik die weitaus günstigsten Eigenschaften. Den prinzipiellen Aufbau eines Wechselstromverstärkers mit RC-Kopplung in Emitterschaltung zeigt Bild 36. Die vom Generator G gelieferte Wechselspannung wird über den Kondensator C_1 in den Basis -

Kenngröße	Emitter-Schaltung	Basis-Schaltung	Kollektor-Schaltung
Eingangswiderstand	mittel	klein	groß
Ausgangswiderstand	mittel	groß	klein
Stromverstärkung	groß	≈ 1	groß
Spannungsverstärkung	mittel	groß	≈ 1
Leistungsverstärkung	groß	mittel	mittel
Grenzfrequenz	niedrig	hoch	niedrig

Bild 35c

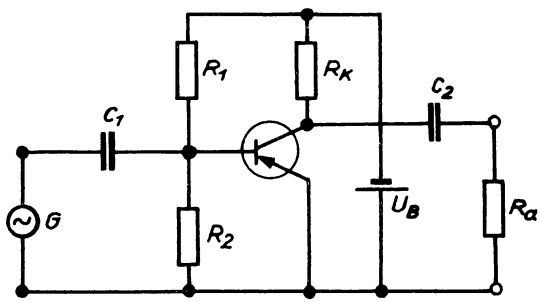


Bild 36

Emitterkreis eingekoppelt. Die strom- und spannungsmäßig verstärkte Schwingung des Generators kann über den Widerstand R_K abgenommen werden und wird über den Kondensator C_2 ausgekoppelt, der die Aufgabe der Abblockung der Kollektorgleichspannung vom Außenwiderstand R_a übernimmt.

Die für diese Schaltung benötigten 2 Spannungen werden von der gleichen Spannungsquelle U_B erzeugt. Die Spannung U_B selbst speist den Emitter-Kollektor-Kreis, während die als Spannungsteilung geschalteten Widerstände R_1 und R_2 die Spannung für den Basis-Emitterkreis erzeugen.
Eine andere Schaltungsmöglichkeit eines Wechselspannungsverstärkers in Emitterschaltung ist in Bild 37 dargestellt. Ihre Wirkungsweise sollen Sie, in einer am Schluß des Abschnitts gestellten Übungsaufgabe, selbst erläutern.
Bereits im Abschnitt 2.1.1 hatten wir Ihnen gesagt, daß in der Regelungstechnik des öfteren Gleichspannungen zu verstärken sind. Ein Gleichspannungsverstärker kann auch mit Transistoren aufgebaut werden. Das Prinzip eines

solchen Verstärkers können Sie aus Bild 38 ersehen.

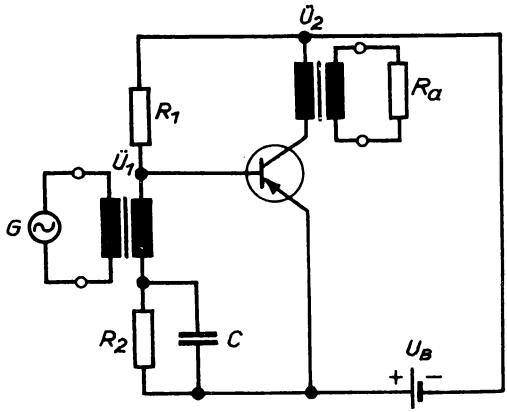


Bild 37

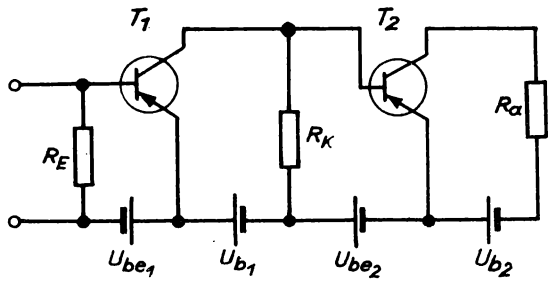


Bild 38

Der Verstärker ist zweistufig und jede einzelne Stufe gemäß der Emittergrundschaltung nach Bild 35c aufgebaut. Bei näherer Betrachtung fällt auf, daß die Spannungsquelle U_{be2} genau entgegengesetzt zu U_{be1} gepolt ist, obwohl sie prinzipiell die gleiche Aufgabe hat. Der Grund dafür liegt darin, daß der am Widerstand R_K abfallende Teil der Spannung U_{be1} den Transistor T_2 übersteuern würde, so daß die Spannung U_{be2} gegengeschaltet ist.

Zusammenfassung zu Abschnitt 2.1.3

Neben den Elektronenröhren stellt der Transistor ein weiteres elektronisches Bauelement mit Verstärkereigenschaf-

ten dar. Während bei den Hochvakuumröhren eine Spannungsverstärkung vorliegt (Eingangsstrom nahezu gleich Null), benötigen die Transistoren auf Grund ihres Wirkungsmechanismus einen Strom im Eingangskreis. Ihre Funktion beruht auf dem Zusammenspiel von 3 Germanium-Halbleiterschichten, die verschieden dotiert sind (p-n-p). Die Eigenschaften der drei möglichen Grundschaltungen sind in Tabelle 35c zusammengestellt. Ähnlich wie auch bei den Hochvakuumröhren kann man mit Transistoren Gleich- und Wechselspannungsverstärker aufbauen. Sie weisen jedoch den Vorteil auf, daß sie keinen Heizstrom benötigen und die Betriebsspannung um eine Größenordnung kleiner ist als die Anodenspannung der Hochvakuumröhren. Als weiterer Vorteil ist die hohe Lebensdauer der Transistoren anzuführen; als Nachteil muß die heute noch geringe Ausgangsleistung genannt werden. Nicht zuletzt wegen ihrer kleinen geometrischen Abmessungen werden sie in der Zukunft immer stärkeren Eingang in die Steuerungs- und Regelungstechnik finden.

Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.1.3

1. Beschreiben Sie den Aufbau eines p-n-p-Flächentransistors.
2. Erläutern Sie den Verstärkungsvorgang eines p-n-p-Transistors in Basisschaltung.
3. Welche Eigenschaften hat die Emittergrundschaltung ?
4. Erklären Sie die Wirkungsweise der Verstärkerschaltung nach Bild 37.

2.2. Magnetische Verstärker

In den letzten Jahren kann man in der Elektrotechnik und besonders in der Steuerungs- und Regelungstechnik einen größeren Einsatz von magnetischen Verstärkern beobachten. Im Laufe der Entwicklung, die bis ins Jahr 1900 zurückreicht, haben sich drei Steuerungsarten für Magnetver-

stärker herausgebildet:

Induktivitätssteuerung,
Stromsteuerung,
Spannungssteuerung.

Die Magnetverstärker werden in der modernen Literatur auch als Transduktoren bezeichnet.

2.2.1 Induktivitätssteuernde magnetische Verstärker

Ein Magnetverstärkerelement kann man als eine Drossel ohne Luftspalt mit minimal 2 Wicklungen auffassen. Die eine Wicklung ist für den Arbeitsstromkreis ausgelegt, d.h. sie liegt mit dem Verbraucher in Reihe an einer Wechselspannung. Die zweite Wickelung wird von einem Steuerstrom (in der Regel Gleichstrom) durchflossen.
Nehmen wir an, daß der Kern der Drossel aus gewöhnlichem Dynamoblech gefertigt sei, so gilt als Beziehung zwischen magnetischer Induktion B und magnetischer Feldstärke H die Magnetisierungskurve I nach Bild 39. Zur Erklärung

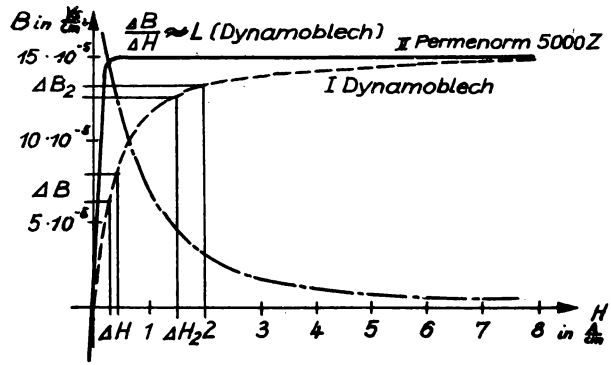


Bild 39

der Wirkungsweise der induktivitätssteuernden Magnetverstärker gehen wir von den beiden Grundformen des Induktionsgesetztes aus:

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{und} \qquad e = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

Durch Gleichsetzung und formale Umstellung erhält man

daraus:

$$L = w \cdot \frac{d\Phi}{di}$$

Durch Einfügung der Beziehungen

$$\Phi = B \cdot A \qquad \text{und} \qquad H = \frac{i \cdot w}{l}$$

finde man

$$L = \frac{w^2 \cdot A}{l} \cdot \frac{d\,B}{d\,H} = C \frac{d\,B}{d\,H}$$

$$L \approx C \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \qquad (1)$$

Wie man aus (1) erkennt, ist die Induktivität der Arbeitswicklung von der Steigung der Magnetisierungskurve im jeweiligen Arbeitspunkt abhängig. Betrachtet man zum Beispiel die in Bild 39 dargestellte Kurve für Dynamoblech, so kann man daraus entnehmen, daß die Induktivität der Drossel im Bereich von etwa $7\,000 \cdot 10^{-8}\ \frac{Vs}{cm^2}$ wesentlich größer ist als die der gleichen Drossel bei etwa $13\,000 \cdot 10^{-8}\ \frac{Vs}{cm^2}$

Nach der Beziehung

$$|\underline{z}| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

bedeutet aber eine Veränderung von L gleichzeitig eine Veränderung des Wechselstromwiderstandes der Arbeitswicklung. Aus dem bisher Gesagten erkennen Sie, daß man den magnetischen Verstärker als veränderlichen Widerstand zu Steuerzwecken einsetzen kann, wenn man den Arbeitspunkt desselben über einen veränderlichen Steuergleichstrom durch Wicklung 2 entsprechend festlegt. (Eine andere Methode zur Festlegung des Arbeitspunktes haben Sie schon bei den Elektronenröhren durch die Anwendung der Gittervorspannung kennengelernt. Bei diesen wird der Arbeitspunkt durch eine Spannung beeinflußt, bei den Transduktoren durch einen Strom.)

Damit sich während einer Halbwelle des Arbeitswechselstromes (Strom durch Steuerobjekt und Arbeitswicklung) die

Induktivität der Arbeitswicklung nicht nennenswert ändert, muß verlangt werden, daß die vom Arbeitsstrom hervorgerufene Feldstärkeänderung ΔH klein gegenüber der Sättigungsfeldstärke des Kernmaterials ist. Daraus resultiert, daß bei der Induktivitätssteuerung nur mit verhältnismäßig kleinen Arbeitsströmen gearbeitet werden kann und damit die am Steuerobjekt umgesetzte Leistung wesentlich unter der Typenleistung der Drossel bleibt (sehr unwirtschaftlich).
Ein weiterer Nachteil ist die für diese Schaltung benötigte Steuerdurchflutung, die sehr hoch ist (Arbeitspunkt muß unter Umständen bis an die Grenze der Sättigung verschoben werden); sie bringt über eine große Induktivität eine hohe Zeitkonstante mit sich.
Als Vorteil der induktivitätssteuernden magnetischen Verstärker nennen wir Ihnen: Die Kurvenform der Speisespannung bleibt nahezu erhalten. Da weiterhin die Stromverstärkungsfaktoren Spitzenwerte von 10000 erreichen können, finden sie als Meßverstärker Anwendung, z.B. zur Verstärkung des von einem Thermoelement gelieferten Stromes.
Wie Sie im folgenden noch erkennen werden, ist für die beiden anderen Steuerungsarten ein Kernmaterial mit starkem Sättigungsknick und möglichst geradlinigem Verlauf im Sättigungsbereich erwünscht. Ferner soll die Sättigungsinduktion möglichst hoch liegen, da von ihr die Durchgangsleistung (Typenleistung) des magnetischen Verstärkers abhängig ist. Um die angestrebte ideale Kennlinie in bester Annäherung zu erhalten, wurden verschiedene Speziallegierungen entwickelt. Wir nennen Ihnen als Beispiel das Permenorm 5000 Z, dessen Magnetisierungskurve in Bild 39 skizziert ist.

Permenorm ist wegen seiner Zusammensetzung hoher Nickelgehalt) und wegen seiner komplizierten Fertigungsmethode (besondere Wärmebehandlung, Auswalzung im Vakuum in dünne Bleche von 0,1 mm Stärke) sehr teuer. Man verwendet es deshalb nur für Typenleistungen bis maximal 500 VA. Für

Verstärker mit höheren Typenleistungen (gebaut nach unseren Unterlagen bis 165 kVA) wird kaltgewalztes siliziumlegiertes Eisenblech mit einer Sättigungsinduktion von etwa 18000 . $10^{-8} \frac{Vs}{cm^2}$

2.2.2 Der stromsteuernde magnetische Verstärker

Ein Magnetverstärkerelement sei entsprechend der Schaltung nach Bild 40 geschaltet. Wir wollen annehmen, daß ein für unsere Zwecke ideales Kernmaterial mit einer Magnetisierungskurve entsprechend Bild 41 vorliege.

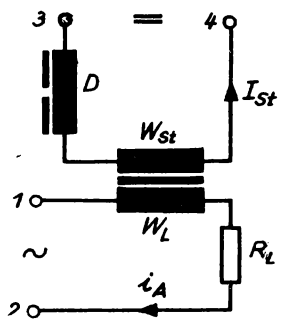


Bild 40

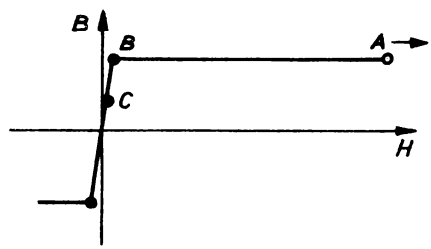


Bild 41

Über die Klemme 1 und 2 wird eine sinusförmige Arbeitswechselspannung an den Kreis gelegt, die so bemessen sei, daß zu keinem Zeitpunkt das Kernmaterial in die Sättigung kommt. Diese ruft einen Strom hervor, der neben der Höhe der Spannung auch noch vom Gesamtwiderstand des Arbeitskreises (Reihenschaltung aus dem komplexen Widerstand der Arbeitswicklung sowie dem ohmschen Widerstand der Last R_L) abhängig ist.

Fließt in der Steuerwicklung kein Strom, so liegt der Arbeitspunkt der Schaltung im Ursprung der Magnetisierungskurve nach Bild 41. Damit hat die Drossel einen großen induktiven Widerstand. Gegenüber diesem sei der ohmsche Widerstand von W_L und ebenfalls R_L klein ! Der im Arbeitskreis der Schaltung fließende Strom kann unter den gemachten Voraussetzungen als Magnetisierungsstrom des

Magnetverstärkerkernes angesprochen werden. Legt man nun an die Klemme 3 und 4 eine Gleichspannung, so bildet sich im Steuerkreis der Steuergleichstrom I_{St} heraus, der den Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskurve infolge Vormagnetisierung verschiebt. Wir stellen uns vor, daß die Steuergleichspannung so bemessen sei, daß sich ein sehr weit rechts liegender Arbeitspunkt in Bild 41 einstellt. Für diesen Punkt ist der induktive Widerstand der Arbeitswicklung gleich Null (Idealisierung). Damit fließt im Arbeitskreis gegenüber dem vorhergehenden Fall ein viel größerer Strom, der nur durch den ohmschen Widerstand von Arbeitswicklung und Belastung begrenzt wird.

Zwischen diesen beiden Grenzfällen (a.Magnetisierungsstrom und b.sehr großer Arbeitsstrom) sind durch entsprechende Wahl des Steuergleichstromes alle Zwischenwerte möglich, wie nachstehend gezeigt wird.
Für unsere nächste Überlegung wollen wir uns den Steuergleichstrom so groß denken, daß sich ein Arbeitspunkt entsprechend Punkt A in Bild 41 einstellt. Zur besseren Übersicht haben wir Ihnen in Bild 42 die Liniendiagramme von Speisespannung, Laststrom und Spannung am Lastwiderstand dargestellt.

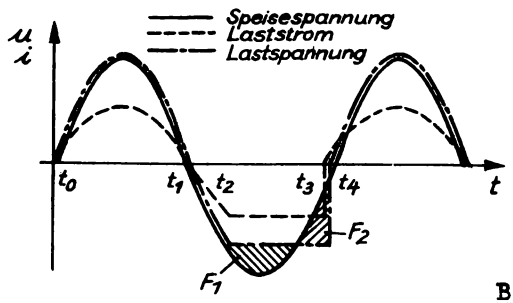


Bild 42

Die nachstehenden Ausführungen beziehen sich auf dieses Bild. - Wird die am Arbeitskreis liegende sinusförmige Spannung positiv, so hat sie einen positiven Arbeitsstrom i_A zur Folge. Die aus diesem resultierende Feldstärke

$$H_A = \frac{i_A \cdot w_A}{l_{Fe}}$$

ist ebenfalls positiv und addiert sich zur Steuerfeldstärke: $H_{ges} = H_{St} + H_A$ für $i_A > 0$

Damit verschiebt sich der Arbeitspunkt während der positiven Halbwelle der Arbeitswechselspannung in Richtung des Pfeiles vom Punkt A aus. Das heißt, während der ganzen positiven Halbwelle ist der magnetische Verstärker gesättigt, und an der Arbeitswicklung tritt praktisch nur der sehr kleine durch R_{W_L} hervorgerufene Spannungsabfall auf. Zum Zeitpunkt t_1 liegt der Arbeitspunkt wieder im Punkt A. In diesem Moment kehrt die Arbeitswechselspannung ihre Richtung um und wird negativ. Nunmehr subtrahieren sich die magnetischen Feldstärken

$$H_{ges} = H_{St} - H_A \quad \text{für} \quad i_A < 0$$

wodurch sich der Arbeitspunkt von A in Richtung B verschiebt. B wird nach der Zeit t_2 erreicht.
Bisher galt für den Arbeitskreis wegen

$$L = C \cdot \frac{dB}{dH} = 0 \quad \text{die Beziehung} \quad u_A = i_A(R_L + R_{W_L})$$

Vom Punkt B ab ist aber wegen der nunmehr vorhandenen Steigung der Magnetisierungskurve

$$L = C \cdot \frac{dB}{dH} \neq 0$$

Daraus ergibt sich die Spannung des Arbeitskreises:

$$u_A = i_A (R_L + R_{W_L}) + W_L \frac{d\Phi}{dt} = i_A (R_L + R_{W_L}) + L \cdot \frac{di_A}{dt}$$

Aus der Magnetisierungskurve erkennen wir, daß vom Punkt B an jede weitere Stromänderung mit einer Flußänderung verknüpft sein muß. Um diese Flußänderung zu ermöglichen, muß an der Arbeitswicklung entsprechend den nachstehenden Gleichungen eine bestimmte Zeit lang eine Spannung abgefallen sein:

$$u_{W_L} = W_L \cdot \frac{d\Phi}{dt} \longrightarrow \Delta\Phi = \frac{1}{W_L} \int_{t_m}^{t_n} u_{W_L} \cdot dt$$

Vom Zeitpunkt t_2 ab steigt der Strom nun noch sehr wenig an (hoher induktiver Widerstand von W_L), damit nimmt der Spannungsabfall an R_L nur noch wenig zu (in den Kurven nicht mehr darstellbar), und die Differenz zwischen ihm und der Speisespannung liegt an der Arbeitswicklung. Die schraffierte Fläche ist dabei gleich dem Spannungsintegral:

$$\Delta\Phi = \frac{1}{w_L}\int_{t_2}^{t_3}[u_A - i_L(R_L + R_{w_L})]dt$$

$\Delta\Phi$ ändert sich bis zum Zeitpunkt t_3. In diesem Moment ist der Punkt C erreicht und der Momentanwert der Speisespannung gleich dem Momentanwert des Spannungsabfalles an der Last. Die Speisespannung fällt entsprechend der Sinuslinie weiter!
Jede Stromänderung muß aber wieder (siehe Magnetisierungskurve) mit einer Flußänderung verknüpft sein. Jetzt handelt es sich aber um eine Flußänderung in der Form, daß in der Arbeitswicklung eine Spannung induziert wird, welche nach dem Lenzschen Gesetz so gerichtet ist, daß sie sich zu der angelegten Speisespannung addiert. Die Spannung an der Last wird als Folge davon noch so lange konstant bleiben, bis die Spannungszeitfläche F_2 die Größe von F_1 erreicht hat (Verlustfreiheit vorausgesetzt). Ist das der Fall, so springen Spannungen an der Last und Arbeitsstrom wieder auf den Wert, der durch die Speisespannung und Lastwiderstand festgelegt ist. Strom und Lastspannung haben nun bis zum Ende der negativen Halbwelle wieder sinusförmigen Verlauf.
Sie erkennen leicht, daß durch eine Verkleinerung des Steuerstromes auch der Effektivwert des durch den Arbeitswiderstand fließenden Stromes kleiner wird, während er sich bei Vergrößerung des Steuerstromes vergrößert. Eine Erhöhung des Arbeitsstromes ist natürlich nur bis zur vollständigen Ausnutzung der gesamten negativen Halbwelle möglich, eine Verkleinerung nur bis zur vollständigen

Löschung derselben. (Bei einem Steuerstrom, der den Arbeitspunkt in den Punkt B legt, fließt während der gesamten positiven Halbwelle der Strom, der durch Speisespannung und Lastwiderstand bestimmt wird.)
Die Drossel D im Steuerkreis des Bildes 40 hat die Aufgabe, transformatorische Wechselströme, die ihren Ursprung in der Arbeitswicklung haben, zu unterdrücken.
Für praktische Schaltungen ist es wünschenswert, beide Halbwellen zu beeinflussen. Zu diesem Zweck schaltet man 2 Verstärkerdrosseln in Reihe, Bild 43 .

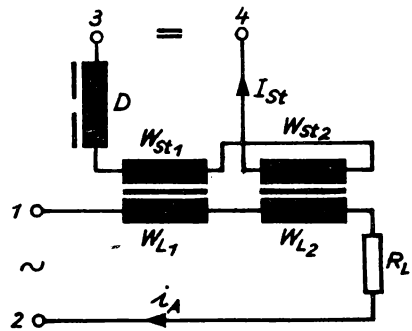


Bild 43

Die eine der beiden beeinflußt dabei die positive und die andere die negative Halbwelle. In diesem Fall ist die Drossel D noch zur Unterdrückung der Oberwellenströme nötig (die durch die Grundwelle induzierten Spannungen heben sich auf). Für diese Schaltung ist der Verlauf des Arbeitsstromes in den Bildern 44a bis c dargestellt.

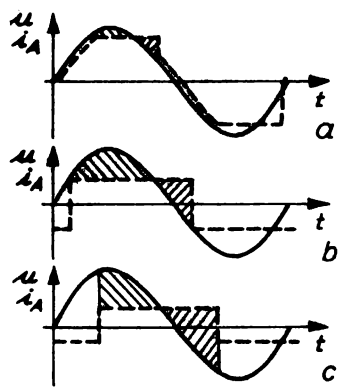


Bild 44 a - c

Interessant und für die praktische Anwendung der Schaltung wesentlich sind die Aussteuerungen nach b und c. In diesen Fällen wird der Strom zu keinem Zeitpunkt mehr durch Speisespannung und Lastwiderstand bestimmt. Er ist nur noch vom Steuerstrom abhängig, und die Schaltung hat echte Stromwandlereigenschaften, die ihr auch den Namen gegeben haben. Es ist hier gleichgültig, ob die benötigte Steuerfeldstärke durch kleine Ströme und große Windungszahlen oder große Ströme und kleine Windungszahlen aufgebracht wird. Im letzten Fall kann man mit der Schaltung hohe Gleichströme bei gleichzeitiger Trennung von Arbeitskreis und Meßkreis messen (Bahnbetrieb).
Eine entsprechende Grundschaltung ist in Bild 45 dargestellt.

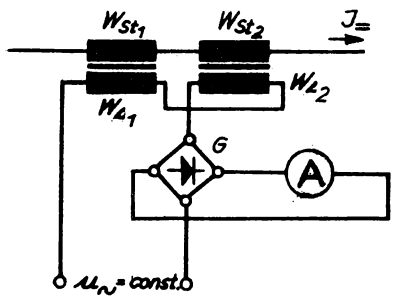


Bild 45

Die Steuerwicklungen (W_{St1} und W_{St2}), die für diesen Zweck aus wenigen Windungen dicken Drahtes oder gar nur aus einem Stück Sammelschiene bestehen, sind in Reihe geschaltet und beeinflussen den im Arbeitskreis fließenden Wechselstrom. Dieser wird in der Gleichrichterschaltung G gleichgerichtet und über den Strommesser A geleitet. Kompensations- und Siebeinrichtungen wurden wegen der besseren Übersicht in dieser Skizze nicht berücksichtigt.

Um den stromsteuernden Magnetverstärker praktisch einsetzen zu können, müssen Sie noch seine Kennlinien kennen lernen. Das Bild 46 zeigt die Steuerkennlinie. Bei dieser ist I_a als Funktion von I_{St} mit R_L als Parameter aufgetragen. Wie Sie beim Studium der vorstehend beschrie-

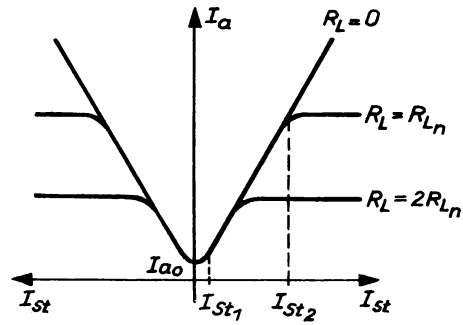


Bild 46

benen Wirkungsweise erkannt haben, tritt bei $I_{St} = 0$ der kleinste Arbeitsstrom (I_{ao}) auf, weil in diesem Fall der Arbeitspunkt während der gesamten Halbwelle der Speisespannung den steilen Teil der Magnetisierungskurve nicht verläßt. Die Größe von I_{ao} hängt von der Güte des Kernmaterials und von den Luftspalteinflüssen ab.
Setzen wir $R_L = R_{Ln}$ (R_{Ln} = Nennlastwiderstand) voraus, so besteht im Bereich von I_{St1} bis I_{St2} eine lineare Beziehung zwischen I_a und I_{St}. In diesem Bereich, der den Liniendiagrammen Bild 44 b und c entspricht, arbeitet der in Bild 45 dargestellte Gleichstromwandler. Wird I_{St} größer als I_{St2}, so sind beide Halbwellen voll ausgesteuert, und eine Vergrößerung des Arbeitsstromes durch Verändern des Steuerstromes ist nicht mehr möglich. In diesem Bereich wird I_a nur durch die Größe von R_L und die Speisespannung bestimmt. Für negative Steuerströme ergeben sich spiegelsymmetrische Kurven, weil die beiden Magnetverstärkerelemente nur ihre Zuständigkeit für die positive und negative Halbwelle vertauschen.

Die Abhängigkeit der Spannung über dem Lastwiderstand vom Arbeitsstrom ist in Bild 47 gezeigt. Parameter dieser Kurvenschar ist der Steuerstrom. Weiterhin sind in dieses Diagramm die Widerstandsgeraden für verschiedene Lastwiderstände eingetragen. Betrachtet man die Kurve für I_{St2}, so sieht man, daß der Lastwiderstand von 0,5 R_{Ln} bis auf 2 R_{Ln} geändert werden kann, ohne daß dadurch der Arbeitsstrom nennenswert beeinflußt wird.

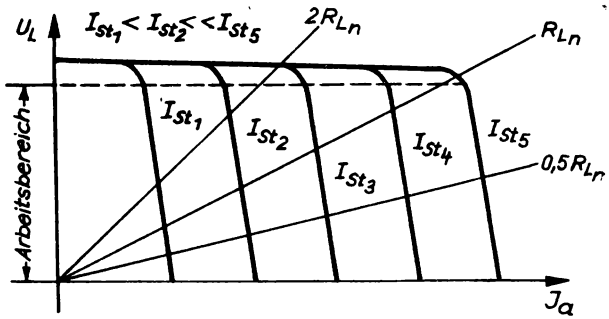


Bild 47

Wie Sie aus Bild 47 erkennen, ist bei der untersuchten Schaltung der Arbeitsstrom im Arbeitsbereich nahezu unabhängig vom Lastwiderstand, weshalb die Steuerungsart auch als Strombegrenzungssteuerung oder kurz Stromsteuerung bezeichnet wird.

Abschließend möchten wir Sie noch darauf hinweisen, daß auch andere stromsteuernde Schaltungen bekannt sind. Diese erhält man z.B. durch Weglassen der Drossel im Steuerkreis nach Bild 48 bzw. durch Parallelschaltung der beiden Transduktorenelemente nach Bild 49.

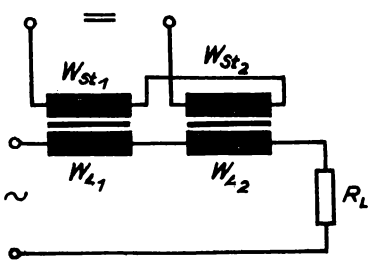


Bild 48

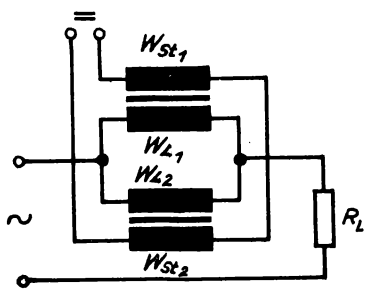


Bild 49

Die Steuerkennlinien und die I_a-U_L-Kennlinien entsprechen den in Bild 46 und 47 gezeichneten. Ein Liniendiagramm des Arbeitsstromes für eine bestimmte Steuerspannung ist in Bild 50 dargestellt. Die Erklärung für die Funktion dieser beiden Schaltungen bitten wir bei Bedarf der im Literaturverzeichnis angegebenen Spezialliteratur zu entnehmen.

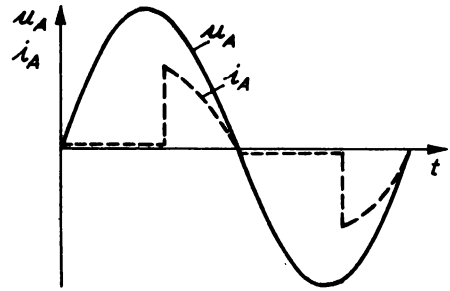


Bild 50

2.2.3 Der spannungssteuernde magnetische Verstärker

Bild 51 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer spannungssteuernden Magnetverstärkereinheit. Eine Veränderung gegenüber dem stromsteuernden magnetischen Verstärker besteht im Prinzip nur in dem zusätzlich im Arbeitskreis

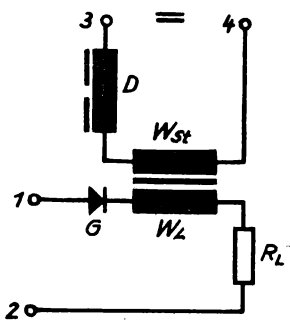


Bild 51

liegenden Gleichrichterventil G. Dieses bewirkt, daß im Arbeitskreis dieser Schaltung nur ein pulsierender Gleichstrom fließen kann.

Zur Erklärung der Funktion eines spannungssteuernden magnetischen Verstärkers betrachten wir zuerst einmal die Schaltung Bild 51 aber o h n e Gleichrichter ! Zur Vereinfachung der Betrachtungen machen wir folgende Voraussetzungen:

a) Das Kernmaterial des Transduktors sei ideal, d.h. es habe eine Kennlinie nach Bild 52 a.

b) Der Steuergleichstrom sei gleich Null.

c) Die Eingangswechselspannung

$$u_A = \sqrt{2} \cdot U_A \cdot \sin \omega t$$

werde nur so groß gewählt, daß der Kern während der gesamten Halbwelle nicht gesättigt wird. Daraus resultiert, daß im Arbeitskreis nur der sehr geringe Magnetisierungsstrom fließt.

d) Der ohmsche Widerstand der Arbeitswicklung des Magnetverstärkers sei klein gegenüber dem Wirkwiderstand der Last, so daß er vernachlässigt werden kann.

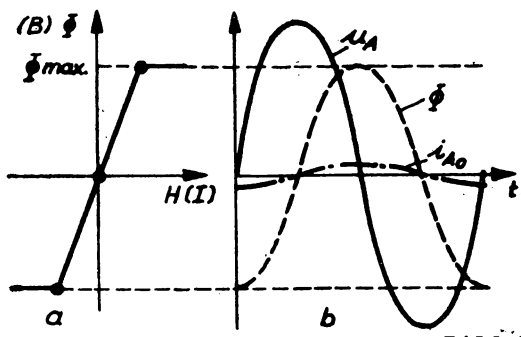


Bild 52 a u.b

Unter diesen Voraussetzungen ist der induktive Widerstand der Arbeitswicklung ωL_A sehr groß, d.h. an ihm fällt praktisch die gesamte Arbeitswechselspannung ab.

$$u_A = \bar{w}_L \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \sqrt{2} \cdot U_A \cdot \sin \omega t$$

Daraus ergibt sich durch Integration

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} \cdot U_A}{\bar{w}_L} \int \sin \omega t \cdot dt$$

$$\Phi = \frac{-\sqrt{2} \cdot U_A}{\omega \cdot \bar{w}_L} \cdot \cos \omega t + C \qquad (2)$$

die Integrationskonstante C wird zu Null, wenn der Einschwingvorgang abgeklungen ist. Der Faktor

$$\frac{\sqrt{2} \cdot U_A}{\omega \cdot w_L} = \Phi_{max}$$

stellt den maximal auftretenden Fluß dar.
Nunmehr fügen wir in Gedanken den Gleichrichter in den Arbeitskreis ein. Dabei anullieren wir die oben gemachte Voraussetzung c und verlangen dafür, daß die Gleichrichterkennlinie ideal sei. Durch den Gleichrichter erreicht man, daß die Arbeitswechselspannung zu Beginn jeder positiven Halbwelle erneut eingeschaltet wird, während für die Zeitdauer der negativen Halbwelle die Spannung am Arbeitskreis gleich Null ist. Der Fluß kann aber zu Beginn der positiven Halbwelle nicht sofort auf den Wert $-\Phi_{max}$ springen, wie ihn die Gleichung (2) für den eingeschwungenen Zustand vorschreibt. Man muß also bei Verwendung eines Gleichrichters die Konstante C berücksichtigen und dieselbe wie nachstehend aus den Anfangsbedingungen bestimmen:

$$t = 0 \quad ; \quad \Phi = 0$$

$$0 = -\frac{\sqrt{2} \cdot U_A}{w_L \cdot \omega} \cdot \cos 0 + C$$

$$C = \frac{\sqrt{2} \cdot U_A}{w_L \cdot \omega}$$

Damit wirkt:

$$\Phi = -\frac{\sqrt{2} \cdot U_A}{w_L \cdot \omega} \cdot \cos \omega t + \frac{\sqrt{2} \cdot U_A}{w_L \cdot \omega}$$

$$\Phi = \Phi_{max} (1 - \cos \omega t) \qquad (3)$$

Die vorstehende Gleichung (3) gilt nur für den Bereich $\omega t = 0$ bis $\omega t = \pi/2$. Setzt man nämlich $\pi/2$ in die Gleichung 2 ein, so erhält man

$$\Phi = \Phi_{max}$$

Dies ist aber der maximal mögliche Fluß, da an diesem Punkt das Kernmaterial in die Sättigung kommt und der Fluß damit nicht weiter ansteigen kann.
Betrachten wir die elektrischen Verhältnisse während einer positiven und negativen Halbwelle im Zusammenhang an Hand des Bildes 53.

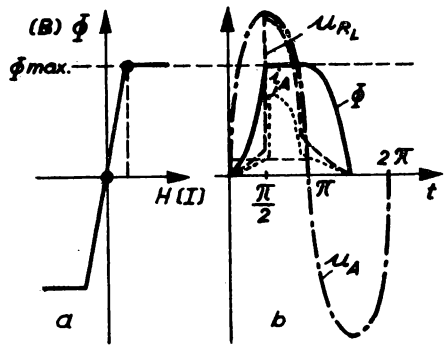


Bild 53 a u.b

Bereich 0 bis $\pi/2$:

Der magnetische Fluß steigt nach der Funktion

$$\Phi = \Phi_{max} \quad (1 - \cos \omega t)$$

an und erreicht seinen Maximalwert bei $\omega t = \frac{\pi}{2}$.
Während dieser Zeit fließt im Arbeitskreis nur der kleine langsam ansteigende Magnetisierungsstrom. Daraus ergibt sich, daß der Spannungsabfall an R_L nur gering ist, während der größte Teil der angelegten Arbeitswechselspannung an W_L abfällt.

Bereich $\pi/2$ bis π :

Der Fluß ist in diesem Bereich konstant, da auf Grund der Eigenschaften des Kernmaterials keine Flußänderung mehr möglich ist. Damit ergibt sich aus dem Induktionsgesetz

$$u_{W_L} = w_L \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

daß an der Arbeitswicklung keine Spannung abfallen kann. Der gesamte Spannungsabfall liegt damit an $R_L \cdot u_{R_L}$ und

i_A verlaufen sinusförmig. Unmittelbar vor dem Zeitpunkt π ist i_A soweit abgesunken, daß das Kernmaterial in den ungesättigten Bereich übergehen kann.

Bereich π bis $3/2\ \pi$:

In diesem Bereich wird die im Kern gespeicherte magnetische Energie wieder abgegeben, so daß trotz negativer Arbeitsspannung ein positiver Arbeitsstrom fließt. Im Bereich π bis $3/2\ \pi$ nimmt der Fluß nach Gleichung (2) ab, und er hat am Punkt $3/2\ \pi$ den Wert Null erreicht.

Bereich $3/2\ \pi$ bis $2\ \pi$:

Hier sperrt der Gleichrichter, so daß die an der Last liegende Spannung und der Arbeitsstrom gleich Null sind.

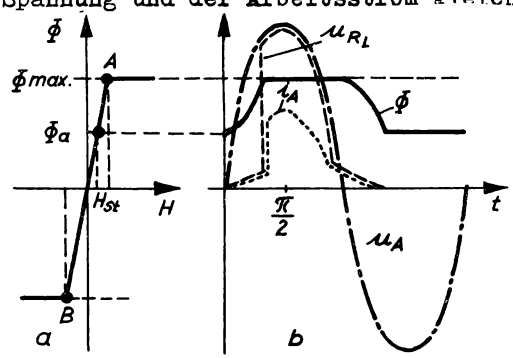


Bild 54 a u.b

Nunmehr lassen wir die Voraussetzung b fallen und schicken den Steuerstrom I_{St1} durch die Steuerwicklung. Dieser ruft im Kernmaterial den Fluß Φ_a hervor. Das bedeutet aber, daß die Anfangsbedingungen jetzt lauten:

$$t = 0 \quad ; \quad \Phi = \Phi_a$$

Ist der Anfangsfluß Φ_a größer als Null (siehe Bild 54), so erreicht der Fluß über die Funktion

$$\Phi = \Phi_a + \Phi_{max} \ (1 - \cos \omega t)$$

seinen Maximalwert, wie Sie durch einfache Rechnung selbst nachweisen können. Der Maximalwert wird um so früher erreicht werden, je größer der Anfangsfluß Φ_a ist. Über

diese Überlegung erkennt man, daß die während einer Halbwelle an R_L liegende Spannung vom Anfangsfluß und damit vom Steuerstrom abhängig ist.

Ist die Vormagnetisierung und damit der Anfangsfluß, bezogen auf den vom positiven Arbeitsstrom hervorgerufenen Fluß, positiv, d.h. liegt der Arbeitspunkt in Bild 54 im Bereich zwischen Null und A, so kann der Beginn des Spannungsabfalls an R_L zwischen $\pi/2$ und Null eingestellt werden.
Bei negativer Vormagnetisierung, d.h. Arbeitspunkt zwischen Null und B ist eine Beeinflussung zwischen $\pi/2$ und π möglich.
Aus Bild 54 ist zu ersehen, daß mit einem spannungssteuernden Magnetverstärkerelement genau wie bei den stromsteuernden Magnetverstärker auch nur eine Halbwelle beeinflußt werden kann. In praktischen Fällen ist man jedoch bestrebt, die Steuerwirkung auf beide Halbwellen auszudehnen.
Dazu schaltet man entsprechend Bild 55 zwei Transduktorelemente parallel, deren Steuerwicklungen gegensinnig vom Steuergleichstrom durchflossen werden, und deren Gleichrichterventile entgegengesetzt gepolt sind.

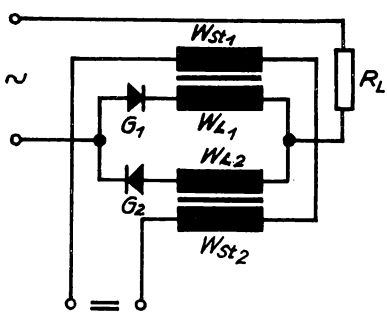


Bild 55

Eine Reihenschaltung von zwei spannungssteuernden Transduktorelementen ist zur Beeinflussung beider Halbwellen nicht möglich, weil in diesem Fall die Schaltung in beiden Richtungen durch die zwei gegengepolten Gleichrichter gesperrt würde.

Die Steuerkennlinie des spannungssteuernden Magnetverstärkers nach Bild 55 ist aus Bild 56 ersichtlich. Der rechte

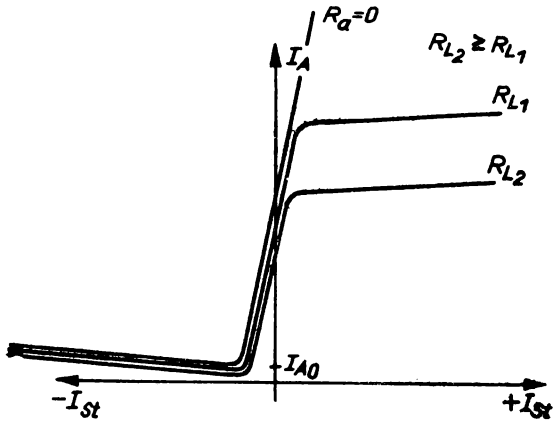


Bild 56

Ast dieser Kennlinie ist wesentlich steiler als die Steuerkennlinie bei stromsteuernden Magnetverstärkern, weil bei der Schaltung nach Bild 55 der Arbeitspunkt nur im steilen Teil der Magnetisierungskurve festgelegt wird, bei den stromsteuernden dagegen muß durch eine hohe Steuerfeldstärke der Arbeitspunkt weit in den Sättigungsast gedrückt werden. Daraus ergibt sich, daß der Leistungsverstärkungsfaktor bei Stromsteuerung viel kleiner ist als bei Spannungssteuerung. Richtwerte:

1. Leistungsverstärkung bei Stromsteuerung (Typenleistung 50 VA bis 20 k VA) = 5 bis 300
2. Leistungsverstärkung bei Spannungssteuerung (Kernmaterial: Permenorm; Typenleistung 10 bis 500 VA) = 10^5 bis 10^6
3. Leistungsverstärkung bei Spannungssteuerung (Kernmaterial: kaltgewalztes, siliziumlegiertes Blech; Typenleistung 100 VA bis 20 k VA) = 10^3 bis 10^5
4. Leistungsverstärkung bei Spannungssteuerung (Kernmaterial: warmgewalztes, siliziumlegiertes Eisenblech; Typenleistung 50 VA bis 10 k VA) = 200 bis 10^4

Aus der in Bild 57 dargestellten Strom-Spannungskennlinie erkennen Sie, daß die Spannung im Arbeitsbereich unabhängig vom Strom, auch weitgehend unabhängig vom Lastwiderstand ist und nur durch den Steuerstrom festgelegt wird.

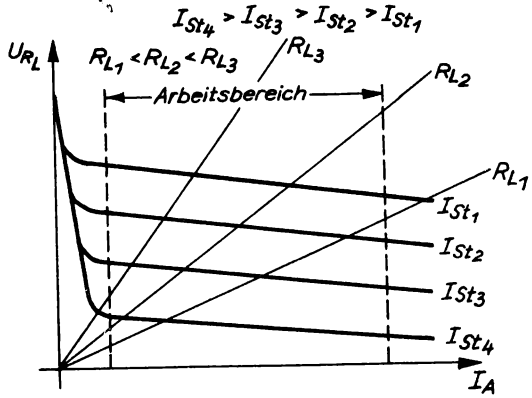


Bild 57

Nachstehend geben wir Ihnen zwei Anwendungsbeispiele für spannungssteuernde Magnetverstärker:

a) Beleuchtungssteuerung für Bühnenzwecke:
Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit kommt man heute in der Beleuchtungstechnik von Stellwiderständen und Stelltransformatoren immer mehr ab und setzt als Stellorgane Magnetverstärker ein, (Bild 58).

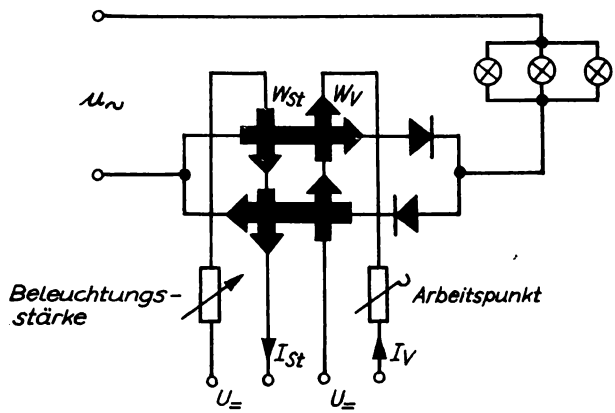


Bild 58

Zum besseren Verständnis der Wirkungsweise der Schal-

tung sind Steuer- und Arbeitswicklungen mit Pfeilen versehen, die ihre Wicklungsrichtung angeben sollen.

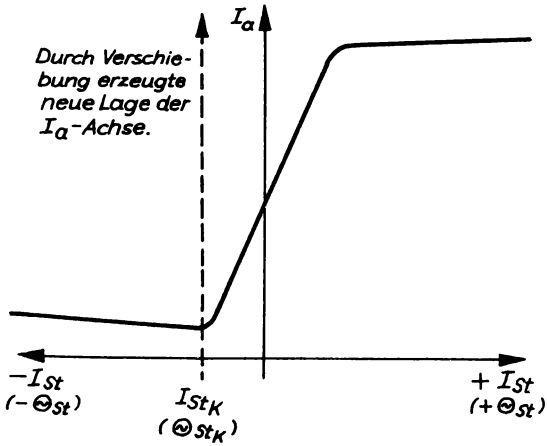


Bild 59

Aus der Steuerkennlinie (Bild 59) ist zu ersehen, daß man, um die Lampen von größter auf kleinste Helligkeit zu steuern, den Steuerstrom in seiner Richtung umkehren muß. Um diesen Schaltvorgang zu umgehen, kann man eine zweite Steuerwicklung (W_v) zur Verschiebung der Kennlinie einsetzen. Dadurch soll erreicht werden, daß beim Steuerstrom 0 auch der kleinste Arbeitsstrom fließt. Wie man sich aus Bild 59 leicht ableiten kann, gilt für den Verschiebungsstrom I_V:

$$\Theta_{St_K} = I_{St_K} \cdot w_{st} = \Theta_V = I_V \cdot w_v$$

$$I_V = I_{St_K} \cdot \frac{w_{st}}{w_v}$$

b) Drehzahlsteuerung eines Gleichstromnebenschlußmotors

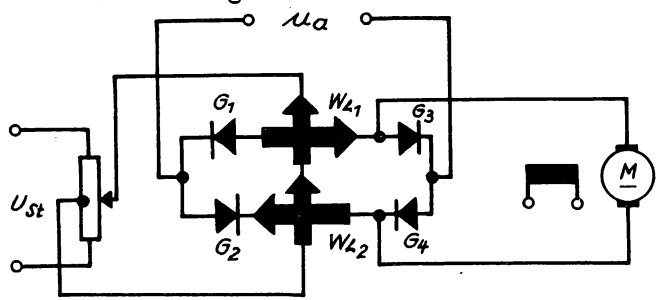


Bild 60

durch Beeinflussung der Ankerspannung:
Um den Steuerstrom sowohl positive als auch negative Werte annehmen zu lassen, ist der Spannungsteiler für die Steuerspannung mit Mittelanzapfung versehen.

Da der Motor Gleichstrom benötigt, würde man bei oberflächlicher Planung für diese Schaltung 6 Gleichrichter vorsehen (2 Stück als Selbstsättigungsgleichrichter in Reihe mit den Arbeitswicklungen und 4 Stück zur Gleichrichtung des Arbeitsstromes in Graetz-Schaltung). Eine Kunstschaltung, wie sie in Bild 60 gezeigt ist, ermöglicht die Einsparung von 2 Gleichrichtern.
Da der Transduktor im Ankerkreis wie ein Vorwiderstand wirkt, zeigt der Motor in dieser Schaltung ein sehr weiches Drehzahlverhalten, (d.h. die Drehzahl ist sehr stark belastungsfähig). Ist das unerwünscht, so geht man zu einer Drehzahlregelung über.

Zusammenfassung zum Abschnitt 2.2

Als Verstärkerelemente werden in der Steuerungs- und Regelungstechnik häufig Magnetverstärker eingesetzt. Ihre Vorteile gegenüber anderen elektrischen Verstärkern sind:
a) Keine bewegten mechanischen Teile (wie zum Beispiel bei den Elektromaschinenverstärkern).
b) Relative Unempfindlichkeit gegen Schlag und Stoß.
Die drei möglichen Schaltungsarten:
a) spannungssteuernde Schaltung,
b) stromsteuernde Schaltung und
c) Induktivitätsschaltung
haben ganz spezielle elektrische Eigenschaften. Diese sind in der Lösungstabelle zu der Wiederholungsfrage 1 dieses Abschnittes zusammengestellt. Bei der Auswahl der richtigen Steuerungsart ist es möglich, nahezu alle in der elektrischen Steuerungs- und Regelungstechnik auftretenden Verstärkerprobleme mit magnetischen Verstärkern zu lösen.

Wiederholungsfragen zum Abschnitt 2.2

1. Stellen Sie Schaltungen, Kennlinien, Verstärkungsfaktoren und Anwendungsbeispiele für die drei Magnetverstärkerschaltungen in einer Tabelle übersichtlich zusammen.

2. Erläutern Sie die Wirkungsweise der in Bild 60 dargestellten Drehzahlsteuerung.
   Untersuchen Sie besonders durch entsprechende Skizzen
   a) ob durch den Motoranker der Strom immer nur in einer Richtung fließt,
   b) ob während jeder Halbwelle nur eine Arbeitswicklung vom Strom durchflossen wird ?

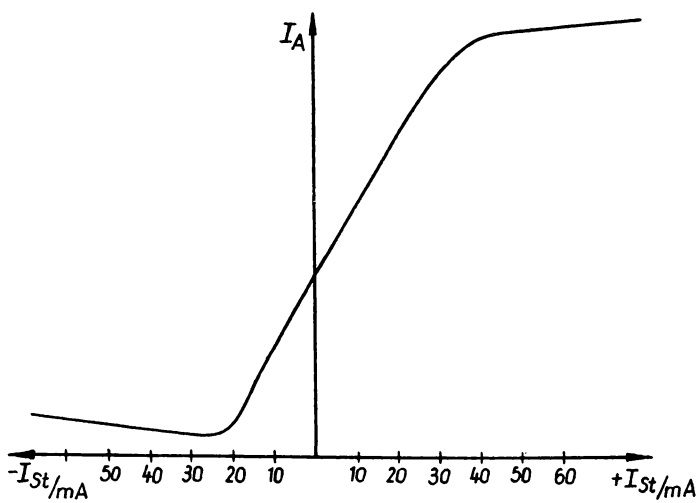


Bild 61

3. Für einen spannungssteuernden Magnetverstärker wurde mit einer Steuerwicklung w_{St1} = 1000 Windungen die in Bild 61 dargestellte Steuerkennlinie aufgenommen. Wie groß muß der durch eine 2. Steuerwicklung mit w_{St2}= 300 Windungen geschickte Strom eingestellt werden, wenn durch diese Maßnahme die gesamte Kennlinie

a) nur durch positive und

b) nur durch negative Steuerströme voll ausgesteuert werden soll ?

2.3. Elektromaschinenverstärker

Die Elektromaschinenverstärker können auf Grund ihrer Wirkungsweise in zwei Gruppen eingeteilt werden. Je nachdem, ob für die Verstärkerwirkung innerhalb der Maschinen nur das magnetische Längsfeld (in Richtung der Erregerwicklung wirkend und von dieser hervorgerufen) oder zusätzlich auch das Querfeld (erzeugt durch den Stromfluß in der Ankerwicklung) ausgenutzt wird, unterscheidet man:

Längsfeldmaschinenverstärker und
Querfeldmaschinenverstärker.

2.3.1 Längsfeldmaschinenverstärker

2.3.1.1 Gleichstromnebenschlußgeneratoren

Der Aufbau und die Wirkungsweise eines fremderregten Gleichstromnebenschlußgenerators ist Ihnen geläufig. Wenig bekannt ist jedoch, daß man einen solchen Generator, wie er z.B. in Bild 62 skizziert ist, auch unter bestimmten Voraussetzungen als Verstärker einsetzen kann.

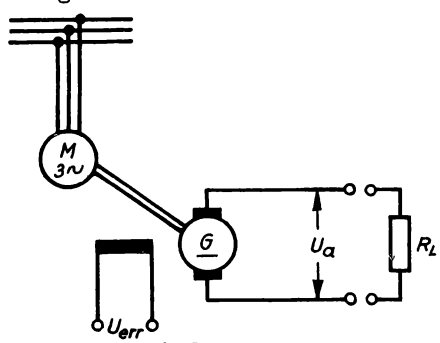


Bild 62

Diese Voraussetzungen sind:

1. Der Generator muß mit konstanter Drehzahl angetrieben werden.

2. Um einen möglichst linearen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung zu erreichen, muß im linearen Teil der Magnetisierungskurve gearbeitet werden.
3. Der Belastungswiderstand des Generators soll um ein Vielfaches größer sein als sein Innenwiderstand.

Unter diesen Einschränkungen gelten, ausgehend von der Grundgleichung, für elektrische Maschinen,

$$E = C_E \cdot \Phi \cdot n$$

folgende Zusammenhänge:

$$E = C_1 \cdot \Phi \quad ; \quad C_1 = C_E \cdot n$$

Mit $\Phi = C_2 \cdot I_{err}$ (nach Voraussetzung 2)

$$E = C_1 \cdot C_2 \cdot I_{err}$$

und mit $R_i = 0$ (nach Voraussetzung 3)

$$U_a = C_1 \cdot C_2 \cdot I_{err}$$

$$U_a = C_3 \cdot I_{err}$$

Bei einem ohmschen Widerstand der Erregerwicklung gleich R_{err} ergibt sich daraus

$$U_a = k_U \cdot U_{err} \quad ; \quad k_U = \frac{C_3}{R_{err}}$$

Darin ist k_U der Spannungsverstärkungsfaktor des untersuchten "Gleichstromnebenschluß-Generator-Verstärkers". Neben dem Spannungsverstärkungsfaktor ist für die Regelungstechnik auch der Leistungsverstärkungsfaktor von Bedeutung. Unter den gemachten Voraussetzungen findet man dafür:

$$P_a = \frac{U_a^2}{R_L} = C_3^2 \cdot I_{err}^2 \cdot \frac{1}{R_L} = \text{abgegebene Leistung}$$

$$P_e = I_{err}^2 \cdot R_{err} = \text{zugeführte Leistung}$$

$$k_P = \frac{P_a}{P_e} = \frac{C_3^2}{R_{err} \cdot R_L}$$

Der beschriebene Verstärker hat einige schwerwiegende Nachteile, die seinen Einsatz nur in einigen speziellen Gebieten der elektrischen Antriebstechnik zulassen: Dadurch, daß man bestrebt ist, nur im linearen Teil der Magnetisierungskurve zu arbeiten, ist die Maschine sehr schlecht ausgenutzt (nur etwa 20 % der Typenleistung). Die Hauptzeitkonstante T der Maschine, die sich aus dem Quotienten von Erregerkreisinduktivität und Erregerkreiswiderstand zusammensetzt, liegt in der Größenordnung von Sekunden und kann sich in Regelkreisen unangenehm bemerkbar machen, wie Ihnen in den Lehrbriefen 6 und 7 erläutert wird.

Schließlich muß noch bemerkt werden, daß der Verstärkungsfaktor im Verhältnis zu anderen Verstärkern relativ klein ist. Will man k_U vergrößern, so ist das z.B. durch Erhöhung der Erregerwindungszahl möglich. Mit dieser Maßnahme ist aber auch eine Vergrößerung der Zeitkonstante der Maschine verbunden. Weil in der Regelungstechnik ein großer Verstärkungsfaktor aber eine kleine Zeitkonstante gewünscht werden, ist es üblich, Elektromaschinenverstärker nach ihrem Gütefaktor d zu beurteilen:

$$d = \frac{k_P}{T}$$

Die Industrie hat dem Verlangen nach Elektromaschinenverstärkern mit großen Gütefaktoren soweit wie es technisch möglich ist, Rechnung getragen und bringt diese unter den Bezeichnungen

Schnellerregermaschinen,
Single Stage Rototrol und
Single Stage Magnavolt

auf den Markt.

2.3.1.2 Leonard-Schaltung

Eine Anwendung des Gleichstromnebenschlußgenerator-Verstärkers in der elektromotorischen Antriebstechnik stellt

die Leonard-Schaltung dar (Bild 63).

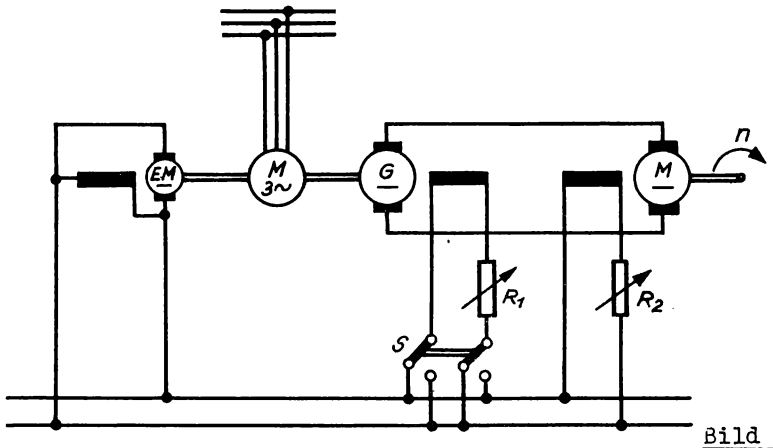


Bild 63

Sie dient der möglichst verlustlosen Beeinflussung der Drehzahl des Gleichstrommotors M. Die Ankerspannung desselben wird durch den Generator G erzeugt. Die Feldspannungen für Motor und Generator liefert eine besondere Erregermaschine EM. Zum Antrieb von Erregermaschine und Hauptgenerator verwendet man Drehstromasynchron- oder Synchronmotoren. Die Drehzahl des Motors M wird durch Veränderung der Widerstände R_1 und R_2 eingestellt. R_2 dient zur Schwächung der Erregung des Motors und ermöglicht damit die Einstellung von Drehzahlen, die oberhalb der Nenndrehzahl des Motors liegen. R_1 beeinflußt über die Erregerspannung des Hauptgenerators die Ankerspannung des Motors und läßt damit die Einstellung von Drehzahlen, die zwischen Null und der Nenndrehzahl des Motors liegen, zu. R_1 wird gleichzeitig als Anlasser benutzt, so daß besondere Anlaßwiderstände im Ankerkreis entfallen. Mit Hilfe des Schalters S ist eine Drehrichtungsumkehr (Umpolung der Erregerspannung bewirkt Umkehrung der Ankerspannung von Generator und Motor) möglich.

Für die Anwendung der Leonard-Schaltung ist zu beachten, daß für $I = I_{nenn} = \text{const.}$, die in Bild 64 dargestellten Funktionen $M = f(n)$ und $N = f(n)$ gelten. Die Begründung

dafür sollen Sie im Rahmen einer Übungsaufgabe selbst finden.

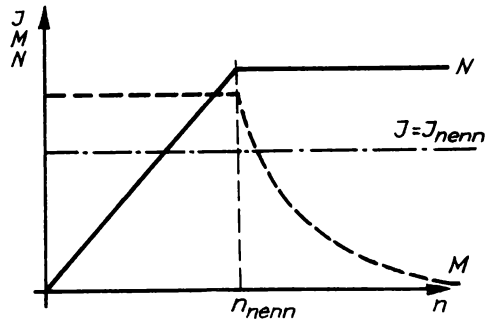


Bild 64

Erwähnen wollen wir noch, daß der Leonard-Satz auch zur Nutzbremsung eingesetzt werden kann. In diesem Fall arbeitet der Motor M als Generator und der Generator G als Motor für die Drehstromasynchron- oder Synchronmaschine, die dann Energie ins Netz abgibt.

2.3.2 Querfeldmaschinenverstärker

Denkt man sich einen normalen Gleichstromgenerator, dessen Feld mit einem gegenüber dem Nennstrom kleinen aber konstantem Strom erregt wird, so kann man im Leerlauf eine Ankerspannung an den Bürsten a-b (Bild 65) abnehmen, deren Größe neben den Erregerdaten auch noch sehr stark

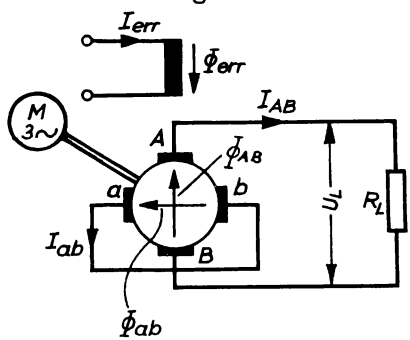


Bild 65

von der Ankerwindungszahl abhängt. Schließt man die Bürsten a-b (eventuell über Wendepole) kurz, so entsteht wegen des geringen Ankerkreiswiderstandes ein hoher Strom I_{ab}, der seinerseits ein starkes, stehendes Feld Φ_{ab}

aufbaut. Dieses Feld wird von den Ankerleitern geschnitten, so daß darin eine Spannung induziert wird, die in der Ebene der Bürsten A-B am Kollektor abnehmbar ist. Auf dem eben beschriebenen Prinzip beruht die Funktion aller Querfeldmaschinen, wie es auch schon von Rosenberg in dem nach ihm benannten Generator ausgenutzt wurde.

2.3.2.1 Metadyne-Maschinen

Die Entwicklung der Metadyne-Maschinen geht auf Pestarini zurück. Durch ihn wurden die Merkmale dieser Maschinengruppe wie folgt definiert:

a) Im Gegensatz zu den normalen Gleichstrommaschinen hat eine Metadyne zwei Bürstenpaare je Polpaar, die gegeneinander um einen konstanten Winkel verschoben sind.

b) Die möglichen Metadyne-Bauarten sind:
Generatormetadyne,
Umformermetadyne,
Motormetadyne.
Bei allen drei Arten sind die von den Ankerströmen erzeugten Felder Grundfelder, die nicht durch Kompensationswicklungen aufgehoben werden.

c) Zur Gewinnung von Raum für die Anbringung der Wendepole werden bei Metadyne-Maschinen die Hauptpole oft in zwei Teilpole aufgespaltet (Spaltpolmaschinen!).

2.3.2.1.1 Generatormetadyne

Der Grundaufbau ist schon in Bild 65 skizziert. Schließt man an den Anker der dort gezeigten Maschine einen Verbraucher R_L an, so läßt dieser den Strom I_{AB} fließen. I_{AB} baut im Anker der Maschine wieder ein Feld auf, welches dem ursprünglichen Erregerfeld entgegengerichtet ist. Hält man die Erregung konstant und verändert den Lastwiderstand im Verbraucherkreis, so kann man die

in Bild 66 gezeichnete Kurve a aufnehmen. Wir erkennen

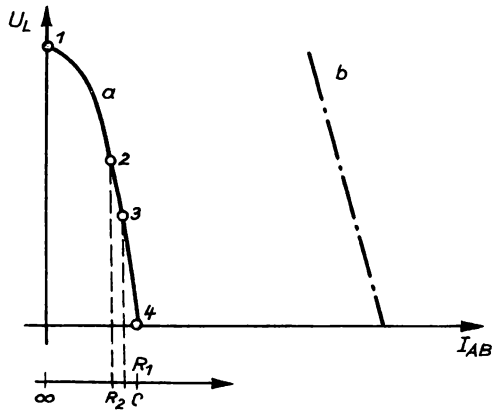


Bild 66

ohne weiteres daraus die Konstantstromeigenschaften von I_{AB}, die sich leicht aus der Gegenwirkung der Felder erklären lassen:

Fall 1: $R_L \rightarrow \infty$. Die Maschine arbeitet im Leerlauf als zweistufiger Verstärker. $I_{AB} = 0$. Es stellt sich der Arbeitspunkt 1 in Bild 66 ein.

Fall 2: $R_L \rightarrow 0$. Die Maschine arbeitet im sekundären Kurzschluß. Die Spannung U_L geht gegen Null und es stellt sich der Arbeitspunkt 4 in Bild 66 ein.

Fall 3: Wir setzen voraus, daß die Maschine bei einem Lastwiderstand R_1 im Punkt 3 arbeitet. Wird der Widerstand auf den Wert R_2 vergrößert, so verkleinert sich im ersten Moment I_{AB} ; als Folge davon wird Φ_{AB} ebefalls kleiner. Dadurch wird die Differenz

$$\Phi_{ges} = \Phi_{err} - \Phi_{AB}$$

größer, so daß die an den Bürsten AB abnehmbare Spannung wieder ansteigt. Ein Ansteigen der Spannung wirkt aber einer Verkleinerung des Stromes entgegen, so daß die Vergrößerung des Widerstandes durch Ansteigen der erzeugten Spannung nahezu kompensiert wird, und der Laststrom nur unbedeutend kleiner wird.

Wird die Generatormetadyne mit ihrem Nennerregerstrom erregt, so kann man die in Bild 66 eingetragene Charakteristik b aufnehmen. In diesem Fall darf die Maschine nicht leer laufen, weil sonst der Strom I_{a-b} unzulässig hohe Werte annimmt.

Angewendet wird die Generatormetadyne als Schweißgenerator und als Stromversorgungsaggregat für die Eisenbahnbeleuchtung, weil sie bei konstantem Lastwiderstand über einen großen Drehzahlbereich eine nahezu konstante Spannung abgeben kann.

2.3.2.1.2 Umformermetadyne

Die Umformermetadyne liefert einen von der Bauart abhängigen, in Grenzen einstellbaren, konstanten Strom I_{AB}. Voraussetzung dafür ist aber, daß ein Netz mit konstanter Spannung U_{ab} vorhanden ist. Die Grundschaltung einer Umformermetadyne zeigt Bild 67. Der von den Bürsten a-b durch den Anker geleitete Strom, der von der Spannung U_{a-b}, der Gegen-EMK E_{a-b} und dem Innenwiderstand $R_{i\ a-b}$ abhängig ist, ruft das magnetische Feld Φ_{ab} hervor.

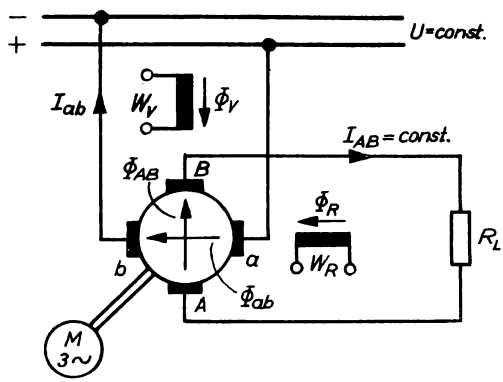


Bild 67

Dieses Feld steht auch bei sich drehendem Anker fest. Da die einzelnen Ankerleiter die Feldlinien des Feldes Φ_{ab} schneiden, wird in ihnen eine Spannung induziert, die an den Bürsten AB abnehmbar ist. U_{AB} erzeugt im Verbrau-

cherkreis den Strom I_{AB}, der ebenfalls durch den Anker fließt, in welchem er das Feld Φ_{AB} erzeugt. Durch die Rotation der Ankerleiter und das Feld Φ_{AB} wird in den Leitern eine Spannung induziert, welche an den Bürsten a, b abnehmbar ist und die Gegenspannung zu $U_{a,b}$ darstellt. Der eben beschriebene Kreisprozeß kann als Regelkreis interpretiert und durch ein Blockschaltbild entsprechend Bild 68 dargestellt werden (Betrachtung der statischen

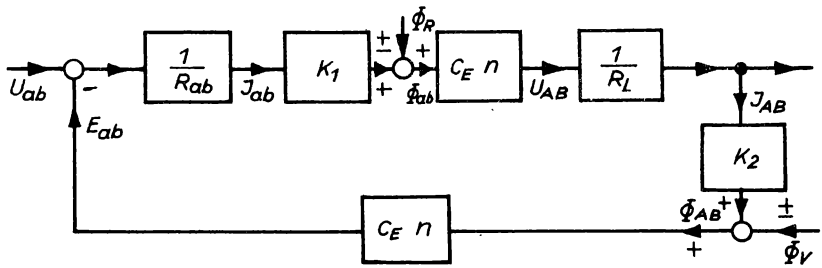


Bild 68

Verhältnisse!). Die Wicklung w_R in Bild 67 dient der Einstellung der Größe des gewünschten Stromes I_{AB}, während durch Erregung der Wicklung w_V die Umformermetadyne noch eine generatorische Komponente erhält (die Maschine ist dann ein Gemisch zwischen Generator- und Umformermetadyne). Zu beachten ist, daß die Maschine niemals im sekundären Leerlauf (Lastwiderstand gleich unendlich) arbeiten darf, weil sonst der Strom $I_{a,b}$ unzulässig hohe Werte annehmen kann.

Metadyneumformer werden eingesetzt zur Umformung einer konstanten Gleichspannung in einem nahezu verlustlos einstellbaren konstanten Gleichstrom. Sie dienen zum wirtschaftlichen Anlassen und zur Drehzahländerung von größeren Gleichstrommaschinen. Besonders vorteilhaft haben sie sich im Bahnbetrieb bei kurzen Fahrtstrecken (z.B. U-Bahn) erwiesen, da durch ihre Verwendung die Anlaßverluste wegfallen. Weiterhin werden sie zum Betrieb von Scheinwerfern und Schweißgeräten eingesetzt.

2.3.2.1.3 Anwendungsbeispiele für eine Metadyne-Maschine:

In Walzwerken besteht die Aufgabe, das Walzgut auf Rollen aufzuwickeln, wobei trotz zunehmenden Rollendurchmesser die Zugkraft und Aufwickelgeschwindigkeit konstant gehalten werden sollen. Eine Lösungsmöglichkeit mit Hilfe einer Umformermetadyne ist in Bild 69 skizziert. Über das

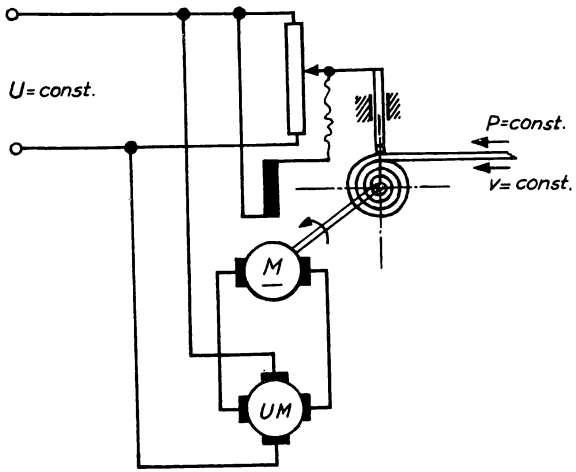


Bild 69

Drehmomentengleichgewicht findet man:

$$M_{mech} = M_{el}$$

$$F \cdot r = C_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$F = \frac{C_m \cdot \Phi \cdot I_a}{r} \qquad (a)$$

Aus der vorstehenden Gleichung ist zu ersehen, daß die Kraft dann konstant ist, wenn bei sich vergrößerndem Radius r auch Φ oder I größer werden. Da ebenfalls konstante Aufwickelgeschwindigkeit verlangt wird, muß bei größerem Radius n kleiner werden. Nach der Beziehung

$$n = \frac{U - I_a (R_i + R_a)}{C_e \cdot \Phi}$$

kann man das durch eine Vergrößerung von Φ erreichen. Wenn aber Φ bei wachsendem r größer wird, erreicht man

nach Gleichung (a) bei

$$I_a = \text{const.}$$

konstante Zugkraft. Aus diesen Überlegungen geht also hervor, daß der betrachtete Haspelantrieb mit I_a = const. angetrieben werden muß. Eine Möglichkeit dazu ist die Einschaltung einer Umformermetadyne in den Ankerkreis wie sie schematisch in Bild 69 dargestellt ist.

2.3.2.2 Amplidyne-Maschinen:

Während die Metadyne-Maschinen der Erzeugung eines konstanten, vom Verbraucher weitgehend unabhängigen, Stromes dienen, haben die Amplidyne-Generatoren echte Verstärkereigenschaften. Die Wirkungsweise einer Amplidyne wollen wir Ihnen an Hand des Schaltbildes nach Bild 70 erläutern.

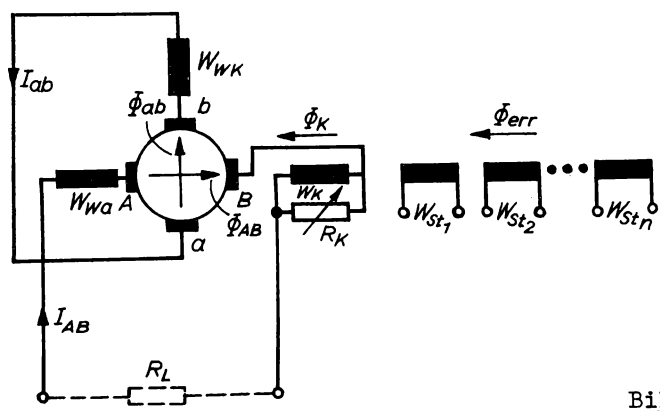


Bild 70

Zur Durchführung des Soll-Istwertvergleiches, sowie zur Anbringung von Rückführungen, ist die Maschine mit mehreren Steuerwicklungen w_{St} (bis zu 10 Stück sind üblich) ausgerüstet. Der resultierende Fluß aller Erregerwicklungen Φ_{err} erzeugt genau wie bei der Metadyne die Spannung $U_{a,b}$. Die Bürsten$_{a,b}$ sind zur besseren Stromwendung über Wendepole W_{wk} kurzgeschlossen. Der durch den Kurzschlußstrom $I_{a,b}$ erzeugte Fluß Φ_{ab} erzeugt im Anker die Nutzspannung U_{AB}. Um nun eine hohe Verstärkung zu erzielen, muß man die Rückwirkung des vom Arbeitsstrom in den Anker-

leitern hervorgerufenen Flusses auf den Erregerfluß kompensieren (beide wirken in der gleichen Ebene). Dazu ist im Stator der Amplidyne die Kompensationswicklung W_K eingebaut. Diese erzeugt den Fluß Φ_K, der dem Ankerfluß entgegengerichtet ist und dessen Größe durch den Widerstand R_K eingestellt werden kann. Praktisch kompensiert man Φ_{AB} nicht vollständig, sondern wählt mit Rücksicht auf das Zeitverhalten (siehe Lehrbriefe 5,6) einen Kompensationsgrad

$$\beta = \frac{\Phi_K}{\Phi_{AB}} = 0{,}98$$

wodurch man allerdings eine Verstärkungseinbuße in Kauf nehmen muß.

Da bei Verstärkern im Arbeitsbereich lineare Abhängigkeit zwischen Ein- und Ausgangsgröße angestrebt wird, kann man eine Amplidyne nur im linearen Teil der Magnetisierungskurve arbeiten lassen. Das bedeutet, daß bei einer Amplidyne die Eisenabmessungen um 150 bis 200 % größer sind als bei einer normalen Gleichstrommaschine gleicher Ausgangsleistung.

Die Verstärkungsfaktoren, die mit Amplidyne-Generatoren erreicht werden, sind beachtlich und liegen etwa in der Größenordnung von 10^4.

2.3.2.3 Anwendungsbeispiele für eine Amplidyne-Verstärkermaschine:

Den Einsatz einer Amplidyne als Verstärker bei einer Drehzahlregelung zeigt Ihnen Bild 71! Die zu regelnde Drehzahl wird mittels einer Tachomaschine (TD) in einen äquivalenten Spannungswert umgesetzt. Der Soll-Istwertvergleich wird bei diesem Regelkreis magnetisch innerhalb des Erregerkreises der Amplidyne (AV) durchgeführt. Der Wicklungssinn der beiden Erregerwicklungen W_{err1} und W_{err2} ist entgegengesetzt, so daß der resultierende Fluß

$$\Phi_{res} = \Phi_{soll} - \Phi_{meß}$$

als Differenz zwischen Soll- und Istwert an den Ausgangs-

klemmen der Amplidyne eine Spannung erzeugt, die die Drehzahl des Antriebsmotors über die Gleichung

$$n = \frac{E}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U_A - I_A R_A}{C_e \cdot \Phi} = K_1 \cdot U_A - K_2 \cdot I_A$$

beeinflußt.

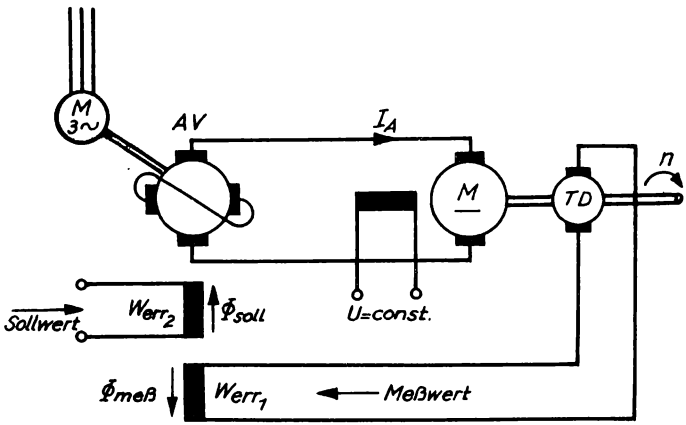


Bild 71

Zusammenfassung zum Abschnitt 2.3 :

Das Grundprinzip aller Elektromaschinenverstärker ist der Gleichstromnebenschlußgenerator. Eine praktische Anwendung desselben stellt der Leonard-Satz zur Drehzahlbeeinflussung dar. Neben diesen Längsfeldverstärkermaschinen benutzt man heute immer mehr die Querfeldmaschinen. Bei diesem Maschinentyp wird neben dem Längsfeld auch noch das Ankerquerfeld ausgenutzt, so daß man bei ihnen von einer zweistufigen "Verstärkung" sprechen kann. Die Querfeldmaschinen können in zwei großen Untergruppen eingeteilt werden:

a) Metadyne-Maschinen: Bei diesen wirkt das vom Nutzstrom in den Ankerleitern erzeugte Feld auf den Erregerkreis zurück, so daß Aggregate mit Konstantstromeigenschaften entstehen.

b) Amplidyne-Maschinen: Diese besitzen im Stator eine vom

Nutzstrom durchflossene Kompensationswicklung, die den Ankerfluß Φ_{AB} (vom Nutzstrom erzeugt) nahezu vollständig kompensiert, so daß ein Verstärker mit großem Verstärkungsfaktor entsteht.

Übungsaufgaben zum Abschnitt 2.3:

1. Berechnen und zeichnen Sie qualitativ den Verlauf der Ankerspannung über der Zeit eines unbelasteten Gleichstromgenerators, wenn die Erregerspannung von U_a auf U_2 sprungförmig erhöht wird!
   (Erregerkreiswiderstand und Induktivität berücksichtigen!)
2. Begründen Sie den Verlauf der Funktionen M = f (n) und N = f (n) bei konstantem Ankerstrom für den Arbeitsmotor des Leonard-Satzes (Bild 64!).
3. Welche Unterschiede bestehen zwischen Amplidyne-und Metadyne-Maschinen ?
4. Beschreiben Sie die Vorgänge innerhalb des Regelkreises nach Bild 71, wenn die Belastung des Motors sprungförmig um Δ M vergrößert wird!

3. Stelleinrichtungen

Zum Abschluß dieses Lehrbriefes betrachten wir als Verbindungsglieder zwischen Regler und Regelstrecke die Stellglieder.

3.1. Die Hochvakuumröhre als Stelleinrichtung

In stabilisierten Netzteilen elektronischer Geräte wird oft als Stelleinrichtung eine Triode eingesetzt. Das Prinzipschaltbild einer derartigen Spannungsregelung ist in Bild 72 gezeigt.
Als Störungen können auftreten:
a) Veränderungen der Belastung (R_L verändert sich) oder

b) Veränderungen der Speisespannung U_1.

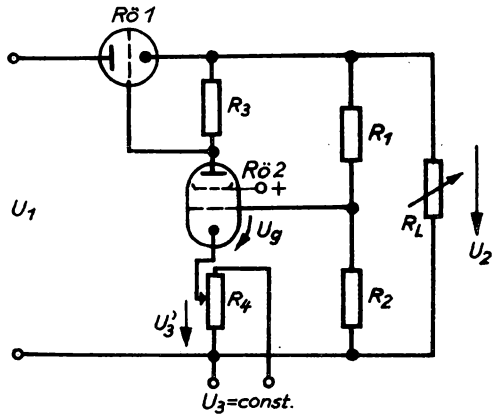


Bild 72

Beide Änderungen wirken sich momentan als Spannungsänderungen der Spannung U_2 aus, die konstant gehalten werden soll. Gemessen werden die Veränderungen der Regelgröße U_2 durch den Spannungsteiler R_1R_2, der eine U_2 proportionale Spannung dem Gitter der Rö 2 zuführt. Hier wird der Soll-Istwertvergleich vorgenommen:

$$U_g = U_{R2} - U_3'$$

Daraus geht hervor, daß U_3' dem Sollwert entspricht, was bedingt, daß die Spannung U_3' eine hohe Konstanz aufweisen muß (Stabilisatorröhre). Die Rö 2 arbeitet als einfacher Spannungsverstärker und gibt die Schwankungen der Differenz zwischen Soll- und Istwert an das Stellglied Rö 1 weiter. Diese wird als Stellorgan ausgenutzt, dessen innerer Widerstand von der jeweils anliegenden Gitterspannung abhängig ist. Schematisch kann man den Regelkreis

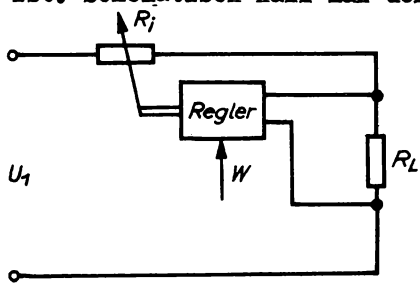


Bild 73

aus Bild 72,wie in Bild 73 gezeigt, darstellen. Aus dieser Skizze erkennt man sofort den Wirkungsmechanismus der Regelung: Stimmt die Spannung über R_L nicht mehr mit dem vorgegebenen Sollwert W überein, so verändert der Regler R_i solange, bis der alte Wert nahezu wieder hergestellt. ist. Das heißt, bei einer Verkleinerung von R_L wird in

$$U_{R_L} = U_1 \frac{R_L}{R_L + R_i} = U_1 \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_L}}$$

der Ausdruck R_i/R_L größer und der Regler muß R_i verkleinern, damit sich U_{R_L} dem vorgeschriebenen Wert wieder nähert.

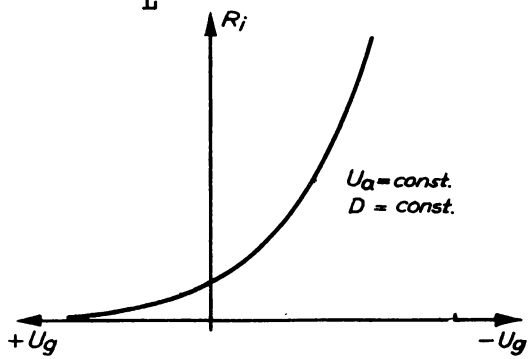


Bild 74

Wichtig für die Bemessung des Regelkreises ist die statische Kennlinie des Stellgliedes (für Triode Bild 74). Man erkennt, daß dieselbe sehr stark nichtlinear ist, was in der Praxis unter Umständen zu Schwierigkeiten führen kann.

3.2. Thyratron als Stellglied

In Bild 75 haben wir Ihnen den Regelkreis für eine Temperaturregelung der Flüssigkeit im Behälter W dargestellt. Die Regelgröße ϑ wird durch den temperaturabhängigen Widerstand R_m erfaßt, der mit R_1, R_2 und R_S (Sollwerteinstellung!) zu einer Brücke zusammengeschaltet ist.

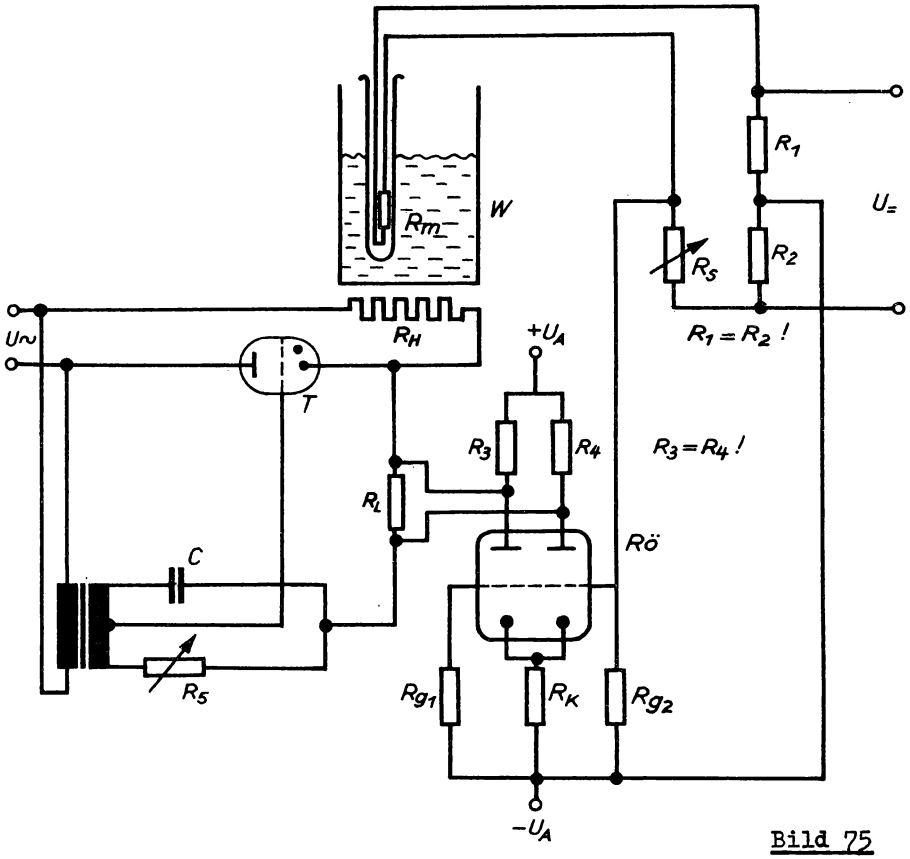


Bild 75

Mit der Ausgangsspannung der Brücke (Differenz zwischen Soll- und Istwert) wird das rechte System der Doppeltriode Rö beaufschlagt. Bei der Schaltung der Doppeltriode handelt es sich um einen Gleichspannungsverstärker in Brükkenschaltung, die gewählt wurde, um die Ausgangsspannung von Anodenspannungsschwankungen weitgehend unabhängig zu machen. Der verstärkte Spannungswert der Soll-Istwert-Differenz fällt über dem Widerstand R_L ab und ist mit der Ausgangsspannung der Phasenbrücke aus C und R_S in Reihe geschaltet. Das Gitter des Stellgliedes (Thyratron T) erhält also eine veränderliche Gleichspannung, der eine feste, phasenverschobene Wechselspannung überlagert ist -

Vertikalsteuerung!

Betrachten wir das Stellglied einmal aus dem vorstehenden Regelkreis herausgeschnitten und nehmen an, daß die Eingangsgröße der Zündwinkel sei und die Ausgangsgröße der Effektivwert des Heizstromes; dann ist die statische Kennlinie wie in Bild 76 gezeigt. Es ist zu ersehen, daß im

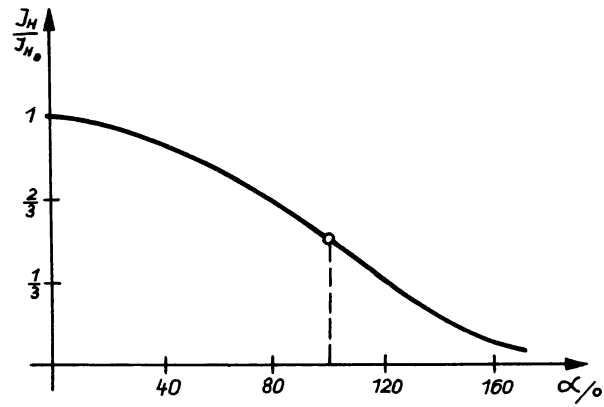


Bild 76

Interesse eines großen Verstärkungsfaktors der Arbeitspunkt etwa bei $\varphi = 90^{\circ}$ festgelegt werden sollte (größte Steilheit!). Man erkennt weiter, daß die statische Kennlinie des Thyratrons, genau wie die einer Elektronenröhre, sehr stark nichtlinear ist, was sich auf das Verhalten des Regelkreises nachteilig auswirkt.

3.3. Der Gleichstromnebenschlußmotor als Stelleinrichtung

Im Gegensatz des Gleichstromnebenschlußmotors in der Antriebstechnik ist in der Regelungstechnik oft nicht die Drehzahl, sondern der Drehwinkel als Ausgangsgröße maßgebend, (Bild 77). Das wird Ihnen sofort klar, wenn Sie sich vergegenwärtigen, daß es bei der Verstellung von Ventilen oder Klappen darauf ankommt, um welchen Winkel deren Spindel verstellt wurde.

Um den dynamischen Zusammenhang zwischen Ein- und Aus-

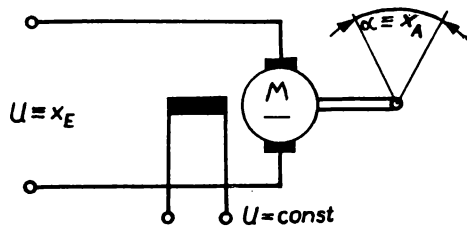


Bild 77

gangsgröße des in Bild 77 gezeigten Gleichstromnebenschlußmotors einfach herzuleiten, machen wir folgende Voraussetzungen:

a) Das Motorfeld werde mit konstanter Spannung erregt.
b) Der Innenwiderstand des Ankers wird vernachlässigt.
c) Die Ankerspannung werde zum Zeitpunkt t = 0 ($\varphi = 0$) sprungförmig von 0 auf U_1 verändert.

Damit gilt:

$$U = E = c \cdot \Phi \cdot n$$

$$U = K_1 \cdot n = x_E$$

Diese Gleichung gibt uns den Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und der Drehzahl. Um zum Drehwinkel überzugehen, erinnern wir uns der aus der Mechanik bekannten Zusammenhänge

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega = 2\pi \cdot n$$

$$n = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{dx_A}{dt}$$

Durch Einsetzung ergibt sich:

$$K_1 \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{dx_A}{dt} = x_E$$

oder

$$x_A = \frac{2\pi}{K_1} \int x_E \, dt$$

Unter Berücksichtigung der Voraussetzung c:

$$x_A = \frac{2\pi}{K_1} \cdot t = K \cdot t$$

Die Ausgangsgröße ist proportional dem Integral über der Eingangsgröße, folglich muß es sich hier um ein integrales

Regelkreisglied handeln.

Aus Gründen der Stabilität ist es in Regelkreisen oft wünschenswert, als Stelleinrichtung kein integrales, sondern ein proportionales Glied zu verwenden. Dazu wird von den Herstellern von Stellantrieben oft ein Potentiometer an der Welle angebracht, welches eine dem Winkel proportionale Spannung abgibt. (Siehe Lehrbrief 7!)

3.4. Der Ferrarismotor als Stelleinrichtung

Das Prinzip der Ferrarismotoren ist Ihnen schon von Wechselstrominduktionszähler her bekannt. Der Stator enthält 2 um 90° geometrisch versetzte Erregerwicklungen, die von 2 Strömen durchflossen werden, die gegeneinander um 90° elektrisch in der Phase verschoben sind. Die Flüsse Φ_1 und Φ_2 (Bild 78) bilden ein Drehfeld, welches in dem, im

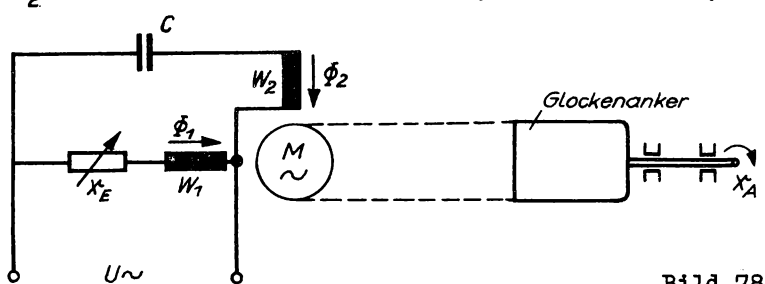


Bild 78

Gegensatz zum Induktionszähler, glockenförmigen Anker Wirbelströme hervorruft, deren Größe ein Maß für das zu entnehmende Drehmoment darstellt. Die elektrische Phasenverschiebung von annähernd 90° wird durch den der Wicklung W_2 vorgeschalteten Kondensator erreicht. Die Drehzahl des Ferrarismotors kann durch Veränderung des Flusses Φ_1 (in Bild 78 durch veränderlichen Vorwiderstand angedeutet) beeinflußt werden. Eine Drehrichtungsänderung erreicht man durch Umpolung der Wicklung W_1.
In seinem regelungstechnischem Betriebsverhalten weist der Ferrarismotor gegenüber dem Gleichstromnebenschluß-

motor eine Reihe von Vorteilen auf, die ihm eine wachsende Verwendung in der Praxis sichern:

a) der Ferrarismotor kann direkt aus dem Wechselstromnetz gespeist werden, er benötigt also in Wechselstrom-Regelungsgeräten und Steuerungsgeräten keine besondere Stromversorgung.
b) Das äußerst kleine Läuferträgheitsmoment ergibt eine große maximale Beschleunigung aus dem Stillstand und geringste Umsteuerzeiten der Drehrichtung.
c) Der Ferrarismotor kann voll ausgesteuert bis zum Stillstand abgebremst werden, ohne daß die Wicklung des Motors thermisch überbeansprucht wird.
d) Durch Wegfall von Bürsten, Kollektor usw. hat der Ferrarismotor eine geringere Störanfälligkeit als der Gleichstromnebenschlußmotor.

3.5. Die Kohlesäule als Stellorgan

Bild 79 zeigt Ihnen einen Kohledruckregler, wie er früher oft zur Spannungsregelung bei Gleichstromgeneratoren eingesetzt wurde. Dabei wird der Effekt ausgenutzt, daß eine

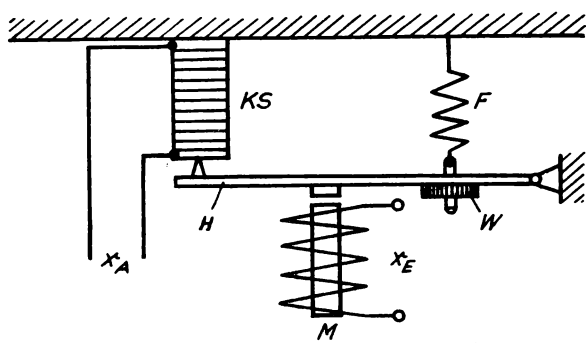


Bild 79

aus Kohlescheiben zusammengesetzte Säule (KS) ihren Widerstand in Abhängigkeit des auf sie ausgeübten Druckes ändert. Man schaltet die Kohlesäule als Vorwiderstand in den Erregerkreis eines fremderregten Generators und beaufschlagt mit der Ankerspannung den Magneten M. Am Hebel

H findet der Soll-Istwertvergleich als Drehmoment statt, wobei der Sollwert durch das von der Feder F hervorgerufene Drehmoment dargestellt wird, das über die Rändelschraube W verändert werden kann.

Ein Nachteil der Kohledruckregler ist, daß der Widerstand der Kohlesäule nur in verhältnismäßig kleinen Grenzen verändert werden kann ($R_{max}/ R_{min} = 7$).

Zusammenfassung zum Abschnitt 3:

In diesem Abschnitt haben Sie die wichtigsten elektrischen Stellglieder kennengelernt. Diese haben die Aufgabe, entsprechend einem vom Regler gelieferten Signal, den Stellstrom zu beeinflussen und so in die Vorgänge innerhalb der Regelstrecke einzugreifen, Physikalisch können die von uns gebrachten Stelleinrichtungen in 3 Gruppen eingeteilt werden:

a) Die Stellmotore sind Motore, die zum Antrieb von Ventilen oder Klappen bestimmt sind. Hierzu gehören Gleichstromnebenschlußmotore und Ferrarismotore. Da die Ausgangsgröße bei ihnen der Drehwinkel ist, handelt es sich um I-Glieder!

b) Der Wirkungsmechanismus des Stellgliedes beruht auf der Veränderung des inneren Widerstandes eines elektrischen Bauelementes (Elektronenröhre und Kohlesäule).

c) Der Stellvorgang beruht auf einen gesteuerten Gleichrichtereffekt, wobei der vom Stellglied abgegebene Gleichstrom dem Stellsignal proportional ist.

Alle praktischen Stellglieder haben eine stark nichtlineare Charakteristik, wodurch sie nur für kleine Aussteuerungen unseren Besprechungen zugänglich sind.

Lösungen der Wiederholungsfragen und Übungsaufgaben:

Abschnitt 1:

Zu 1: Siehe Seite 10

Zu 2: Widerstandsthermometer $-200^{\circ}C$ bis $+600^{\circ}C$
Thermoelemente $-50^{\circ}C$ bis $+1600^{\circ}C$

Zu 3: Siehe Seite 15-16

Abschnitt 2.1.1:

Zu 1: Siehe Seite 27-29

Zu 2: Wenn W sinkt, treibt die Differenzspannung $\underline{U} - U_{R2}$ einen Strom in der Richtung durch den Spulenrahmen A, daß die Fotozelle F stärker abgedunkelt und damit die Gitterspannung der Röhre negativer wird. Als Folge davon verkleinert sich der Anodenstrom I_a solange, bis wieder

$$\underline{U} = U_{R2}$$

erfüllt ist.

Abschnitt 2.1.2:

Zu 1: Siehe Seite 37 - 39

Zu 2: Siehe Seite 41 - 43

Zu 3: Aufstellung der Maschengleichungen:

$$\frac{\underline{u}_{ges}}{2} - \underline{u}_g - \underline{i}_{cR} \cdot R = 0 \qquad (a)$$

$$\frac{\underline{u}_{ges}}{2} + \underline{u}_g - \underline{i}_{cR} \cdot \frac{1}{j\omega C} = 0 \qquad (b)$$

Aus (a) und (b) erhält man:

$$\underline{u}_g = \frac{\underline{u}_{ges}}{2} \cdot \frac{1 - j\omega CR}{1 + j\omega CR} = \frac{\underline{u}_{ges}}{2} \cdot e^{-j\,2 \arctan \omega CR}$$

Abschnitt 2.1.3:

Zu 1: Siehe Seite 44 - 48

Zu 2: Siehe Seite 48

Zu 3: Siehe Bild 35c

Zu 4: Die Eingangsspannung wird durch den Übertrager $Ü_1$ in den Basis-Emitterkreis eingekoppelt. R_1, R_2 und der ohmsche Widerstand der Sekundärwicklung des Übertragers bilden den Spannungsteiler zur Erzeugung der Basisvorspannung (Festlegung des Arbeitspunktes). C überbrückt R_2 für die zu verstärkende Wechselspannung, damit nahezu die gesamte Übertragerausgangsspannung an der Basis-Emitterstrecke liegt. Im Kollektorkreis wird die verstärkte Wechselspannung durch den Übertrager $Ü_2$ ausgekoppelt, der ebenfalls der Widerstandsanpassung dient.

Abschnitt 2.2:

Zu 1: Siehe Seite 52 - 71

Zu 2: Wegen des größeren Verstärkungsfaktors wurde für den Magnetverstärker die spannungssteuernde Schaltung gewählt (Grundschaltung siehe Bild 55). Um den Motoranker mit Gleichstrom zu speisen, würde man in Bild 55 noch eine Graetz-Schaltung einfügen müssen. Somit wären in der Schaltung 6 Gleichrichter vorhanden. Der Gedanke liegt nahe, 2 Gleichrichterelemente einzusparen und die Arbeitswicklungen wie Bild 60 zeigt, in die Graetz-Schaltung einzuordnen. Das Steuerpotentiometer ist mit Mittelanzapfung versehen, um die Motordrehzahl bis nahezu auf Null herunter zu steuern. Bild 80 zeigt Ihnen die Stromrichtungen innerhalb des Arbeitskreises für die positive und negative Halbwelle der Steuerspannung.

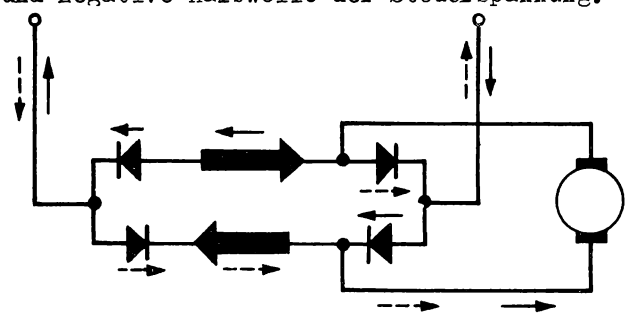


Bild 80

Zu 3:

$$I_v \cdot W_v = I_{St} \cdot W_{St}$$

a. $I_v = I_{St} \cdot \frac{W_{st}}{W_v} = 25\ mA \cdot \frac{1000}{300} = \underline{83{,}3\ mA}$

b. $I_v = 40\ m\ A \cdot \frac{1000}{300} = \underline{133{,}3\ mA}$

Abschnitt 2.3:

Zu 1:

$$\frac{L}{R} \cdot \frac{di_{err}}{dt} + i_{err} = \frac{u_{err}}{R}$$

$$i_{err} = C_1 \cdot \Phi_{err}$$

$$e = C_2 \cdot \Phi_{err} = u_A$$

$$i_{err} = u_A \cdot C_3$$

$$\frac{L}{R} \frac{d\,u_A}{dt} + u_A = \frac{1}{C_3 \cdot R} \cdot u_{err}$$

$$t = 0,\ u_A = U_{A_0}\ !$$

$$u_A = \frac{1}{C_3 \cdot R} \cdot U_2 + \left(U_{A_0} - \frac{1}{C_3 \cdot R} \cdot U_2 \right) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

==========

Den Verlauf dieser Funktion haben wir Ihnen in Bild 81 dargestellt.

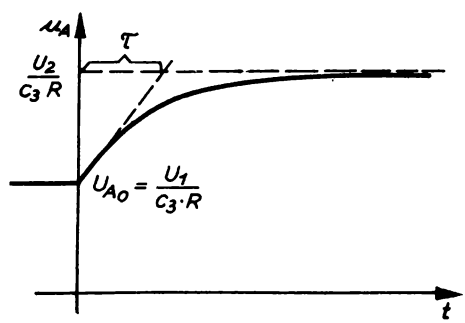


Bild 81

Zu 2: Bereich 1: $0 < n < n_{nenn}$

$$\left.\begin{aligned} \Phi &= \text{const.} \\ I_A &= \text{const.} \\ U_A &= \text{const.} \end{aligned}\right\} \quad M = c_m \cdot \Phi \cdot I_A = \underline{\text{const.}}$$

$$N = \frac{M}{K} \cdot n = \underline{k_1 \cdot n}$$

Bereich 2: $n_{nenn} < n < \infty$

$$F = U - I_A (R_i + R_A)$$

$$\Phi = \frac{U_A - I_A (R_i + R_A)}{c_e \cdot n} = \frac{K_2}{n}$$

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_A = \underline{\frac{K_3}{n}}$$

$$N = \frac{M}{k} \cdot n = \underline{\text{const.}}$$

Zu 3: Siehe Seite 87

Zu 4: Wird die Belastung um ΔM vergrößert, so sinkt die Drehzahl ab und die von der Tachomaschine abgegebene Spannung wird kleiner. Als Folge davon erhöht sich

$$\Phi_{res} = \Phi_{soll} - \Phi_{meß}$$

und die von der Amplidyne abgegebene Spannung (= Speisespannung des Motors) steigt. Dadurch wird die Drehzahl des Motors wieder nahezu bis auf den Ausgangswert angehoben (bleibende Regelabweichung!).

Literaturverzeichnis

(1) Behr: Silikonisolierte Ferrarismotoren für die Regelungstechnik
Deutsche Elektrotechnik 1958, Heft 7

(2) Budig: Verstärkermaschinen des Typs Amplidyne
Deutsche Elektrotechnik 1958, Heft 3

(3) Dehnungsmeßstreifen-Meßtechnik
Eindhofen 1951

(4) Gabler, Haskovec, Tomanek: Magnetische Verstärker
Berlin 1960

(5) Grafe: Gleichstrommaschinen
Leipzig 1954

(6) Geffcken, Richter: Die Photozelle in der Technik
Berlin 1943

(7) Geyger: Magnetverstärkerschaltungen
Berlin 1959

(8) Gille, Pelegrin, Decaulne: Lehrgang der Regelungstechnik, Band 1 : Berlin 1960
Band 2 : Berlin 1962

(9) Gohlke: Mechanisch elektrische Meßtechnik
München 1955

(10) Kretzmann: Handbuch der industriellen Elektronik
Berlin 1954

(11) Lang: Anwendungsmöglichkeiten magnetischer Verstärker, AEG-Mitteilungen 1955, Heft 1/2

(12) Lang: Magnetische Verstärker für die Steuerungs- und Regelungstechnik
ETZ/B 1956, Heft 4

(13) Loocke: Elektrische Maschinenverstärker
Berlin 1958

(14) Malow: Fernmessung, Fernmeldung, Fernsteuerung
Berlin 1954

(15) Monäth: Entwicklung der Gleichstromquerfeldmaschinen
ETZ 1942, Heft 1

(16) Nürnberg: Prüfung elektrischer Maschinen
Berlin 1955

(17) Oppelt: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge
Weinheim 1956

(18) Otto, Müller: Flächentransistoren
Leipzig 1960

(19) Pelczewski: Elektrische Maschinenverstärker
Berlin 1961

(20) Pflug: Einführung in die Theorie und Praxis magnet. Verstärker
zmsr 1958, Heft 2

(21) Transduktoren (Firmenschrift der Fa. Giesenhagen)
München 1956

(22) Trnka: Einführung in die Regelungstechnik
Berlin 1956

(23) Umlauft: Der Ferrarismotor und seine Eigenschaften als Stellmotor für elektrische Regler
Feinwerktechnik 1953, Heft 8

(24) Wagner: Elektronische Verstärker
Berlin 1961

(25) Weitner: Elektrische Antriebe
Berlin 1960

INGENIEUR-
FERNSTUDIUM

Curth

Steuerungs- und Regelungstechnik 3

Herausgeber:
Institut für Fachschulwesen
der Deutschen Demokratischen Republik
Karl-Marx-Stadt

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Ing. Curth

S T E U E R U N G S - U N D R E G E L U N G S T E C H N I K

3

V e r ö f f e n t l i c h t :
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
K A R L - M A R X - S T A D T

Alle Rechte vorbehalten

Gebühr DM 2.50 Ag 613/174/64/2000 Best.-Nr. 5034-03

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie	1
1.1.	Temperaturregeleinrichtungen	1
1.2.	Druckregeleinrichtungen	6
1.3.	Durchflußregeleinrichtung	10
1.4.	Standregelung mit Schwimmerregeleinrichtung	11
	Zusammenfassung	12
	Wiederholungsfragen	13
2.	Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie	14
2.1.	Prinzip und Wirkungsweise	14
2.2.	Grundbauelemente von Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie	15
2.2.1.	Druckteiler	16
2.2.2.	Düse-Prallplatte, Kugelsteuerung, Nadelsteuerung	17
2.2.3.	Strahldüse - Fangdüse	19
2.2.4.	Membranverstärker	20
2.2.5.	Schnellsteuerer	22
2.3.	Bauformen der Regler mit pneumatischer Hilfsenergie	23
2.3.1.	Regler mit Balgwaage	23
2.3.1.1.	Balgwaageregler ohne Rückführung	24
2.3.1.2.	Balgwaageregler mit starrer Rückführung	25
2.3.1.3.	Balgwaageregler mit nachgebender Rückführung	26
2.3.1.4.	Balgwaageregler mit nachgebender und verzögerter Rückführung	28
2.3.2.	Kraftvergleichsregler mit Membransystemen und Druckteiler	29
2.3.2.1.	Sollwertgeber	31
2.3.2.2.	Proportionalteil	31
2.3.2.3.	Differentialteil	32
2.3.2.4.	Integralteil	34
2.4.	Regeleinrichtungen industrieller Fertigung	34
2.4.1.	Druck- und Temperaturregler des VEB Meßgerätewerk Quedlinburg	34

		Seite
2.4.2.	Einheitsregler des VEB Meßgerätewerk Quedlinburg	36
2.4.3.	Kombi-Baukastensystem	37
2.5.	Pneumatische Stellglieder	39
2.5.1.	Membranregelventil	39
2.5.2.	Membranstellmotor mit Stulpmembran	41
2.5.3.	Membranhebel	42
2.6.	Zusatzeinrichtungen	43
2.7.	Transmitter	44
2.7.1.	Temperaturtransmitter	44
2.7.2.	Differenzdrucktransmitter	45
2.7.3.	Elektropneumatischer Transmitter (Stromwaage)	46
	Zusammenfassung	47
	Wiederholungsfragen	49
3.	Regeleinrichtungen mit hydraulischer Hilfsenergie	51
3.1.	Steuereinrichtungen für den Ölstrom	52
3.1.1.	Doppelsteuerkolben	52
3.1.2.	Prallplatte-Düse-System	53
3.1.3.	Strahlrohr	54
3.2.	Kraftverstärker - Folgekolben	57
3.3.	Sollwerteinstellung	58
3.4.	Rückführungen	60
3.4.1.	Starre Rückführung	60
3.4.2.	Nachgebende Rückführung	61
3.5.	Verhältnisschieber	63
3.6.	Der Reglerblock	65
	Zusammenfassung	66
	Wiederholungsfragen	67

1. Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie

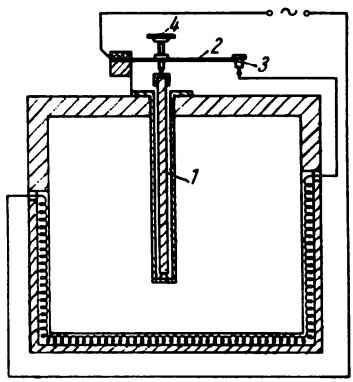
Reicht die von einem Meßwerk erzeugte Stellkraft aus, um das Stellglied sicher zu bewegen, dann läßt sich ein Regler ohne Hilfsenergie anwenden. Dabei wird die notwendige Energie vom Meßfühler selbst geliefert und wirkt direkt auf das Stellglied ein. Deshalb wurden derartige Regler als Regler ohne Hilfsenergie (früher direkte Regler) bezeichnet.
Das Anwendungsgebiet der Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie ist beschränkt auf einfache Aufgaben in der Temperatur-, Druck-, Durchfluß-, Drehzahl- und Standregelung. Wo die Genauigkeitsansprüche nicht zu hoch sind, haben sie den Vorteil, daß sie billiger sind als andere Regeleinrichtungen; darüber hinaus arbeiten sie so gut wie wartungsfrei. Eingeschränkt wird ihre Anwendungsmöglichkeit andererseits aber auch dadurch, daß keine größeren Leistungen am Stellglied aufgebracht werden können.

Die Entscheidung darüber, ob eine Regeleinrichtung ohne Hilfsenergie anwendbar ist, hängt damit in erster Linie von den Genauigkeitsansprüchen und der erforderlichen Stellkraft ab. Aufbau und Wirkungsweise der Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie sollen an den typischen Beispielen erläutert werden.

1.1. Temperaturregeleinrichtungen

Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie dienen häufig der Temperaturregelung, sowohl beim Beheizen mit elektrischer Energie als auch bei dampfbeheizten Anlagen. Als Regler sind dann vorwiegend Stabtemperaturregler, Bimetallregler oder Flüssigkeitsausdehnungsregler eingesetzt.
Zur Regelung kleinerer Öfen, Heizbäder oder Thermostaten dient oft ein Stabtemperaturregler (siehe Abb. 1). Als Meßfühler wird ein Stabausdehnungsthermometer verwendet. Die Längenausdehnung eines Metallstabes (1), die ein Maß für die zu messende Temperatur ist, wird auf einen federnd angebrachten Kontaktarm (2) übertragen. Je nach der herrschenden Temperatur hebt oder senkt sich der Kontaktarm und öffnet oder schließt dabei den Kontakt (3) im Heizstromkreis. Die Sollwerteinstellung am Regler erfolgt

durch eine Stellschraube (4), die den Abstand zwischen Kontaktarm und Ausdehnungsstab festlegt. Durch Verstellen dieser Schraube wird der Abstand zwischen dem Stab und Kontaktarm verändert und damit die zum Öffnen des Kontaktes notwendige Ausdehnungslänge des Stabes als Sollwert vorgegeben.



Der skizzierte Stabtemperaturregler arbeitet als unstetiger Regler, da das Stellglied nur die zwei Stellungen "eingeschaltet" und "ausgeschaltet" hat. In besonderen Fällen sind durch Anwendung eines Motors auch drei Stellungen bei Drehrichtungswechsel - rechts, halt, links - möglich.

Abb. 1 Stabtemperaturregler

Derartige Regler werden als Zwei- oder Dreipunktregler bezeichnet. Ihre charakteristische Eigenschaft besteht darin, daß der Istwert ständig in der Art einer Sägezahnkurve um den Sollwert pendelt.
Stabtemperaturregler werden fast ausschließlich in elektrisch beheizten Anlagen eingesetzt. Die maximale Schaltstromstärke beträgt bei offenliegenden Kontakten 6 A, bei Verwendung von Quecksilberkippschaltern 20 A.
Ähnlich in ihrer Grundarbeitsweise sind die Bimetallregler. Den Stabtemperaturreglern gegenüber haben sie den Vorteil der wesentlich geringeren Abmessungen. Sie werden deshalb auch vorwiegend in kleineren Elektrowärmegeräten zur Regelung der Temperatur von Heizkissen, Reglerbügeleisen, Thermostaten usw. eingesetzt.
Beim Bimetallregler (siehe Abb. 2) dient als Meßfühler ein Bimetallstreifen (1), der sich unter Temperatureinwirkung nach

der Seite des Metalls mit der geringeren Wärmeausdehnung krümmt. Der Bimetallstreifen trägt den beweglichen Schaltkontakt (2) und kann direkt als Teil des Stromkreises benutzt werden.

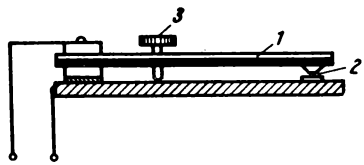


Abb. 2 Bimetallregler

Biegt sich der Streifen bei Temperaturerhöhung durch, so öffnet er damit den Stromkreis selbsttätig und unterbricht den Heizvorgang.
Beim Absinken der Temperatur wird der Heizstromkreis durch Strecken des Bimetallstreifens wieder geschlossen. Die Solltemperatur kann mit einer Stellschraube (3) vorgegeben werden. Diese spannt den Bimetallstreifen vor und legt den Abstand der Kontakte fest.
Bei einer anderen Konstruktion wird der Streifen beiderseitig fest eingespannt. Durch die Wärmewirkung wölbt sich der Streifen. Diese Anordnung wird meist gewählt, wenn ein Quecksilber- oder Federkippschalter betätigt werden soll.
Auch beim Bimetallregler beträgt die Schaltstromstärke bei offenliegenden Kontakten maximal 6 A und bei Quecksilberkippschaltern 20 A.
Waren der Stabtemperatur- und der Bimetallregler vorwiegend zum Einsatz in elektrisch beheizten Anlagen vorgesehen, so dienen die direkten Temperaturregeleinrichtungen nach dem Flüssigkeitsausdehnungsprinzip zur Regelung dampfbeheizter Anlagen.
Die Temperaturregeleinrichtung besitzt als Meßfühler ein Flüssigkeitsausdehnungsthermometer, das durch seine Energie ein Regelventil proportional der auftretenden Regelabweichung verstellt. Abb. 3 zeigt einen Schnitt durch eine derartige Regelungseinrichtung.

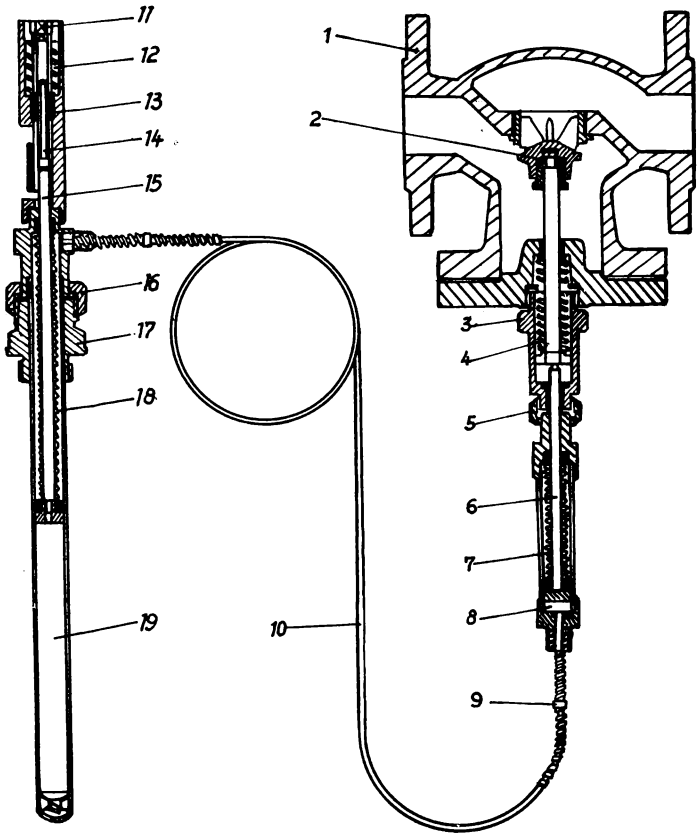


Abb. 3 Temperaturregeleinrichtung mit Flüssigkeitsausdehnungsthermometer

Die Arbeitsweise ist folgende:
Das Rohr (19) des Meßfühlers wird zur Messung der zu regelnden Temperatur verwendet. Bei steigender Temperatur dehnt sich die in diesem Rohr befindliche Flüssigkeit aus. Über die Kapillarleitung (10) pflanzt sich der Druck auch in den Arbeitskörper (8) fort und wirkt dort auf das bewegliche Metallfederrohr (7). Hierdurch schiebt sich der Bolzen (6) aus dem Arbeitskörper heraus und bewegt entgegen der Feder (4) den Kegel (2) des Ventils (1), das sich beispielsweise in einer Dampfzuführungsleitung befindet und entsprechend der Größe der Regelabweichung geschlossen wird. Bei einer Temperaturerniedrigung am Fühler verläuft der Vorgang umgekehrt, wobei die Feder (4) den Schaft mit dem Kegel so bewegt, daß das Ventil entsprechend öffnet.
Die Einstellung des Sollwertes erfolgt über eine Vorrichtung (11, 14, 15), wodurch das Metallfederrohr (18) verlängert oder verkürzt und somit das freie Volumen des Rohres (19) vom Meßfühler verändert wird. Je größer dieses Volumen eingestellt wird, um so höher muß die Temperatur sein, damit der notwendige Flüssigkeitsdruck zum Schließen des Ventils vorhanden ist. Zur Sicherung gegen eine Überhitzung des Rohres bis ca. 15 °C über die eingestellte Sollwerttemperatur ist die Spindelmutter (13) federnd (12) gelagert. Ein erhöhter Druck wird sich über die Feder (12) ausgleichen.
Bei Temperaturen zwischen 140 °C und 200 °C sowie bei schwer zugänglichen Meßstellen wird der Sollwerteinsteller vom eigentlichen Temperaturfühler getrennt (siehe Abb. 4). Er wird dann an einer anderen Stelle der Kapillarleitung angeordnet, damit keine Überhitzung eintritt und eine gute Bedienbarkeit ermöglicht wird. Der hier angegebene Wickelfühler besitzt eine kleinere Zeitkonstante beim Wärmeübergang und reagiert daher schnell auf Temperaturänderungen.
Die Regeleinrichtung arbeitet proportional, wobei infolge des relativ großen Proportionalbereichs bei Regelungen eine große bleibende Regelabweichung auftritt. Als Meßfühler kann auch ein Dampfausdehnungsthermometer verwendet werden.
Derartige Regeleinrichtungen dienen vorwiegend zur Regelung von

Temperaturen in Heiz- und Kühlanlagen bei den Durchflußmedien Dampf, Sole und Kühlwasser. Große Genauigkeitsanforderungen können nicht gestellt werden. Bei Temperaturen über 200 °C sind diese Regeleinrichtungen nicht zu verwenden.

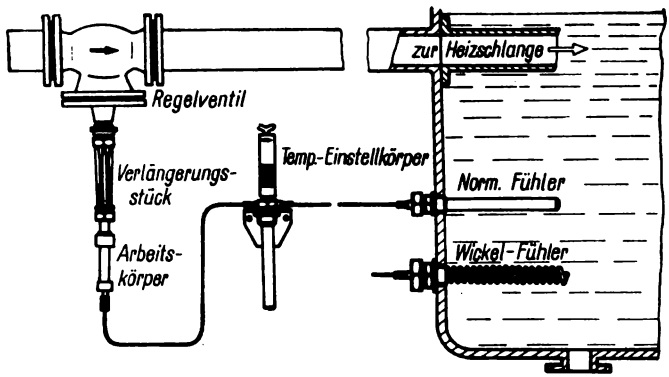


Abb. 4 Trennung des Temperaturfühlers vom Sollwerteinsteller

1.2. Druckregeleinrichtungen

Eine weitere große Gruppe von Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie dient zur Druckregelung. So sind zum Beispiel alle Sicherheitsventile, Überströmventile und Reduzierventile in diese Gruppe einzureihen.
Die größte Gruppe der Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie bei der Druckregelung stellen zweifellos die Sicherheitsventile. Meßfühler und Stellglied stellen hier ein Bauglied dar. Sicherheitsventile dienen als Drucksicherungen bei Druck- und Dampfanlagen. Da die Öffnungs- bzw. Schließkraft bei kleinen Abweichungen vom Sollwert sehr gering sind, reagieren diese Vorrichtungen unempfindlich.
Im Gegensatz zu anderen Regeleinrichtungen spielt sich der Regelungsvorgang bei Sicherheitsventilen nur in einer Richtung ab, da eine Druckerniedrigung nicht ausgeregelt werden kann.

Sicherheitsventile können sowohl integrales als auch proportionales Verhalten haben.
Ein Sicherheitsventil mit integralem Verhalten zeigt Abb. 5.

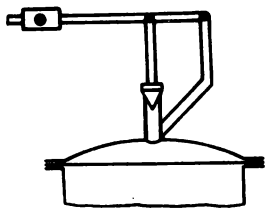


Abb. 5 Sicherheitsventil integral wirkend

Hierbei wird dem Innendruck, der auf den Ventilkegel wirkt, durch einen Belastungskörper an einem Hebelarm entgegengewirkt. Durch die Veränderung der Länge des Hebelarmes, durch Verschieben des Körpers wird die Höhe des Abblasdruckes, d.h. der Sollwert des Reglers eingestellt.
Steigt der Druck im Behälter über die vom Belastungskörper ausgeübte Kraft an, so daß das Kraftmoment größer als das Lastmoment wird, öffnet das Ventil mit vollem Hub, da das Lastmoment infolge des geringen Hubes eine konstante Größe ist.

Wenn an Stelle des Belastungskörpers eine Federbelastung gewählt wird, zeigt das Sicherheitsventil proportionales Verhalten (siehe Abb. 6)

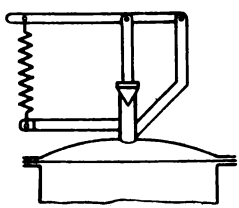


Abb. 6 Sicherheitsventil proportional wirkend

In diesem Falle erhöht sich das Lastmoment mit steigendem Ventilhub durch Ansteigen der Federkraft und ergibt eine proportionale Stellungszuordnung. Überströmventile unterscheiden sich von Sicherheitsventilen im wesentlichen dadurch, daß Meßfühler und Stellglied voneinander getrennt sind.

Der Meßfühler wird durch einen Kolbenantrieb in einem Zylinder (siehe Abb. 7) oder einen Membranantrieb (siehe Abb. 8) gebildet. Das am Meßfühler auftretende Meßkraftmoment aus Kraft mal Hebelarm BC wirkt dem Lastmoment aus Belastungskörper bzw. Federkraft mal Hebelarm AC entgegen. Wird das Meßkraftmoment größer als das Lastkraftmoment, so öffnet das Ventil und läßt durch Überströmen einen Druckausgleich zu.

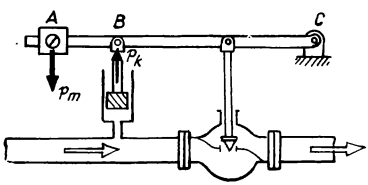


Abb. 7 Überströmventil mit Kolbenantrieb

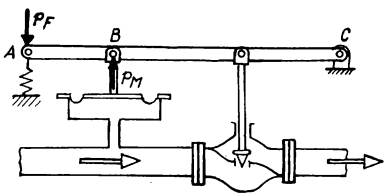


Abb. 8 Überströmventil mit Membranantrieb

Das Überströmventil mit dem Belastungskörper arbeitet integral, das mit Federbelastung proportional. Die wirksame Stellkraft ist wesentlich größer als beim Sicherheitsventil, da die Fläche des Kolbens oder der Membran größer ist als die des Ventilkegels, so daß das Ventil schon auf kleine Regelabweichungen reagieren kann.

Überströmventile eignen sich zur Regelung des Betriebsdruckes durch entsprechendes Abblasen bei Überdruck. Sie werden an Kessel und Druckbehälter angebaut. Die Regelung wirkt wiederum nur einseitig, da eine Druckminderung nicht ausgeregelt werden kann. Durch geeignete Wahl der Stellkraft bzw. der wirksamen Hebelarmlänge lassen sich diese Regeleinrichtungen so auslegen, daß mit ihnen in Druckbehältern oder Druckleitungen Betriebsdrücke mit einer Sicherheit eingehalten werden, wie sie für viele Produktionsvorgänge besonders in der chemischen Industrie vorgeschrieben sind.

Zur Reduzierung von Drücken in Dampf- und Druckluftanlagen dienen Reduzierventile. Sie werden meist zusammen mit einem Schmutzfilter und einem Handventil als Reduzierstation ausgeführt. Ihren prinzipiellen Aufbau zeigt Abb. 9.

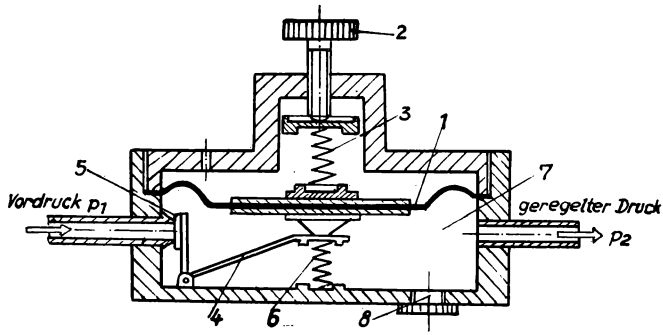


Abb. 9 Reduzierstation

Der Vordruck p 1 wird hierbei auf einen geregelten niedrigeren Druck p 2 reduziert. Das Reduzierventil besitzt als Meßfühler eine federbelastete Membran, wobei der Sollwert durch Veränderung der Stellung der Rändelschraube (2) und damit der Kraft der Feder (3) einstellbar ist. Das Stellglied wird durch einen Winkelhebel (4) mit Prallplatte (5) und Gegenfeder (6) gebildet. Entsprechend einem eingestellten Sollwert bildet sich im Reduzierraum (7) ein reduzierter Druck aus, der dem von der Feder (3) auf die Membran ausgeübten Druck das Gleichgewicht hält. Der durch die Membran betätigte Winkelhebel gibt die Einlaßöffnung soweit frei, daß sich bei bestimmtem Vordruck der Solldruck ausbilden kann. Sinkt der Druck beispielsweise durch stärkeren Verbrauch in der Entnahmeleitung, so drückt die Membran unter Einwirkung der Feder auf den Winkelhebel und öffnet die Prallplatte weiter, so daß der Druck im Reduzierraum wieder ansteigen kann. Das Reduzierventil arbeitet proportionalwirkend, wobei im Beharrungszustand eine Sollwertabweichung, die bleibende Regelabweichung verbleibt.

Der Druck hinter einem Reduzierventil sinkt bei steigender Entnahme entsprechend der bleibenden Regelabweichung ab. Zur Sicherung des Gehäuses gegen Überdruck dient die Berstscheibe (8). Sie bricht bei zu hohem Druck im Reduzierraum und gibt den Weg nach außen frei.

1.3. Durchflußregeleinrichtung

Eine Durchflußregelung mit einer Regeleinrichtung ohne Hilfsenergie ist nur bedingt möglich. Bei der gebräuchlichsten und häufig anzutreffenden Form wird die Durchflußregelung in diesem Falle auf eine Standregelung zurückgeführt, indem das Prinzip des Danaidenfasses zur Anwendung kommt.
Eine Verwendung einer derartigen Regeleinrichung ist nur bei Durchflußanlagen mit freiem Abfluß, d.h. ohne wesentlichen Gegendruck möglich. Dabei muß vor allem noch darauf geachtet werden, daß die Zuflußmenge ausreicht, damit der Regler innerhalb seines möglichen Stellbereichs arbeiten kann. Sonst sinkt der Flüssigkeitsspiegel zu stark ab.
Bei Flüssigkeitsverteilungsanlagen wird dieses Regelungsprinzip auch zur Einhaltung eines konstanten Speisedruckes beim Verbraucher angewandt.
Zur Durchflußregelung nach dem Prinzip des Danaidenfasses wird in die Regelstrecke, die Durchflußleitung, ein größeres Gefäß mit Zu- und Abfluß eingebaut (siehe Abb. 10).

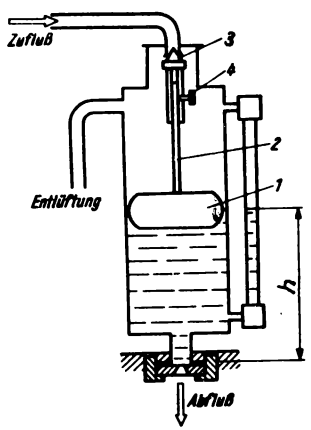


Abb. 10 Durchflußregelung nach dem Prinzip des Danaidenfasses

Der Regler hat die Aufgabe, in diesem Gefäß eine bestimmte Flüssigkeitshöhe aufrecht zu erhalten. Die Größe des Abflusses ergibt sich aus der Nennweite der Abflußöffnung und der Größe des statischen Druckes durch die Flüssigkeitssäule (h). Den Abweichungen vom vergebenen Stand des Flüssigkeitsspiegels folgt ein Schwimmer (1), der über eine Spindel (2) den Ventilkegel (3) im Stellglied betätigt. Dieser Ventilkegel verändert entsprechend der

Höhe der Flüssigkeitssäule den Zufluß.
Steigt der Flüssigkeitsspiegel, so daß sich als Folge davon der Abfluß erhöhen würde, so drosselt der Ventilkegel den Zufluß. Sinkt der Flüssigkeitsspiegel, so erhöht der Ventilkegel den Zufluß, damit sich der Abfluß nicht verkleinert.
Der Regler besitzt proportionales Verhalten mit sehr kleinem Proportionalbereich. Eine Veränderung des Sollwertes kann durch Änderung der Länge der verstellbaren Spindel durch (4) erfolgen. Der sich damit ändernde Sollstand des Flüssigkeitsspiegels bewirkt durch Änderung des statischen Drucks eine Beeinflussung der Abflußmenge.

1.4. Standregelung mit Schwimmerregeleinrichtung

Die Standregelung nach dem Schwimmerprinzip entspricht in ihrer Wirkungsweise etwa der vorhergehend beschriebenen Durchflußregelung.
Bei der Standregelung mit Schwimmerregler (siehe Abb. 11) ist das Übertragungsgestänge zwischen Schwimmer und Stellglied verändert.

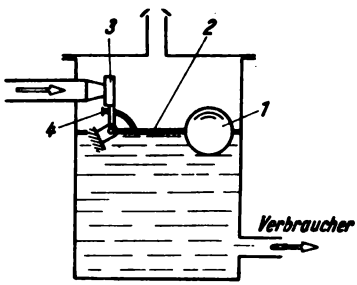


Abb. 11 Standregelung mit Schwimmerregler

Die Bewegung des Schwimmers (1) wird über einen Winkelhebel (2) auf eine Schließplatte (3) übertragen, die den Zulauf entsprechend des Flüssigkeitsstandes drosselt oder freigibt. Der Proportionalbereich ist klein, so daß das Stellglied schon bei kleinem Abstand der Schließplatte von der Zulauföffnung den maximalen Flüssigkeitsstrom freigibt. Der Sollwert kann durch Änderung der Winkeleinstellung (4) in kleinen Grenzen variiert werden.

Eine derartige Schwimmerregeleinrichtung ist nur anwendbar bei der Vorratshaltung von Flüssigkeiten unter geringem Druck. Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete sind die Schwimmerkondenstöpfe (siehe Abb. 12).

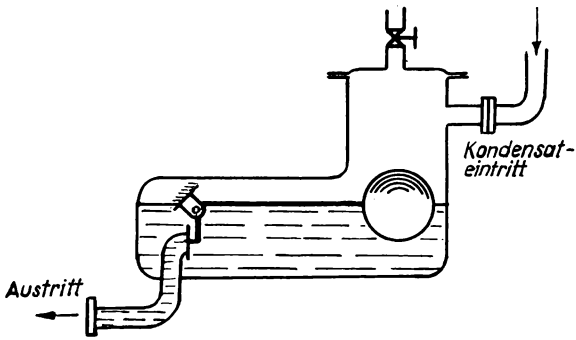


Abb. 12 Schwimmerkondenstopf

Bei Heizanlagen mit Dampfspeisung fällt in jedem Falle Kondensat mit mehr oder weniger Druck an. Aufgabe der Kondenstöpfe ist es, das Kondensat aus dem Druckraum zu entspannen, ohne daß nachdrückender Dampf durchbricht. Durch die Einlauföffnung tritt das abtropfende Kondensat in den Kondenstopf und sammelt sich dort an. Der Schwimmerregler regelt die Höhe des sich sammelnden Kondensates, da bei leergelaufenem Topf der Dampf durchschlägt. Läuft der Topf über, so verschlechtert sich der Wirkungsgrad des Dampferhitzers.
Mit dem Ansteigen der angesammelten Kondensatmenge beginnt der Schwimmer sich zu heben. Damit wird die Auslaßöffnung durch die Schließplatte entsprechend der zufließenden Kondensatmenge freigegeben.

Zusammenfassung

Bei Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie bilden Meßfühler, Regler und Stellglied eine Geräteeinheit. Die Geräte sind in ihrem Aufbau unkompliziert, weisen eine geringe Störanfälligkeit auf,

stellen keine hohen Ansprüche in bezug auf die Wartung und sind relativ billig gegenüber Reglern mit Hilfsenergie. Hauptanwendungsgebiete der Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie sind einfach Aufgaben der Temperaturregelung, Druckregelungen, Standregelungen und in beschränktem Maße Durchflußregelungen.
Die Genauigkeitsansprüche dürfen bei Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie nicht sehr hoch gestellt werden und die am Stellglied erforderliche Stellkraft darf ebenfalls nicht besonders groß sein.

Wiederholungsfragen

1. Welchen Einfluß hat der meist recht große Proportionalbereich der Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie auf deren Einsatzmöglichkeiten?

2. Warum können von den Stellgliedern in Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie keine großen Leistungen aufgebracht werden?

3. Welche Vor- und Nachteile bietet der gerätemäßige Aufbau der Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie?

4. Welche Voraussetzung muß erfüllt sein, um Regeleinrichtungen ohne Hilfsenergie für Stand- oder Durchflußregelungen einzusetzen?

2. Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie

Reicht die vom Meßfühler beim Meßvorgang aufgebrachte Energie nicht aus, um das Stellglied zu betätigen, dann muß Hilfsenergie zum Verstellen verwendet werden. Bei den Regeleinrichtungen mit Hilfsenergie wird die vom Meßfühler gemessene physikalische Größe durch Energiezufuhr verstärkt. Das dem Regler zugeführte Meßsignal steuert die Hilfsenergie so, daß diese leistungsstark das Stellglied bewegen kann. Die Verwendung von Hilfsenergie ermöglicht es dem Konstrukteur von Regelungsgeräten die Regler mit dem für die verschiedenen Regelaufgaben notwendigen Übertragungsverhalten auszurüsten. Diese Gesichtspunkte gelten unabhängig davon, ob elektrische, hydraulische oder pneumatische Hilfsenergie zur Anwendung gelangt. Auch die Kombination verschiedener Hilfsenergien ist möglich.
Pneumatische Steuerungs- und Regeleinrichtungen sind vor allem in der chemischen Industrie weit verbreitet. Das hat seine Ursache darin, daß derartige Regeleinrichtungen explosionssicher sind und bei guter Betriebssicherheit einfachen Aufbau und einfache Bedienbarkeit miteinander vereinen. Außerdem ist das stetige Stellverhalten pneumatischer Stellglieder von großem Vorteil.

2.1. Prinzip und Wirkungsweise

Das vom Meßfühler erfaßte Meßsignal steuert mit Hilfe geeigneter Bauelemente im Regler die Hilfsenergie (in unserem Falle Druckluft) so, daß das Stellglied in gewünschter Weise betätigt wird. Die als Hilfsenergie verwendete Druckluft, auch Zuluft genannt, wird in den meisten Fällen mit einem Druck von 1,2 kp/cm^2 der Regeleinrichtung zugeführt. Dieser Luftdruck wird als Vordruck bezeichnet und wird über eine Reduzierstation aus dem normalen Druckluftnetz eines Werkes oder einer Einzelkompressoranlage entnommen.
An einer einfachen Standregelung läßt sich die Grundarbeitsweise einer Regeleinrichtung mit pneumatischer Hilfsenergie gut erkennen (siehe Abb. 13).

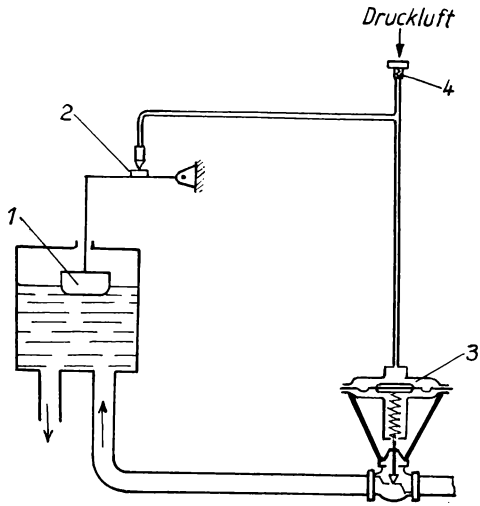


Abb. 13 Grundaufbau einer Regeleinrichtung mit pneumatischer Hilfsenergie

Der Schwimmer (1) als Meßfühler steuert über ein Gestänge ein Düse-Prallplatte-System (2) und damit die Steuerluft zu einem pneumatischen Stellglied (3). Die Druckluft wird über die Druckluftstation mit Vordrossel (4) zugeführt. Ist die Düse durch Abheben der Prallplatte geöffnet (Höhenstand zu tief), kann der Luftdruck am Stellglied nicht wirksam werden und das Ventil ist geöffnet. Wird durch Heben des Schwimmers mit Hilfe der Prallplatte die Düse geschlossen, so kann die Druckluft durch Druckanstieg im Stellglied das Ventil schließen. Je nach Lage der Prallplatte zur Düse können sich in der Steuerleitung zum Stellglied verschiedene Drücke und damit entsprechende Ventilstellungen je auch Schwimmerlage einstellen.

2.2. Grundbauelemente von Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie

Die verschiedenen Typen von Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie bestehen in ihrem konstruktiven Aufbau aus

immer wiederkehrenden Grundbauelementen wie Druckteiler, Düse-Prallplatte, Strahldüse-Fangdüse, Membranverstärker usw.

2.2.1. Druckteiler

Den wichtigsten Bauelementen liegt im Aufbau das Prinzip der Druckteiler zu Grunde. Sie kommen fast in allen pneumatischen Schaltungen vor.
Jeder Druckteiler, auch Kaskade genannt, besteht aus zwei hintereinandergeschalteten Drosselstellen D_1 und D_2. Bei dieser Anordnung tritt ein Druckabfall über dem Bereich des Druckteilers auf.

Die Arbeitsweise ist folgende (siehe Abb. 14):

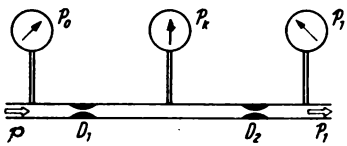


Abb. 14 Prinzip des Druckteilers

An der Drosselstelle D_1 tritt die Druckluft beispielsweise mit einem Druck $p_o = 1{,}2\ kp/cm^2$ ein. Der Druckteiler hat hinter der Drosselstelle D_2 Ausgang in die Atmosphäre. Je nach der Größe der Durchgangsstellen D_1 und D_2 und ihrem Verhältnis zueinander bildet sich im Bereich zwischen den Drosselstellen ein bestimmter Druck aus, der sogenannte Kaskadendruck. Dieser Druck errechnet sich bei p_1 = Atmosphärendruck aus der Faustformel:

$$p_k = \frac{p_o}{1 + \frac{A_2^2}{A_1^2}}$$

Darin sind p_o Vordruck, p_k Kaskadendruck, A_1 Querschnitt der Drossel 1 und A_2 Querschnitt der Drossel 2.

Der Kaskadendruck wird gleich dem Eingangsdruck bzw. Vordruck, wenn die Drosselstelle 2 geschlossen ist.

Der Kaskadendruck geht größenmäßig gegen Null, je mehr die Drosselstelle D_2 gegenüber D_1 geöffnet ist. Da auch bei voller Öffnung der Drossel D_2 ein gewisser Druckabfall über dem Leitungsstück und innerhalb der Drosselanordnung auftritt, kann der Kaskadendruck bei einer solchen Anordnung praktisch nie den Wert Null annehmen. Diese Eigenschaft des Druckteilers berücksichtigt man dadurch, daß der international standardisierte Einheitsbereich für die Normaldruckpneumatik nicht bei Null, sondern bei 0,2 kp/cm^2 beginnt.

2.2.2. Düse-Prallplatte, Kugelsteuerung, Nadelsteuerung

Bei der Kaskadenanordnung wird die Drossel D_2, auch Auslaßdrossel genannt, zur Steuerung des Kaskadendrucks verwendet. Diese Drosselstelle kann konstruktiv unterschiedlich ausgebildet werden. So kann die Drosselung über eine Prallplatte, Nadel oder Kugel u.a. erfolgen.

Abb. 15 zeigt das Prinzipbild einer Kaskade mit Prallplatte und einer Schwenkplatte.

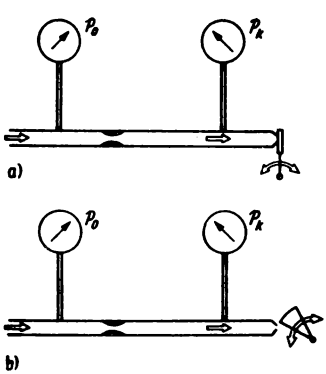


Abb. 15 Kaskade mit Prallplatte - a

Die Auslaßdüse wird dabei über eine bewegliches Organ mehr oder weniger stark verschlossen und damit der Durchtrittsquerschnitt für die Luft an dieser Stelle beeinflußt. Die Größe des Kaskadendruckes wird somit abhängig von der Stellung der Prallplatte vor der Düse. Die Verstellung der Prallplatte oder Schwenkplatte erfolgt über das Meßwerk des Reglers. Die Platte kann zur Düse nur in bestimmten Grenzen verstellt werden. Der Abstand der Düse von der Prallplatte liegt zwischen 0 ... 0,15 mm, der Öffnungsdurchmesser der Düse etwa 1,5 mm je nach Konstruktion.

Man kann den Verlauf des Kaskadendruckes als Funktion des Abstandes Düse - Prallplatte graphisch darstellen (siehe Abb. 16).

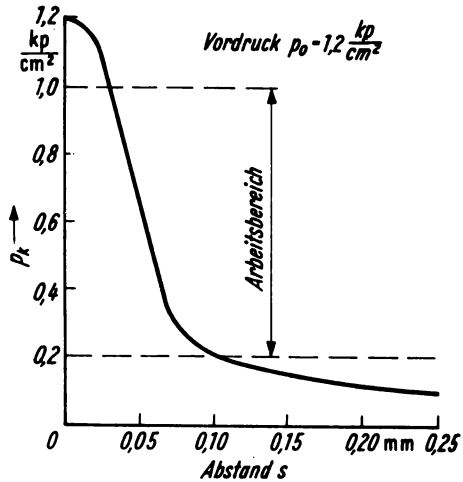


Abb. 16 Kaskadendruck als Funktion des Abstandes Düse - Prallplatte

Bei Gerätekonstruktionen berücksichtigt man nur den Abstand s, bei dem ein annähernd linearer Verlauf der Kurve vorhanden ist.

In dem gebräuchlichen Düsensteuerblock (siehe Abb. 17) sind die notwendigen Elemente wie Prallplatte (1), Auslaßdüse (2), Vordrossel (3), Hebelübersetzung (4) zum Anschluß an das Meßwerk, konstruktiv vereinigt. Bei der ältesten Form der Düsensteuerung findet als Drosselorgan eine Nadel Verwendung. Die Nadel wird entweder direkt oder über einen Hebel mit dem Meßwerk verbunden. In vielen Gerätekonstruktionen drosselt man den Luftstrom über eine Kugel.

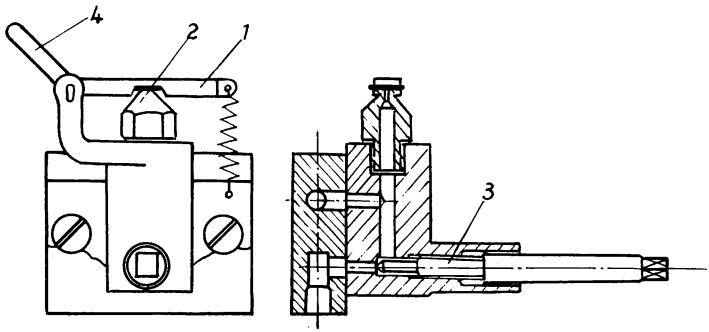


Abb. 17 Düsensteuerblock

Zur Steuerung des Kaskadendruckes bildet man die Auslaßdrossel veränderlich aus. Dies kann erfolgen über ein System Düse-Prallplatte, Düse - Nadel, Düse - Kugel u.a. Zur Ausbildung eines Kaskadendruckes müssen mindestens zwei Drosselstellen vorhanden sein und es muß Luft strömen.

2.2.3. Strahldüse - Fangdüse

Ein weiteres wichtiges Bauelement in Anlagen mit pneumatischer Hilfsenergie ist die Anordnung Strahldüse - Fangdüse. Auch in Regeleinrichtungen mit hydraulischer Hilfsenergie findet man diese Anordnung.
Den prinzipiellen Aufbau mit Steuerfahne zeigt Abb. 18

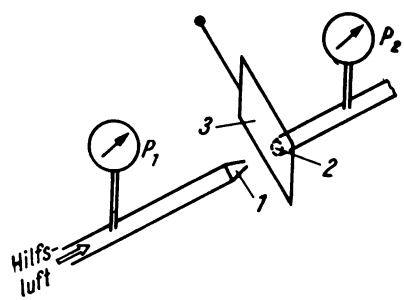


Abb. 18 Steuerprinzip Strahldüse - Fangdüse

Strahldüse (1) und Fangdüse (2) sind axial angeordnet, wobei die Steuerfahne (3) senkrecht zur Strahlachse bewegt wird. Die Druckluft tritt mit dem konstanten Vordruck p_1 in die Strahldüse und gelangt von dort über den freien Luftraum in die Fangdüse. Das Rohr hinter der Fangdüse ist geschlossen, so daß sich darin ein Staudruck ausbilden kann. Zur Steuerung der Druckluft dient die Steuerfahne, die je nach ihrer Lage zum Luftstrom diesen mehr oder weniger von der Fangdüse ablenkt. Ist die Fangdüse vollständig abgedeckt, zeigt das Manometer für den Staudruck p_2 null (Atmosphärendruck) an. Beeinflußt die Fahne den Luftstrom nicht, so ergibt sich der maximale Staudruck. Die Bewegung der Fahne kann wiederum über ein Meßwerk erfolgen.
Über das System Strahldüse - Fangdüse kann man also den Staudruck abhängig von der Lage der Steuerfahne in seiner Größe beeinflussen.

2.2.4. Membranverstärker

In vielen pneumatischen Regeleinrichtungen gibt es Drossel- und Strahldüsensysteme kombiniert mit Membrankammersystemen. Es ergeben sich so Verstärker, mit denen man nicht nur u.a. einen Meßdruck verstärken kann, sondern diese Anordnungen dienen bei entsprechendem Aufbau zum Summieren, Subtrahieren, Multiplizieren, Dividieren usw. von Drücken.
Beim einfachen Verstärker mit Kugelsteuerung (siehe Abb. 19) wird der niedrige Druck in die Kammer (1) eingeleitet.

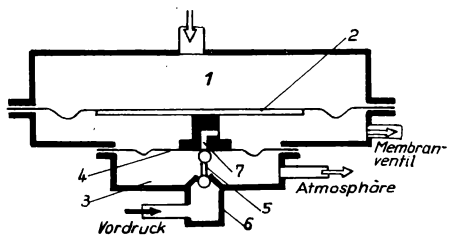


Abb. 19 Membranverstärker mit Kugelsteuerung

Er wirkt auf die große Membran (2). In der Kammer (3) wirkt der verstärkte Druck auf die kleinere Membran (4). Der Verstärkungsgrad der beiden Drücke wird durch das Verhältnis der Membranflächen bestimmt. Beide Membranen sind durch einen Steg fest miteinander verbunden. Die Doppelkugel (5) dient zur Steuerung der Einlaßöffnung (6) und der Auslaßöffnung (7). Steigt beispielsweise der Druck in Kammer (1) an, so drückt das Membranpaar nach unten und die Doppelkugel läßt mehr Druckluft in die Kammer (3) strömen, so daß sich der verstärkte Druck entsprechend erhöht. Sinkt der Druck in der Kammer (1), so wird das Membranpaar nach oben bewegt, wodurch die Doppelkugel die Auslaßöffnung entsprechend freigibt und die überschüssige Luft aus Kammer (3) solange nach außen strömt, bis der verstärkte Druck dem Eingangsdruck entspricht.
Beim Membrankammersystem mit Kaskade (siehe Abb. 20) steuert der in Kammer (1) eintretende Meßdruck über die Membran (2) und die damit in Verbindung stehende Prallplatte (4) den Kaskadendruck.

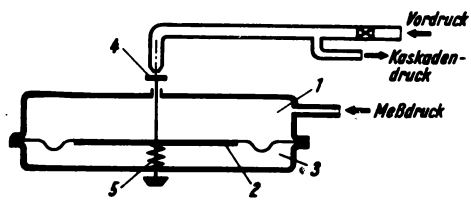


Abb. 20 Membranverstärker mit Kugelsteuerung

Den Gegendruck zum Meßdruck in Kammer (1) bildet die in Kammer (3) auf die Membran drückende Feder (5). Da beide Drücke entgegengesetzt wirken, kann man mit dieser Anordnung bereits pneumatisch subtrahieren. Benutzt man die Feder als Sollwertgeber und stellt der Meßdruck z.B. die Regelgröße dar, so ist der Kaskadendruck ein Maß für die Regelabweichung ($x_w = x - x_s$). Durch entsprechende Anordnung der Membrankammern und Schaltung der Kaskade können so die verschiedensten Rechenvorgänge durch-

geführt werden.

2.2.5. Schnellsteuerer

Der Schnellsteuerer, auch Schnellübertrager genannt, dient dazu, schnell größere Luftmengen zu steuern, damit die an den Regler angeschlossenen eventuell sehr langen Luftleitungen und die Membrankammer des Membranventils, die mehrere 1000 cm^3 Inhalt besitzen kann, schnell aufgefüllt und entlüftet werden können. Diese großen Luftmengen kann der normale Verstärker im Regler in der notwendig kurzen Zeit nicht bewältigen.

Der Schnellsteuerer (siehe Abb. 21) ist ein Verstärker, bei dem das Übersetzungsverhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsdruck 1 beträgt.

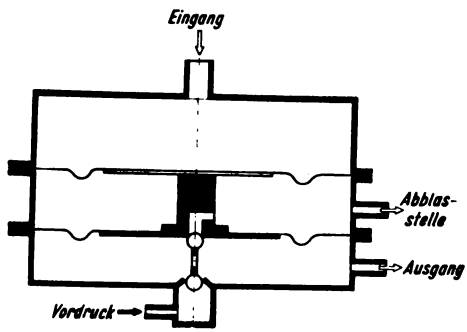


Abb. 21 Schnellsteuerer

Er entspricht im Aufbau dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen System, nur sind die Flächen der Membranen gleich groß. Die Düsenöffnungsquerschnitte sind so bemessen, daß schnell größere Luftmengen ein- bzw. ausfließen können.

2.3. Bauformen der Regler mit pneumatischer Hilfsenergie

Bei der Konstruktion von Reglern unterscheidet man als Hauptarbeiten den Wegvergleichsregler und den Kraftvergleichsregler. Beim Wegvergleichsregler wird der gemessene Wert einer physikalischen Größe, der Istwert der Regelgröße, durch die Meßeinrichtung in eine Bewegung, einen Weg, verwandelt. So dehnt sich beispielsweise bei der Druckmessung ein Faltenbalg aus oder die Bourdonfeder streckt sich; bei der Strommessung dreht sich eine Drehspule. Diese Bewegung wird über ein Gestänge auf das Düse-Prallplatte-System übertragen. Beim Wegvergleichsregler ist daher immer ein Meßfühler zur Erfassung der Regelgröße mit dem Regler vereinigt.
Beim Kraftvergleichsregler werden die verschiedenen Regelgrößen wie Temperatur, Druck, Drehzahl u.a. durch Transmitter (Meßumformer) in einen einheitlichen Druckwert von 0,2 bis 1 kp/cm^2 umgewandelt. Dem Meßdruck wird im Vergleichsglied der Sollwert als Druck entgegengeschaltet und gegeneinander ausgewogen.
Der Kraftvergleichsregler besitzt also meist kein Meßwerk im allgemein gebrauchten Sinne des Begriffs für die Regelgröße, er verwendet hierzu meist einen speziellen Umformer mit Kraftausgang.
Da in modernen Regelanlagen der Einheitsregler, das ist in der DDR ein Kraftvergleichsregler, in Zukunft fast ausschließlich verwendet wird, werden zwei prinzipielle Bauformen, die Regler mit Balgwaage und die Regler mit Membransystem und Kaskadensteuerung im folgenden beschrieben.

2.3.1. Regler mit Balgwaage

Den Aufbau und die Wirkungsweise eines Kraftvergleichsreglers zeigt anschaulich der Balgwaageregler.
Ein Regler muß ein bestimmtes Beharrungs- und Übertragungsverhalten besitzen, damit er an eine Regelstrecke angepaßt, die auftretenden Störgrößen mit großer Genauigkeit und möglichst schnell ausregeln kann. Um dieses Beharrungs- und Übertragungsverhalten zu erreichen, werden Rückführungen eingebaut. Je nach

Art der Rückführung wirkt der Regler als P-Regler, PI-Regler oder PID-Regler. Dabei bewirkt eine starre Rückführung P-Verhalten, eine nachgebende Rückführung PI-Verhalten und eine verzögerte Rückführung PD-Verhalten, wobei durch Kombinationen von Rückführungen auch eine entsprechende Kombination der Verhaltensweise erreicht wird.

2.3.1.1. Balgwaageregler ohne Rückführung

Setzt man auf einen Waagebalken zwei Druckbälge, bringt am Waagebalken eine Prallplatte an, die eine Kaskade steuert, so erhält man einen einfachen Regler mit pneumatischer Hilfsenergie (siehe Abb. 22). (Zur Erläuterung ist dort eine einfache Druckregelstrecke mit eingezeichnet).

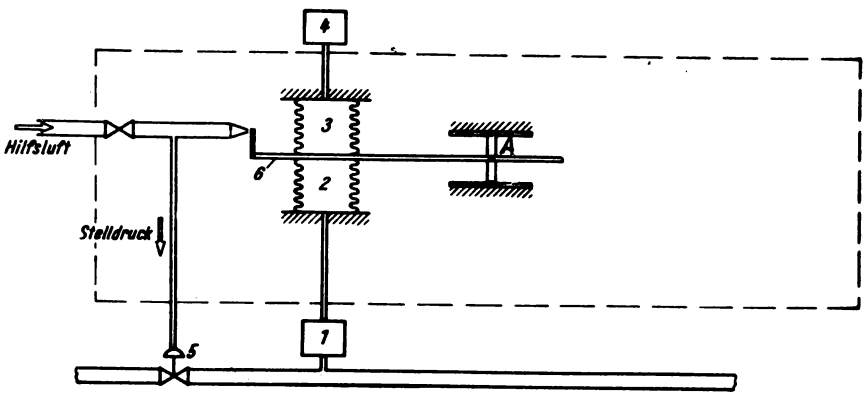


Abb. 22 Balgwaageregler ohne Rückführung

Die Regelgröße, der Druck, wird über einen Transmitter (1) im standardisierten Bereich dem Istwertbalg (2) zugeführt. Der Sollwertbalg (3) erhält seinen Druck über einen Sollwertgeber (4). Die Kaskade steuert ein Regelventil (5), welches mit steigendem Stelldruck schließt. Der Waagebalken (6) ist in A drehbar gelagert.

Stimmen Sollwert und Istwert z.B. mit 0,6 kp/cm^2 überein und deckt dabei die Prallplatte die Düse zur Hälfte ab, so entsteht ein Stelldruck von 0,6 kp/cm^2, der das Ventil in Mittelstellung bringt. Erhöht sich, durch eine Störung in der Regelstrecke, der Druck im Istwertbalg um einen kleinen Betrag, so wird die Prallplatte die Düse sofort ganz schließen, da der Aussteuerbereich der Düse nur sehr klein ist. Dies hat zur Folge, daß das Ventil schließt. Dabei sinkt der Druck in der Regelstrecke stark ab, was als Reaktion ein Öffnen der Düse, durch Überwiegen des Sollwertdruckes, mit sich bringt. Dies wird sich im folgenden wiederholen, so daß im Regelkreis Schwingungen auftreten. Die Ursache hierfür ist, daß der Regler durch seinen kleinen Aussteuerbereich einen sehr kleinen Proportionalbereich hat, der ihn praktisch zum Zweipunktregler werden läßt. Der Regler wird dadurch für eine stetige Regelung unbrauchbar.

2.3.1.2. Balgwaageregler mit starrer Rückführung

Setzt man auf die Gegenseite des Waagebalkens zwei weitere Bälge, einen parallelgeschalteten Sollwertbalg (7) und einen Rückführbalg und leitet den Steuerdruck (Stelldruck) vom Ausgang des Reglers zum Rückführbalg (8), so erhält man einen Regler mit starrer Rückführung (siehe Abb. 22a).

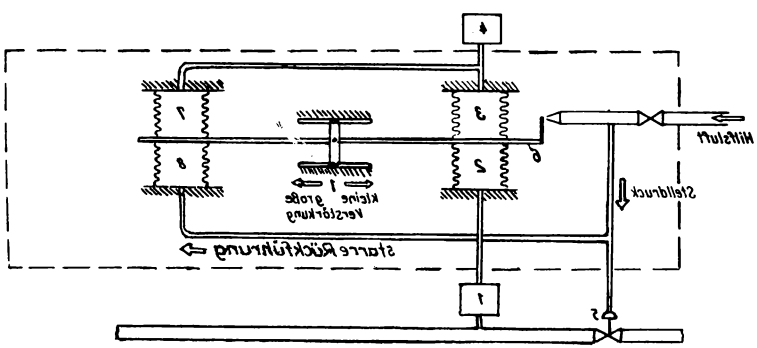


Abb. 22a Balgwaageregler mit starrer Rückführung

Befindet sich die Waage im Gleichgewicht, d.h. wirkt in allen vier Bälgen der gleiche Druck, so ergibt sich wieder ein Ausgangsdruck von beispielsweise 0,6 kp/cm^2. Die Lagerstelle des Waagebalkens ist bei dieser Ausführung verschiebbar angeordnet und befindet sich in Stellung 1. Steigt durch eine Störung in der Regelstrecke der Druck im Istwertbalg um beispielsweise 0,1 kp/cm^2 an, so bedingte dies sofort eine Verschiebung der Platte vor die Düse. Der Stelldruck steigt an. Das Ventil würde sofort schließen, wenn nicht der Rückführbalg bei sich erhöhendem Stelldruck ohne Verzögerung der durch den Istwertbalg hervorgerufenen Verlagerung des Waagebalkens entgegenwirken würde. Der Rückführdruck wirkt über den Rückführbalg in entgegengesetzter Richtung auf den Waagebalken und kompensiert die Wirkung der Istwertdruckänderung, indem er die Platte vor der Düse wieder etwas zurückführt. Es wird so verhindert, daß der Aussteuerbereich der Düse schon bei der kleinsten Regelabweichung voll durchfahren wird. Durch diese starre Rückführung wird jedem Wert der Regelabweichung ein ganz bestimmter Stelldruck zugeordnet, d.h., man erhält einen proportional wirkenden Regler. Der Einfluß der Rückführung wird bestimmt durch die Größe des rückgeführten Druckes und durch die Lage des Drehpunktes des Waagebalkens. Je weiter der Drehpunkt in Richtung Soll-Istwertbalg verlagert wird, um so kleiner wird der Verstärkungsfaktor und um so größer der Proportionalbereich. Mit Hilfe dieser Einstellvorrichtung kann der Proportionalbereich den Notwendigkeiten angepaßt werden. Selbstverständlich muß die für den Proportionalregler charakteristische bleibende Regelabweichung beachtet werden.

2.3.1.3. Balgwaageregler mit nachgebender Rückführung

Man kann auch den Rückführbalg mit dem zweiten Sollwertbalg durch eine Luftleitung mit zwischengeschalteter Drossel verbinden und die Verbindung der beiden Sollwertbälge trennen (siehe Abb. 23). Zunächst herrsche in allen vier Bälgen der gleiche Druck von 0,6 kp/cm^2. Der Waagebalken befindet sich wieder im Gleichgewicht und der Stelldruck beträgt 0,6 kp/cm^2.

Die Drossel D_N (9) sei etwas geöffnet.

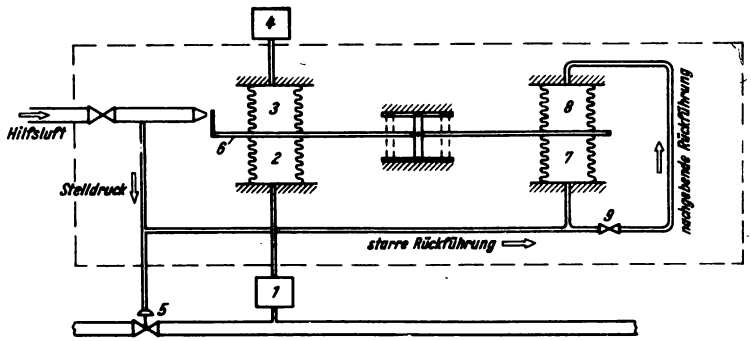


Abb. 23 Balgwaageregler mit nachgebender Rückführung

Tritt an der Regelstrecke durch eine Störgröße eine Druckerhöhung auf, die einen Druckanstieg im Istwertbalg auf 0,7 kp/cm^2 und damit eine Regelabweichung von 0,1 kp/cm^2 zur Folge hat, so ergibt sich zunächst eine proportionale Änderung der Stellgröße entsprechend der Regelabweichung, da sofort die starre Rückführung wirkt. Diesem proportionalen Vorgang schließt sich der Nachstellvorgang (integral) an, indem sich langsam über die D_N-Drossel der Nachstellbalg auffüllt. Drossel und Nachstellbalg bilden die nachgebende Rückführung.
Die Kraft im Nachstellbalg wirkt der Kraft im Rückführbalg entgegen, wobei der Waagebalken mit der Prallplatte solange verstellt wird, bis sich die Drücke im Nachstellbalg und Rückführbalg ausgeglichen haben. Am Waagebalken muß im Beharrungszustand Gleichgewicht herrschen. Dies bedeutet, wenn der Rückführdruck gleich dem Nachstelldruck ist, muß auch der Istwertdruck gleich dem Sollwertdruck sein. Die nachgebende Rückführung bewirkt ein zusätzliches integrales Verhalten, durch welches der Regler die Möglichkeit erhält, die Regelabweichung vollständig

auszuregeln. Die Größe der Nachstellzeit T_N wird an der Drossel D_N eingestellt. Bei geschlossener Drossel zeigt der PI-Regler annähernd proportionales Verhalten, da die Nachstellung erst nach sehr langer Zeit erfolgen kann.

2.3.1.4. Balgwaageregler mit nachgebender und verzögerter Rückführung

Ordnet man in der Rückführleitung zum Rückführbalg eine Drossel an (siehe Abb. 24) und behält sonst die bisherige Anordnung bei, so erhält man einen Regler mit nachgebender und verzögerter Rückführung. Durch die verzögerte Rückführung ergibt sich ein zusätzliches differentiales Verhalten.

Zu Beginn soll wieder in allen vier Bälgen der gleiche Druck von 0,6 kp/cm^2 herrschen und der Waagebalken sich im Gleichgewicht befinden. Der Stelldruck beträgt 0,6 kp/cm^2. Die Drosseln D_v(10) und D_N (9) sind nicht ganz geschlossen.

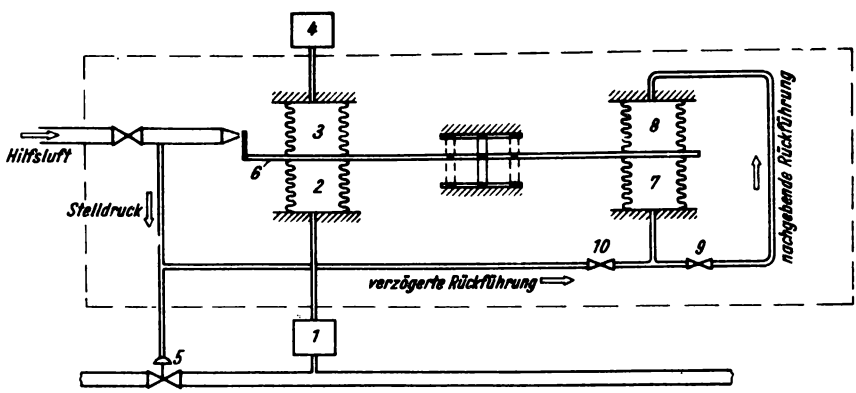


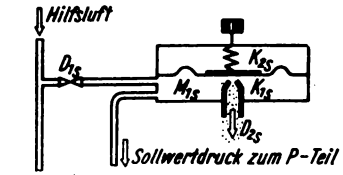
Abb. 24 Balgwaageregler mit nachgebender und verzögerter Rückführung

Bei einer Erhöhung des Druckes im Istwertbalg durch das Auftreten einer Störgröße in der Regelstrecke wird das Gleichgewicht am Waagebalken gestört. Dabei wird die Düse stärker abgedeckt, wodurch der Stelldruck augenblicklich ansteigt - und zwar über - mäßig stark, da die verzögerte Rückführung durch die Drossel D_v nicht sofort wirksam wird. Der Regler arbeitet somit zu Beginn einer Störung wie ein Regler ohne Rückführung. Erst nach einer gewissen Zeit wirkt der Druckanstieg über D_v auch im Rückführbalg, so daß die am Anfang eingeleitete Stelldruckänderung wieder zurückgenommen wird.
Durch diese verzögerte Rückführung wird das Wirken einer großen Regelabweichung anfangs vorgetäuscht, um den Regelvorgang schnell einzuleiten. Im Anschluß daran setzt der Nachstellvorgang über die nachgebende Rückführung ein, der dem Regler ein zusätzliches integrales Verhalten verleiht.
Die Größe der Vorhaltzeit wird an der Vorhaltdrossel eingestellt. Bei geschlossener Drossel arbeitet der Regler wie ohne Rückführung. Bei ganz geöffneter Drossel arbeitet der Regler proportional - integral wirkend.
Durch die verzögerte Rückführung erhält also der PI-Regler noch ein zusätzliches differentiales Verhalten.

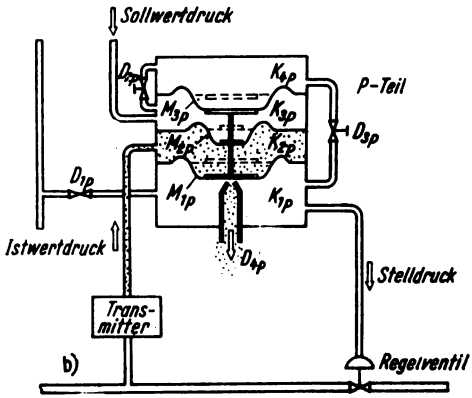
2.3.2. Kraftvergleichsregler mit Membransystemen und Druckteiler

Bei vielen modernen Reglerkonstruktionen wird das Prinzip des Kraftvergleichs mittels Membransystemen angewendet. Diese Regler arbeiten mit Membranverstärkern und Kaskadensteuerung. Der einheitliche Aufbau der Membrankammern gestattet es, sie durch Bausteinaufbau in Büchsen- oder Stapelbauweise oder in Gehäusebauweise auszuführen.
Durch die Kombination verschiedener Membrankammersysteme mit Volumen und pneumatischen Widerständen kann das notwendige Übertragungsverhalten wie P-, PI-, PID-oder PD-Verhalten erreicht werden (siehe Abb. 25 und 26). Das entsprechende Verhalten wird jeweils in einer bestimmten Baugruppe erzeugt.

Abb. 25 Arbeitsweise eines Kraftvergleichsreglers mit Membransystemen und Druckteilersteuerung

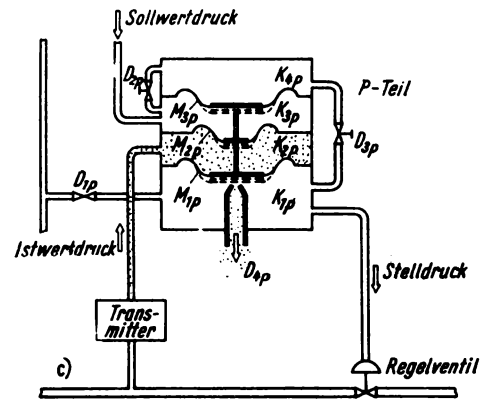


a)



b)

Abb. 25 a und b



c)

Abb. 25 c

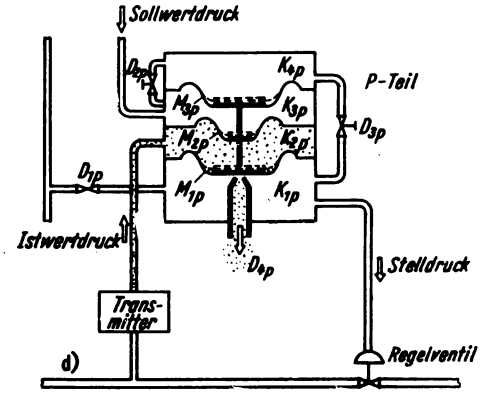


Abb. 25 d

2.3.2.1. Sollwertgeber

Der Sollwert muß dem P-Teil als Druck zugeführt werden. Dieser wird im Sollwertgeber wie folgt erzeugt:
In die Kammer K_{1S} (siehe Abb. 25a) strömt über eine Vordrossel D_{1S} Druckluft, so daß sich je nach Lage der Membran M_{1S} zur Düse D_{2S} einen Druck aufbauen kann. Durch die Feder in Kammer K_{2S} wird ein entsprechender Sollwert eingestellt, der mit dem Druck in Kammer K_{1S} ausgewogen wird. Der sich in Kammer K_{1S} aufbauende Druck entspricht dem gewünschten Sollwert.
Die Drosseln D_{1S} und D_{2S} bilden somit eine Kaskade. Der Kaskadendruck entspricht dem Sollwert.

2.3.2.2. Proportionalteil

Im P-Teil wird die Regelabweichung x_w gebildet und ein ihr proportionaler Stelldruck für das Stellglied auf folgende Weise erzeugt:
In die Kammer K_{3P} gelangt der Sollwertdruck. Hier wird er mit dem in Kammer K_{2P} wirkenden Istwertdruck, der über einen Transmitter zugeführt wird, verglichen. Die über die Vordrossel D_{1P}

in die Kammer K_{1P} eingeleitete Druckluft kann je nach der Lage der Membran M_{1P} zur Düse D_{4P} einen Druck aufbauen, der als Rückführdruck von unten auf M_{1P} wirkt, gleichzeitig aber als Stelldruck das Stellglied betätigt. Über die Drossel D_{3P} wird dieser Druck auch in Kammer K_{4P} geleitet und strömt von hier über eine Drossel D_{2P} in Kammer K_{3P}. D_{2P} und D_{3P} bilden wieder eine Kaskade. Der Druck in K_{4P} ist der entsprechende Kaskadendruck und wirkt auf die Membran M_{3P}.
Nimmt man an, daß in allen 4 Kammern der gleiche Druck herrsche und die Drossel D_{2P} etwas geöffnet sei, so ergibt sich bei steigendem Istdruck folgender Vorgang:
Der höhere Istdruck gegenüber dem Solldruck wirkt auf das über eine feste Stelze verbundene Membransystem M_{1P}, M_{2P}, M_{3P} (siehe Abb. 25b) in Richtung der Düse D_{4P}, weil die Membranfläche M_{2P} kleiner als die von M_{1P} und M_{3P} ist. Hierdurch kann weniger Druckluft abströmen, so daß der Druck in Kammer K_{1P} steigt. Dieser wirkt als Rückführdruck von unten auf das Membransystem und führt dieses wieder zurück (siehe Abb. 25c). Es ergibt sich somit eine starre Rückführung. Gleichzeitig wirkt er aber als Vordruck über D_{3P} auf die Kaskade D_{3P}, D_{2P}. Es ergibt sich daraus ein Kaskadendruck in K_{4P}, der von ober auf das Membransystem drückt, so daß ein Teil des Rückführdruckes in K_{1P} durch den Druck in K_{4P} kompensiert wird (siehe Abb. 25d). Je nach Einstellung der Drossel D_{3P} wirkt der Rückführdruck in Kammer K_{4P} stärker oder schwächer, wodurch die starre Rückführung mehr oder weniger wirksam wird. Die Drosseleinstellung D_{3P} bestimmt somit die Größe des Proportionalbereichs des Reglers.

2.3.2.3. Differentialteil

Die Differentialwirkung wird in einem Differentialteil (siehe Abb. 26) erzeugt. In der Kammer K_{1V} bildet sich zwischen D_{1V} und D_{3V} ein Kaskadendruck. Steigt der in Kammer K_{3V} wirkende Istdruck, so erzeugt er in K_{1V} einen verstärkten Druck durch Aussteuerung der Düse D_{3V} entsprechend dem Verhältnis der Flächen (M_{1V} : M_{2V}) der fest miteinander verbundenen Membranen.

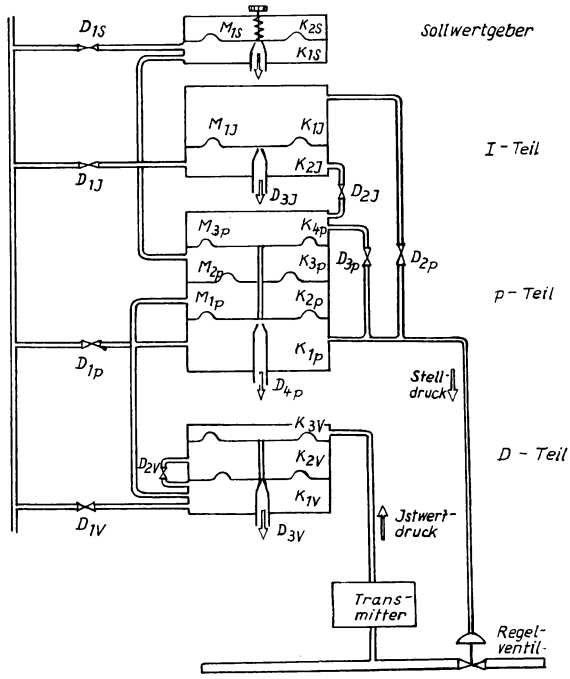


Abb. 26 Gesamtaufbau eines PID-Reglers

Der Istwert, der in Kammer K_{3V} wirkt, wird somit überhöht in Kammer K_{1V} dargestellt. Diese Überhöhung bzw. Verstärkung hält aber nicht lange an, da sich über die Drossel D_{2V} der gestiegene Druck von Kammer K_{1V} auch in Kammer K_{2V} auswirkt und so dem Istwertdruck in Kammer K_{3V} entgegen arbeitet. Die Istwertüberhöhung wird so nach einer gewissen Zeit zurückgenommen.

Die Einstellung der Drossel D_{2V} bestimmt die Länge der Vorhaltzeit T_v.

2.3.2.4. Integralteil

Das integrale Verhalten wird erreicht, indem durch den I-Teil der Druck in Kammer K_{4P} (Gegendruck zur Rückführung) so beeinflußt wird, daß die starre Rückführung unwirksam wird. Zwischen den Drosseln D_{1I} und D_{3I} entsteht in Kammer K_{2I} ein Kaskadendruck. Der Druck aus K_{1P} wirkt über die Drossel D_{2P} auf die große Kammer K_{1I}, wodurch eine Beeinflussung des Kaskadendruckes in K_{2I} herbeigeführt wird, der wiederum in Kammer K_{4P} wirkt und das Membransystem M_{1P}, M_{2P}, M_{3P} solange nachstellt, bis der Istdruck gleich Solldruck erreicht ist. Die Nachstellzeit wird durch das Kammervolumen in K_{2I} und den Widerstand durch Drossel D_{2I} bestimmt. Sie wird am Regler mit Hilfe der Nachstelldrossel D_{2I} eingestellt.

So entsteht durch das Zusammenwirken von Membrankammersystemen mit Kaskaden ein moderner Kraftvergleichsregler, dessen Systeme sich besonders gut in Stapelbauweise aufbauen lassen. Das entsprechende Übertragungsverhalten wird im Prinzip wieder durch die bekannten Rückführungen erreicht.

2.4. Regeleinrichtungen industrieller Fertigung

Von der Industrie der DDR werden einige Standardreglertypen gefertigt, mit deren Hilfe sich die Mehrzahl aller Regelungsaufgaben erfolgreich lösen läßt. Die wichtigsten dieser Typen sollen hier kurz betrachtet werden.

2.4.1. Druck- und Temperaturregler des VEB Meßgerätewerk Quedlinburg

Der Regler (siehe Abb. 27) dient zur selbsttätigen Regelung der Temperatur oder des Druckes in Trockenöfen, Heizungsöfen, Klimaanlagen, Raumheizungen, Autoklaven u.a.
Das Übertragungsverhalten des Reglers ist proportional mit festem Proportionalbereich. Im Prinzip ist er als Meßwerkregler aufgebaut.

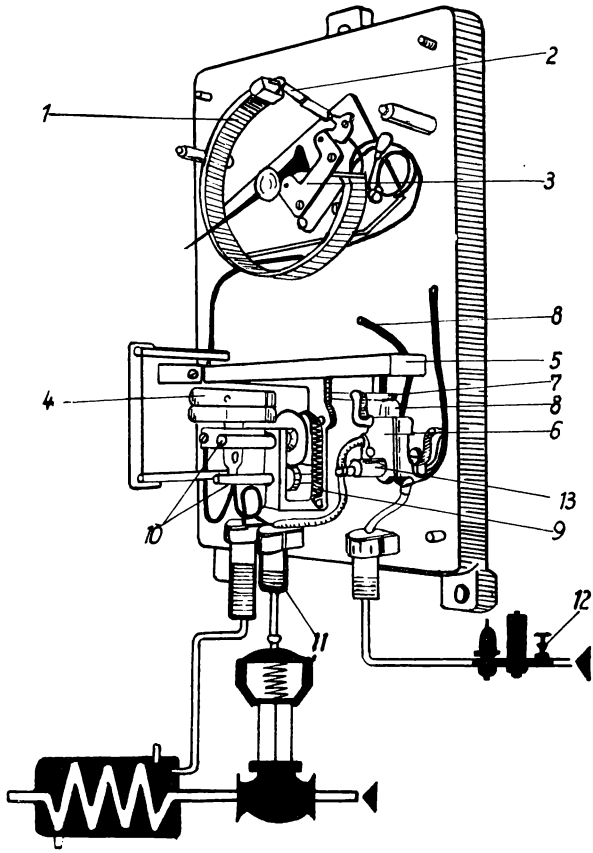


Abb. 27 Aufbau des Druck- und Temperaturreglers vom VEB Meßgerätewerk Quedlinburg

Der Temperaturregler besitzt als Meßeinrichtung ein Tensionssystem, das als Dampfdruckthermometer ausgebildet ist, während beim Druckregler lediglich das Tensionsrohr durch ein Druckrohr ersetzt wird. Zur Steuerung der Druckluft dient ein Düsensteuerventil (Düse - Prallplatte) oder ein Kugelsteuerventil.
Die Beschreibung der Wirkungsweise bezieht sich auf den Temperaturregler. Der Fühler wird der Temperatur am Meßort ausgesetzt. Je nach der hier herrschenden Temperatur bewirkt der in der Meß-

einrichtung erzeugte Dampfdruck eine Dehnung der Membrankapsel (4) und der Rohrfeder (1). Die Wegänderung der Rohrfeder wird mittels Zugstange (2) auf ein Zeigerwerk (3), die Dehnung der Membrankapsel über eine Steuerklappe (5) auf ein Steuerventil (6) mit Drossel und Auslaßdüse übertragen. Im Düsensteuerventil wird entsprechend der Lage der Prallplatte (7) vor der Düse (8) ein, der Regelabweichung proportionaler Stelldruck erzeugt, der über die Leitung (11) dem Stellglied zugeführt wird. An der Leitung (8) ist das Stelldruckmanometer angeschlossen. Über eine Reduzierstation (12) wird die Druckluft mit einem Vordruck von 1,2 kp/cm^2 dem Düsensteuerventil zugeführt. An Vorrichtung (9) wird der Sollwert eingestellt. Diese Vorrichtung wirkt so auf die Steuerklappe, daß am Düsensteuerventil sofort die Regelabweichung wirksam wird. Die Achsen (10) dienen zur Sollwerteinstellung und tragen den Sollwertzeiger. Das Düsensteuerventil kann auf zwei verschiedene Arten ausgebildet werden: 1. Bei steigendem Istwert steigt der Stelldruck an - direktwirkend, oder 2. bei steigendem Istwert fällt der Stelldruck ab - indirekt wirkend.

2.4.2. Einheitsregler des VEB Meßgerätewerk Quedlinburg

Dieser Einheitsregler mit P-, PI- und PID-Verhalten ist in Verbindung mit entsprechenden Meßumformern mit pneumatischem Einheitsausgang zur Regelung aller vorkommenden Regelgrößen verwendbar. Durch sein einstellbares Übertragungsverhalten kann er an schwierige Regelstrecken angepaßt werden. Er dient u.a. zur Regelung von Destellationskolonnen, Wärmeaustauschern, p_H-Regelstrecken usw.
Der Regler (siehe Abb. 28) ist als Kraftvergleichsregler aufgebaut. Die einzelnen Membran-Kaskadensysteme zur Erzeugung des Sollwertes, des PID-Verhaltens und der Schnellsteuerung sind mit 2 Manometern in einem geschlossenen, in das Gehäuse einsteckbaren Schub untergebracht. Dieser Schub ist über Steckkupplungen zum schnellen Auswechseln mit dem Gehäuse verbunden. An den Steckkupplungen sind gehäuseseitig 3 Rückschlagklappen angeordnet, so daß die Druckluft beim Entfernen des Einsatzes

nicht entströmen kann. Das Baukastensystem des Reglers gestattet einen leichten Umbau in die verschiedensten Typen.

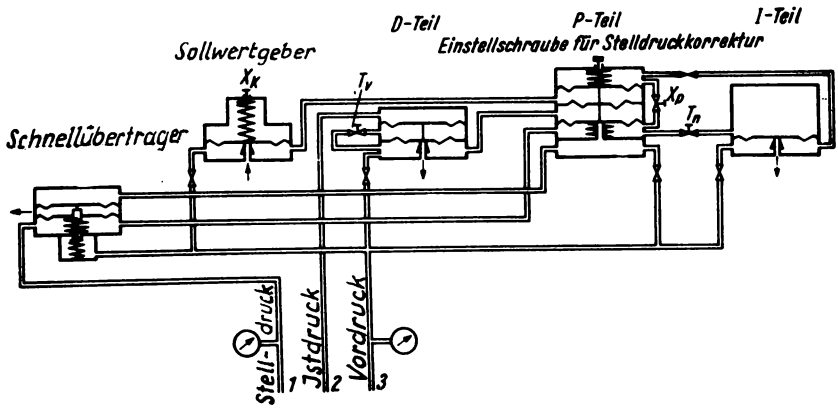


Abb. 28 Prinzip des PID-Einheitsreglers vom VEB Meßgerätewerk Quedlinburg

Die Wirkungsweise des Reglers stimmt nach dem Schaltungsaufbau im Prinzip mit demjenigen überein, der in Abb. 26 gezeigt wurde. Der Regler besitzt noch eine zusätzliche Rückführung über den Schnellübertrager zur Stabilisierung. Die zusätzliche Stellschraube am P-Teil dient zur Stelldruckkorrektur, um den Arbeitspunkt des Reglers an das Stellglied etwas anpassen zu können.

2.4.3. Kombi-Baukastensystem

Das Kombi-Baukastensystem im standardisierten Normaldruckbereich wird im VEB GRW Teltow hergestellt. Mit Hilfe der Geräte dieses Systems wird es möglich, alle wesentlichen Regel- und Steueraufgaben der Verfahrenstechnik zu lösen. Durch Verbindungsgeräte ist es auch möglich, in das elektrische Einheitssystem überzugehen.
Die Geräte des Baukastensystems setzen sich aus standardisierten Bauteilen zusammen. Die verschiedenen Kombinationen dieser Bauteile gestatten den Aufbau aller in Frage kommenden Meß-,

Steuerungs- und Regelungsgeräte. Alle Geräte arbeiten nach dem Kraftvergleichsprinzip bei Normaldruck im standardisierten Bereich (0,2-1,0 kp/cm^2). Für Regelungsaufgaben werden aus den Bauteilen Transmitter, Einheitsregler und Meßwerkregler zusammengestellt. Hierzu kommen noch die Einheitsanzeige- und -registriergeräte, die das System nicht unmittelbar umfaßt. Jedes Gerät setzt sich aus den Baugruppen Meßwerk und Vorsatz zusammen, die je nach dem Verwendungszweck aus entsprechenden Bauteilen aufgebaut sind.
Abb. 29 zeigt eine Übersicht über die Bauteile des Kombisystems mit seinen Geräten und deren Zusammenwirken.

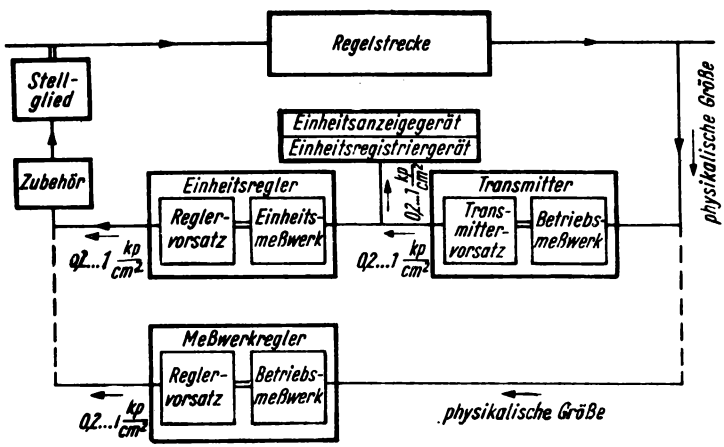


Abb. 29 Übersicht über die Bauteile des Kombi-Baukastensystems

Transmitter mit Einheitsreglern werden bei größeren Regelungsanlagen und bei der Zentralisierung der Regler und Meßgeräte in Meßwarten eingesetzt. Meßwerkregler hingegen werden in einfacheren Regelungsanlagen eingebaut, wenn der Meßwerkregler in unmittelbarer Nähe der Regelstrecke angebracht wird. Neben den Hauptgeräten gibt es noch eine größere Anzahl von Zusatzbauteilen und

Geräten wie Kontaktvorsatz, Schaltgeräte, Invertierungsglied usw. Die Arbeitsweise entspricht derjenigen der Regler mit Membransystem und Kaskadensteuerung, die im vorhergehenden Abschnitt behandelt wurden.

2.5. Pneumatische Stellglieder

2.5.1. Membranregelventil

In verfahrenstechnischen Anlagen dienen oft pneumatische Membranregelventile (siehe Abb. 30) als Stellglieder.

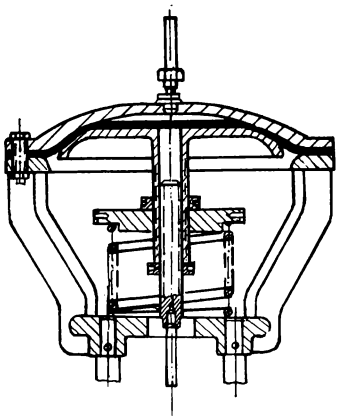


Abb. 30 Schnitt durch ein Membranregelventil

Das wird bedingt durch die vielfältige Anwendung der Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie. Diese Ventile haben den Vorteil der proportionalen Wirkungsweise, absoluter Betriebssicherheit bei einfachem Aufbau geringstem Verschleiß und kleinstem Wartungsaufwand und außerdem sind sie auch in explosionsgefährdeten Produktionsanlagen zu verwenden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß neben der eigentlichen Regelung die Fernstellung durch Handversteller in einfacher Weise zu lösen ist.

Als Stellmotor dient ein Membranantrieb, der auf dem Ventilgehäuse sitzt und die Ventilspindel betätigt. Je nach Ventilgröße und erforderlicher Stellkraft haben die Membranen unterschiedlichen Durchmesser. Die Druckluft tritt in die aus Membran und Membrandeckel gebildete Kammer ein und drückt über die Membran auf den Membranteller. Dadurch wird die Membranspindel so betätigt, daß ein Hubweg entsteht und der Ventilkegel im Ventilsitz bewegt wird. Die Gegenkraft zur Druckluft liefert die Rückholfeder, die die Membranspindel bei Nachlassen des Luftdruckes

nach oben drückt. Das Regelventil selbst unterscheidet sich im Prinzip nicht wesentlich von allgemein üblichen Ventilarten. Auch hier werden zwei Varianten hergestellt. Das direkt wirkende Ventil ist ohne Druckluft geöffnet, der Ventilkegel befindet sich über dem Sitz. Beim indirekt wirkenden Ventil befindet sich der Ventilkegel unter dem Sitz und das Ventil ist ohne Druckluft geschlossen. Ebenso wie bei den normalen Ventilen sind auch bei den Regelventilen Nennweite und Nenndruck die charakteristischen Kenngrößen.

Bei der Verwendung eines Regelventils muß darauf geachtet werden, daß seine Größe und Charakteristik den Bedingungen der Regelstrecke angepaßt werden. In vielen Regelkreisen treten Schwingungen auf, weil die Regelventile falsch ausgelegt sind. Wichtig ist, daß das Regelventil den Durchfluß über den ganzen Stellbereich beeinflussen kann. Entscheidenden Einfluß auf die Charakteristik des Ventils hat auch die Form des Ventilkegels. Durch die Reibung zwischen Stopfbuchsenteil und Spindel und andere Reibungs- und Hemmstellen wird die Stellungszuordnung von Stelldruck zum Hub oftmals verfälscht. Die so entstehende Hysterese macht sich dadurch bemerkbar, daß sich bei einem bestimmten Wert des Stelldruckes beim Öffnungs- und Schließvorgang unterschiedliche Ventilhübe einstellen. Um dies zu verhindern, wird oft ein sogenannter Stellungsmacher oder Positioner angeordnet. Der Stellungsmacher ist ein kleiner Regler, der in Verbindung mit einem besonderen Membrandeckel auf das Membrangehäuse aufgesetzt oder als Anbaupositioner an die Ventilspindel angesetzt wird.

Als Regler (siehe Abb. 31) erhält er die Aufgabe, die Größe des zugeführten Stelldruckes mit der Stellung des Membrantellers und damit der Spindel (1) zu vergleichen und falsche Zuordnungen zu korrigieren. Der Sollwert des Reglers ist somit der Stelldruck in der Kammer (2), der als Kraft über die Membran (3) und den Stößel (11) auf die Wippe (14) wirkt. Der Istwert, der Stellweg der Spindel, wird über die bei (9) angebrachte Feder (6) als Kraft von unten an die Wippe geführt. Am Stutzen (12) wird die Druckluft mit einem Vordruck von 1,2 kp/cm^2 zugeführt,

die im Arbeitsraum (7) einen Druck aufbaut, durch den über die Membran (10) der Membranantrieb betätigt wird.

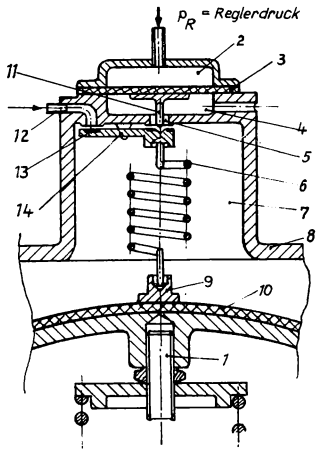


Abb. 31 Positionär an einem Membranregelventil

Durch die Wippe (14) werden zwei Aufgaben gelöst: Sie steuert durch die Prallplatte (13) die Druckluftzufuhr in den Arbeitsraum (7) und sie gibt die Auslaßöffnung (5) zum Abströmen der Luft aus Arbeitsraum (7) durch Raum (4) ins Freie mehr oder weniger frei. Daraus ergibt sich, daß bei steigendem Stelldruck der Arbeitsdruck sinkt, der Positioner also invertierend wirkt. Liegt nun der Stelldruck in Kammer (2) beispielsweise zu hoch im Vergleich zum Arbeitsdruck in Raum (7), d.h., das Ventil ist zu weit geschlossen, so gibt durch den Druck des Stößels (11) auf Wippe (14) diese die Auslaßöffnung (5) etwas frei. Dabei drosselt gleichzeitig die Prallplatte die Eintrittsöffnung etwas. Der Druck in Raum (7) sinkt und die Membran mit Membranteller und Ventilspindel bewegen sich so lange nach oben, bis durch die Feder (6) an der Wippe wieder Gleichgewicht hergestellt wird. Dies ist dann erreicht, wenn die Zuordnung von Stelldruck und Hub stimmt.

2.5.2. Membranstellmotor mit Stulpmembran

Membranstellmotoren (siehe Abb. 32) mit Stulpmembran gestatten einen größeren Hub als der Membranantrieb für Ventile. Sie dienen zur Verstellung von Klappentellern, Schaltwalzen usw., gestatten bei Vollaussteuerung einen Hub von 30 bis 60 mm und

erhalten zur verbesserten Stellungszuordnung einen Positioner angebaut.

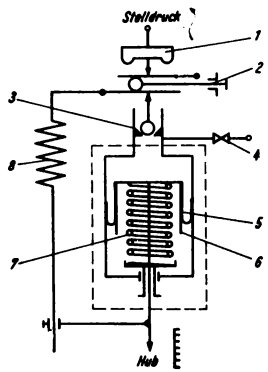


Abb. 32 Membranstellmotor mit Stulpmembran und Positioner

Der vom Regler oder einem Steuersystem kommende Stelldruck wird an der Membran (1) in eine Kraft umgesetzt, die über den Verhältnisschieber (2) das Kugelsteuerventil (3) betätigt. Mit dem Verhältnisschieber kann der Proportionalbereich des Stellmotors verändert werden. Durch das Kugelsteuerventil wird die über die Vordrossel (4) einströmende Druckluft gesteuert und der Stellkolben (6) über die Stulpmembran (5) bewegt. Die Feder (7) erzeugt die Rückstellkraft. Über den Positioner wird jede Hubänderung an der Meßfeder (8) in eine Kraftänderung umgesetzt und über den Verhältnisschieber an den Eingang zurückgeführt.

2.5.3. Membranhebel

Der Membranhebel (siehe Abb. 33) hat einfachen Membranantrieb. Er dient zum Verstellen von Klappen und Schiebern. Eine gute Stellungszuordnung ist dabei nicht gewährleistet.

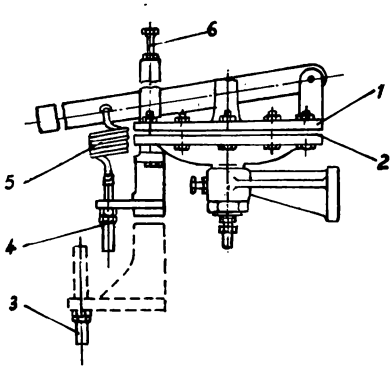


Abb. 33 Membranhebel

Dem Membranhebel wird zur Betätigung der Stelldruck zugeführt. Der Membranteller (1) überträgt den vom Stelldruck hervorgerufenen

Hub der Membran (2) auf den mit einem Bolzen am Membranteller befestigten Stellhebel. Der Stellhebel ist um einen Drehpunkt schwenkbar. Sein Hub ist am Hubbegrenzungsbügel (6) durch eine Schraube einstellbar. Die Zugkraft der Rückholfeder (5) kann durch die Spannschraube (4) verändert werden. Die maximal vom Membranteller ausgeübte Druckkraft beträgt bei voller Druckbelastung 100 bis 160 kp.

2.6. Zusatzeinrichtungen

Zu kompletten Regeleinrichtungen gehören außer den Hauptgeräten noch Zusatz- und Hilfseinrichtungen wie Druckluftanlagen, Schalter mit Fernstellern, Reduzierstationen u.a.
Die Drucklufterzeugung geschieht in großen Werken in zentralen Drucklufterzeugerzentralen oder in örtlichen Drucklufterzeugungsanlagen für die einzelnen Betriebsstellen. Für kleinere Regelungsanlagen werden an Ort und Stelle kleine Kompressoren aufgestellt. Die Druckluft wird unter Zwischenschaltung von Filtern über Reduzierstationen aus dem Werknetz, das normalerweise einen höheren Druck aufweist, entnommen. Die Beschaffenheit der Druckluft hat wesentlichen Einfluß auf die Betriebssicherheit der Regelungsanlagen. Sie muß deshalb unbedingt in Filter- und Trocknungsanlagen von Wasser, Öl und Schmutzteilchen gereinigt werden, da sonst ständig Störungen auftreten.

Für die Fortleitung der Druckluft werden besondere Leitungen knickfrei verlegt. Sie bestehen in den meisten Fällen heute aus Kunststoffleitungen, die bei größeren Anlagen wie elektrische Leitungen zu Kabeln zusammengefaßt werden. Für besondere Beanspruchungen werden Leitungen aus Kupfer, Aluminium oder Stahl verwendet.
Bei Anfahrprozessen oder sonstigen besonderen Betriebszuständen, wie Ausfall der Regelungsanlage oder Fernsteuerung, kann mit Hand-Automatik-Schaltern die Anlage manuell von zentraler Stelle aus gesteuert werden. Diese Schalter gestatten es, vom Reglereingriff auf Handeingriff umzuschalten und mit Hilfe eines Handfernstellers das pneumatische Stellglied im Stellbereich konti-

nuierlich zu verstellen. Zusätzlich ist meist eine Gefahrenschaltung möglich, wobei automatisch eine Entlüftung der Stellmotore erfolgt.

2.7. Transmitter

Transmitter spielen in Regelungsanlagen mit pneumatischer Hilfsenergie eine bedeutende Rolle. Ihre Aufgabe besteht im wesentlichen darin, die Meßwerte in Druckwerte im standardisierten Bereich umzuwandeln. Einige der wichtigsten Typen sollen im folgenden beschrieben werden.

2.7.1. Temperaturtransmitter

Der Temperaturtransmitter (siehe Abb. 34) dient zur Messung von Temperaturen im Bereich von - 5 °C bis 375 °C, die in Druckwerte umgewandelt werden.

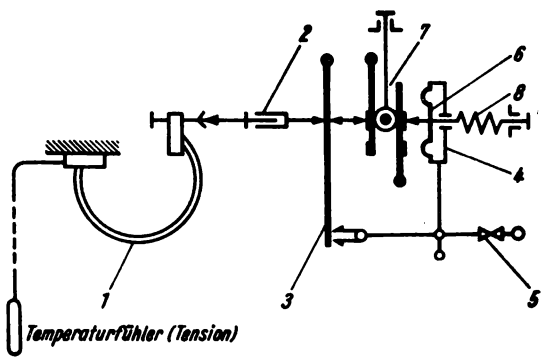


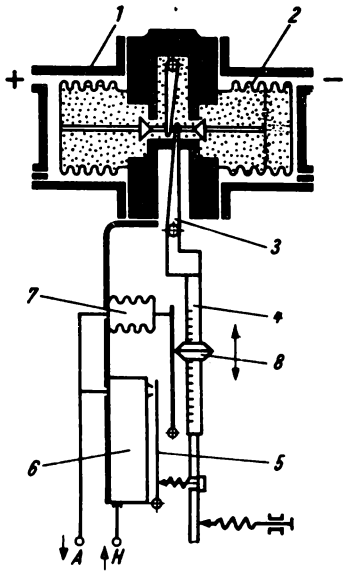
Abb. 34 Temperaturtransmitter

Entsprechend des Verlaufes der Dampfspannungskurve besitzt dieder Transmitter keine lineare Charakteristik zwischen Temperatur und Ausgangsdruck. Er wird besonders in explosionsgefähr-

deten Räumen verwendet, weil hier elektrische Meßgeräte nicht ohne weiteres eingesetzt werden können.
Der Transmitter besteht aus Meßwerk und Vorsatz. Das Meßwerk besteht aus einem Tensionssystem, in welchem der Dampfdruck eine Funktion der Temperatur ist. Die hierdurch von dem Meßwerk hervorgerufene Kraft wird dem Transmitter zugeführt, der diese in einen proportionalen Luftdruck umwandelt. Die vom Meßwerk (1) kommende Kraft betätigt über den einstellbaren Druckstift (2) die Prallplatte (3) so lange, bis der sich ändernde Kaskadendruck in Kammer (4) über die Kompensationsmembran (6) und den Verhältnisschieber (7) die Prallplatte zurückführt. Durch die Einstellfeder (8) wird die Lage des Meßbereichs eingestellt. Der Verhältnisschieber bestimmt den Proportionalbereich. Der Transmittervorsatz kann direkt oder invertierend arbeiten.

2.7.2. Differenzdrucktransmitter

Differenzdrucktransmitter dienen zur Messung von Differenzdrücken in verschiedenen Differenzdruckbereichen. Differenzdrücke werden gemessen, um Durchflüsse, Höhenstände und Druckabfälle zu erfassen. Der dem Differenzdruck entsprechende Luftdruck am Ausgang des Transmitters wird in die Meßwarte geführt und dort zur Messung oder Regelung verwendet.
Der nicht überdrucksichere Differenzdrucktransmitter ist im Aufbau sehr einfach. Der Differenzdruck wird in Membrankammern vor und hinter der Membran eingeleitet. Die an der Membran entstehende Kraft wird über eine Durchführung auf dem Druckraum geleitet. Über einen Druckstift wird diese dem Transmittervorsatz zugeführt und in einen proportionalen Luftdruck im standardisierten Bereich umgewandelt.
Überdrucksichere Differenzdrucktransmitter werden etwas anders aufgebaut (siehe Abb. 35). Die auf die Metallfaltenbälge des Meßwerkes (1,2) wirkenden Drücke erzeugen eine Kraft, die über die Durchführhebel (3) und den Waagebalken (4) auf die Prallplatte (5) geleitet wird.



Die Prallplatte steuert einen Verstärker (6), der dem Kompensationsbalg (7) einen Luftdruck zuführt. Dieser erzeugt eine Kraft, die der Eingangskraft entgegenwirkt. Ist das System ausgewogen, so ist der Ausgangsdruck ein Maß für den Differenzdruck am Meßwerk. Die Meßbereiche können durch den Stellring (8) am Waagebalken eingestellt werden.

Abb. 35
Differenzdrucktransmitter (überdrucksicher)

2.7.3. Elektropneumatischer Transmitter (Stromwaage)

Die elektropneumatische Stromwaage dient zur Umwandlung von Spannungen im Bereich von 0 bis 50 mV in einem proportionalen Luftdruck. Sie dient als Transmitter bei Temperaturregelanlagen. Durch sie können aber auch alle physikalischen Größen erfaßt werden, sofern sie als elektrische Größen im Eingangsbereich dargestellt werden. Die Stromwaage ermöglicht es, elektrisch zu messen und mit den einfachen Mitteln der Pneumatik zu regeln.

Die Stromwaage (siehe Abb. 36) besteht aus einem spannbandgelagerten Doppel-Tauchspulsystem und einer pneumatischen Zwillingsdüsensteuerung mit Rückführung. Der vom Meßstrom gesteuerte Waagebalken (1) trägt eine Steuerfahne, die den Ausgang des Strahldüse-Fangdüse-Systems (2) beeinflußt. Die Steuerluft von diesem System gelangt über einen Verstärker (3), betätigt einen

Rückführkolben (6), der über eine Rückführfeder (4) auf den Waagebalken wirkt.

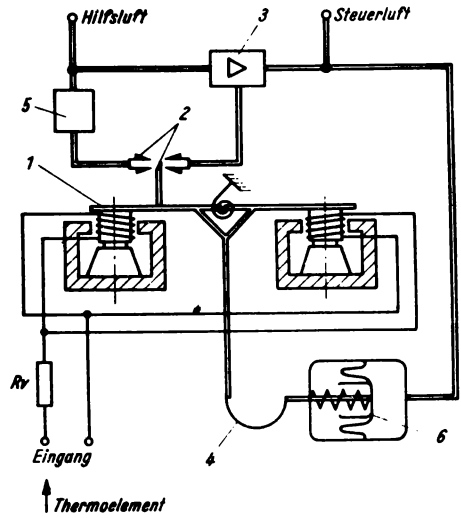


Abb. 36 Elektropneumatischer Transmitter

Die Druckluft wird dem Strahldüse-Fangdüse-System nicht in voller Höhe, sondern über einen Druckminderer (5) ververringert zugeführt. Der Aussteuerbereich der Waage beträgt etwa 5 mV. Mit einem Einstellknopf kann zu jeder gewünschten Spannung im Bereich von 0 bis 50 mV der gewünschte Sollwert eingestellt werden. Dieser Transmitter gestattet also bereits in der Meßeinrichtung einen Soll-Istwertvergleich.

Zusammenfassung

Die Anwendung von Hilfsenergie in Regeleinrichtungen ist notwendig, wenn die von der Meßeinrichtung erzeugte Energie nicht ausreicht, um das Stellglied direkt zu betätigen. Das ist bei der Mehrzahl aller zu lösenden regelungstechnischen Aufgaben, insbesondere wenn es sich um komplexe Aufgaben handelt, der Fall. Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie sind insbesondere in der chemischen Industrie weit verbreitet. Die Hauptursachen dafür sind:

a) Explosionssicherheit
b) gute Betriebssicherheit
c) einfache Bedienbarkeit
d) stetiges Stellverhalten bei einfachem Aufbau.

Die wichtigsten Grundbauelemente von Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie, die in allen Anlagen immer wiederkehren, sind Druckteiler (Kaskade), Düse-Prallplatte-Systeme, Strahldüse-Fangdüse-Systeme und Membranverstärker. Ihre Aufgabe ist es, den Druckluftstrom entsprechend den Meßwerten zu beeinflussen. Regler mit pneumatischer Hilfsenergie können als Wegvergleichsregler oder als Kraftvergleichsregler arbeiten. Beim Wegvergleichsregler wird der Meßwert in einen Weg verwandelt. Bei ihnen ist stets ein Meßwerk mit dem Regler vereinigt. In modernen Anlagen werden Wegvergleichsregler kaum noch neu eingesetzt.

Alle standardisierten Einheitsreglertypen der DDR arbeiten nach dem Prinzip des Kraftvergleichsreglers. Deren Arbeitsweise besteht darin, daß der Meßwert grundsätzlich in einen proportionalen Druckwert im standardisierten Bereich von 0,2 bis 1 kp/cm^3 umgewandelt wird. Diesem wird der Sollwert ebenfalls als Druck entgegengeschaltet.
Eine der prinzipiellen Bauformen ist der Regler mit Balgwaage, bei dem das erforderliche Übertragungsverhalten dadurch erreicht wird, daß verschiedene Bälge mit entsprechenden Drosselverbindungen auf einen Waagebalken arbeiten.
Die zweite Bauform sind die Regler mit Membransystemen. Das notwendige Übertragungsverhalten wird hier durch eine Kombination verschiedener Membransysteme mit Volumen und pneumatischen Widerständen erreicht. Ein wesentlicher Vorteil ist, daß diese Membrankammern in Büchsen- oder Stapelbauweise übereinander angeordnet werden können.
Größere Aufmerksamkeit verdienen auch die pneumatischen Stellglieder. Vorwiegend kommen Membranstellmotore, Membranstellhebel und Membranregelventile zur Anwendung. Besonders bei letzteren ist eine gute Anpassung an die Regelstrecke erforderlich, da sonst leicht Schwingungen auftreten können.
Wichtige Bauglieder in Regeleinrichtungen mit pneumatischer Hilfsenergie sind die Transmitter. Ihre Aufgabe ist es, die Meßwerte aller Art in proportionale Druckwerte umzuwandeln. Besondere Bedeutung haben die elektropneumatischen Transmitter

(auch Stromwaage genannt), mit denen alle physikalischen Größen erfaßt werden können, die sich als elektrische Größen im Eingangsbereich darstellen lassen. Sie bieten letztlich die Möglichkeit des Einsatzes pneumatischer Regeleinrichtungen in standardisierter Einheitsbauweise für alle regelungstechnischen Aufgaben.

Wiederholungsfragen

1. Welche grundsätzliche Möglichkeit für die Lösung komplizierterer regelungstechnischer Aufgaben ergibt sich praktisch nur durch die Anwendung von Regeleinrichtungen mit Hilfsenergie?

2. Warum beginnt der standardisierte Einheitsbereich für Normaldruckpneumatik nicht bei Null, sondern bei 0,2 kp/cm^2?

3. Welche Bedingungen müssen für die Ausbildung eines Kaskadendruckes vorhanden sein?

4. Warum ist in regelungstechnischen Anlagen oftmals die Anwendung eines Schnellsteuerers erforderlich?

5. Warum ist in der Mehrzahl der Fälle die Anwendung eines Kraftvergleichsreglers vorteilhafter als die Verwendung eines Wegvergleichsreglers?

6. Welches Ergebnis erhält man, wenn ein Kraftvergleichsregler ohne Rückführung eingesetzt wird?

7. Was muß grundsätzlich beachtet werden, wenn ein Regler nur mit einer starren Rückführung eingesetzt wird?

8. Welche Bedeutung haben der I- und D-Anteil bei einem Regler und wie werden sie gerätetechnisch gebildet?

9. Ist in allen Fällen der Einsatz eines PID-Reglers zur Lösung einer regelungstechnischen Aufgabe notwendig?

10. Welche praktische Bedeutung hat das Kombi-Baukastensystem für die Betriebsmeß-, Steuerungs- und Regelungstechnik?

11. Wann ist es vorteilhaft einen Positioner zu verwenden?

12. Welche Bedeutung kommt der Druckluftерzeugungsanlage innerhalb der gesamten Regeleinrichtung zu?

13. Wie arbeitet ein Transmitter und welche Bedeutung hat er für die Lösung der regelungstechnischen Aufgabe?

3. Regeleinrichtungen mit hydraulischer Hilfsenergie

Zum Betrieb von Regeleinrichtungen mit hydraulischer Hilfsenergie wird in den meisten Fällen Drucköl, seltener Druckwasser benötigt. Die Flüssigkeit steht unter einem Überdruck von etwa 8 bis 12 kp/cm^2. Ähnlich wie bei den pneumatischen Regeleinrichtungen für die Steuerung des Luftstromes wurden für die hydraulischen Regeleinrichtungen spezielle Bauelemente zur Steuerung des Ölstromes entwickelt. Es sind dies die bereits aus der Pneumatik bekannten Prallplatte-Düse-Systeme, sowie das Strahlrohr und der Doppelsteuerkolben.
Zur Betätigung dieser Steuereinrichtungen werden Meßwerke benötigt, deren Meßgröße durch einen Weg abgebildet wird. Im Gegensatz zur pneumatischen Hilfsenergie ist also bei der Hydraulik der Anteil der Wegvergleichsregler größer.
Da sich die meisten Meßgrößen in proportionale Drücke umwandeln lassen und man somit über den Hub einer Membran oder eines Wellrohres oder durch die Auslenkung eines Bourdonrohres usw. eine Wegabbildung erhält, besteht kaum eine Einschränkung in der Wahl der Meßgröße.
Das Grundarbeitsprinzip der Regeleinrichtungen mit hydraulischer Hilfsenergie besteht darin, daß der durch die Steuereinrichtung beeinflußte Ölstrom meist auf einen Kolben - Arbeitskolben oder Stellkolben genannt - einwirkt und dadurch ein Ventil, ein Schieber oder eine Klappe bewegt wird.
Hydraulische Regeleinrichtungen benötigen außer dem Antrieb der Ölpumpe keine elektrische Energie, so daß ihre Anwendung in explosionsgefährdeten Räumen möglich ist. Gegenüber elektrischen Reglern gleicher Leistung haben sie einen geringeren Platzbedarf. Mit hydraulischen Einrichtungen lassen sich auch sehr große Verstellkräfte erzielen. Ihr robuster Aufbau, der kaum einer Wartung bedarf, hat dazu geführt, daß man hydraulische Regeleinrichtungen hauptsächlich bei Dampferzeugern anwendet. Das sind die Vorzüge hydraulischer Einrichtungen.
Ein Nachteil hydraulischer Regeleinrichtungen ist ihre Trägheit, so daß sie für schnelle Regelungsvorgänge nicht geeignet sind.

Aus dieser Trägheit resultiert auch, daß es unzweckmäßig ist, den Meßwert über größere Entfernungen zu übertragen.

Weitere Nachteile sind:

die Temperaturabhängigkeit des Drucköles,

die Kompressibität des Drucköles, was sich auf die Genauigkeit auswirkt,

das Auftreten von Druckverlusten in den Rohrleitungen infolge Undichtigkeiten der beweglichen Teile.

3.1. Steuereinrichtungen für den Ölstrom

3.1.1. Doppelsteuerkolben

Der Doppelsteuerkolben besteht aus einem Zylinder, in dem sich zwei starr miteinander verbundene Kolben bewegen. An der Kolbenstange greift das Meßwerk an. Damit eine Kolbenbewegung ermöglicht wird, muß die Meßgröße als Weg abgebildet werden.
Am Zylinder sind mehrere Anschlüsse vorhanden, die das Drucköl zuführen und ableiten, um mit dem gesteuerten Ölstrom den Arbeitskolben folgerichtig zu betätigen.
Befindet sich der Doppelsteuerkolben in Mittelstellung, so kann kein Drucköl zum Arbeitskolben gelangen (siehe Abb. 37).

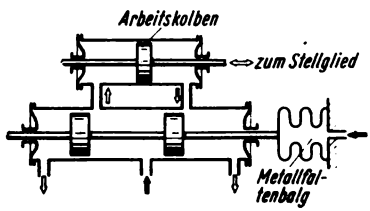


Abb. 37
Zusammenwirken eines Steuerkolbens mit Meßwerk und Arbeitskolben

Wird der Steuerkolben durch das Meßwerk nach links verschoben, so gelangt das Drucköl über einen Anschluß zum Arbeitskolben, während das überflüssige Öl über die beiden Abflüsse zum Ölsumpf abfließen kann. Die rechte Arbeitsstellung des Steuerkolbens bewirkt eine umgekehrte Einwirkung auf den Arbeitskolben. Als Meßwerk dient im Abbildungsbeispiel ein Metall-

faltenbalg, der die Aufgabe hat, einen Druck proportional in einen Weg umzuwandeln. In der dort gezeigten Arbeitsstellung des Steuerkolbens läuft der Arbeitskolben mit konstanter Geschwindigkeit nach rechts.
Bei der Ausführung hydraulischer Anlagen ist es manchmal erforderlich, die Zuordnung der Bewegungen zu vertauschen. Während bei den bisherigen Beispielen sich der Arbeitskolben nach rechts bewegte, wenn der Steuerkolben nach links ausgelenkt wird und umgekehrt, ist manchmal eine Vertauschung der Zuordnung erforderlich. Das läßt sich bei hydraulischen Anlagen sehr leicht dadurch erreichen, daß die Anschlüsse für den Arbeitskolben gewechselt oder die Anschlüsse für den Zu- und Abfluß des Drucköls vertauscht werden.
Nicht immer reicht eine Größe zum Steuern des Ölstromes aus. Besonders in Rückführschaltungen treten zwei Größen auf, die den Ölstrom beeinflussen. Damit beide Größen unabhängig zur Auswirkung kommen, sieht man zusätzlich noch eine Steuerhülse vor. Das ist ein Zylinder mit entsprechenden Bohrungen. Die Rückführung bewirkt dann eine Relativbewegung zwischen Steuerkolben und Steuerhülse. Durch diese Relativbewegung ist es möglich, daß Steuerkolben und Steuerhülse unabhängig voneinander den Ölstrom steuern können.

3.1.2. Prallplatte-Düse-System

In einigen Fällen erfolgt die Steuerung des Ölstromes auch mit Hilfe des bereits aus der Pneumatik bekannten Prallplatte-Düse-Systems.
Ein Beispiel eines derartigen Reglers ist der vom VEB Meßgeräte und Armaturenwerk Karl Marx, Magdeburg, hergestellte Druckregler (siehe Abb. 38). Als Meßorgan dient ein Metallfaltenbalg, dessen Hubbewegung über einen Stößel auf einen Hebel übertragen wird. Als Rückstellkraft dient eine Feder mit deren Hilfe zugleich der Sollwert eingestellt wird. Durch die Anordnung der Vordrossel entsteht eine Druckteilerschaltung. Dabei kann als Hilfsenergie Drucköl, Druckwasser oder auch

Druckluft verwendet werden.
Der Abstand zwischen Düse und Prallplatte bestimmt den Steuerdruck p_s, der auf einen federbelasteten Kolben als Stellmotor einwirkt. Als Stellmotor kann aber auch direkt ein Membranventil Verwendung finden.

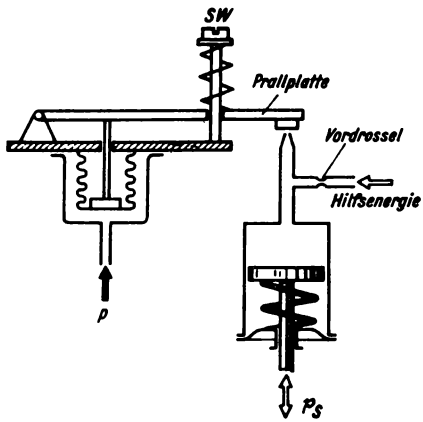


Abb. 38 Prallplatte-Düse-System
in hydraulischen Anlagen

Das hier beschriebene Steuerungssystem ist bei hydraulischen Reglern allerdings relativ selten anzutreffen.

3.1.3. Strahlrohr

Die weit verbreiteste Steuereinrichtung ist das Strahlrohr. Es besteht aus einem Röhrchen, in das Drucköl eingeleitet wird. Das freie Ende ist als Düse ausgebildet, aus der das Öl mit großer Geschwindigkeit austritt. Das Strahlrohr ist mit einer senkrechten Achse gelagert und an seinem oberen Schenkel greifen die von den Meß- und Einstellorganen herrührenden Kräfte an. Die lichte Weite der Düse des Strahlrohres beträgt etwa 1 mm und das Öl steht unter einem Druck von 6 bis 12 kp/cm^2. Das aus dem Strahlrohr austretende Drucköl gelangt in den sogenannten Druckverteiler (siehe Abb. 39).

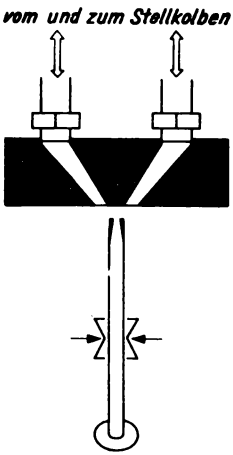


Abb. 39
Strahlrohr vor einem Druckverteiler

Das ist eine Platte mit zwei sich konisch erweiternden, auseinanderstrebenden Bohrungen. Zweck des Druckverteilers ist es, den aus dem Strahlrohr mit hoher Geschwindigkeit austretenden Ölstrahl aufzunehmen und dessen kinetische Energie in potentielle umzuwandeln, die dem Stellmotor zugeführt wird. Das Strahlrohr (1) befindet sich vollständig in Öl, wodurch eine gute Lagerung gewährleistet ist. Meßwerk und Einstellsysteme greifen am Einstellhebel (2) an, so daß sie durch das Öl in ihrer Funktion nicht behindert werden (siehe Abb. 40). Das vom Druckverteiler (3) nicht aufgenommene Öl fließt über das Überlaufrohr zum Ölsumpf ab.

Nimmt das Strahlrohr seine Mittelstellung ein (siehe Abb. 41), so gelangt die gleiche Menge Drucköl in die beiden Öffnungen des Druckverteilers. Auf beiden Seiten des Arbeitskolbens baut sich der gleiche Druck auf, so daß sich der Arbeitskolben nicht bewegt. Wird das Strahlrohr durch das Meßwerk aus seiner Mittelstellung ausgelenkt, beispielsweise nach rechts, so gelangt das Drucköl durch die rechte Bohrung des Druckverteilers über die Anschlußleitung auf die rechte Seite des Arbeitskolbens. Dieser bewegt sich mit einer solchen Geschwindigkeit nach links, wie sie der Menge des nachströmenden Drucköls entspricht.

Weil die Geschwindigkeit des Arbeitskolbens innerhalb des Aussteuerbereiches des Strahlrohres von der Stellung desselben abhängt, handelt es sich beim Strahlrohr mit Arbeitskolben um ein I-Glied.

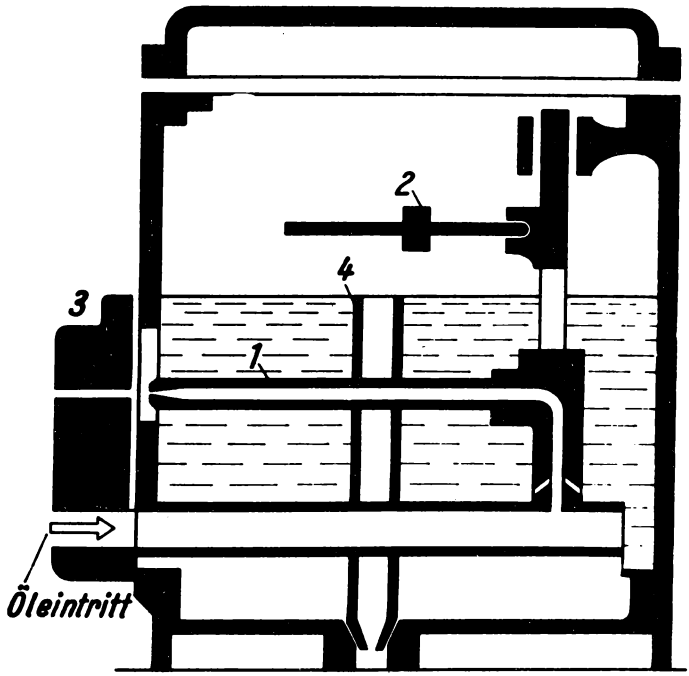


Abb. 40 Strahlrohrregler

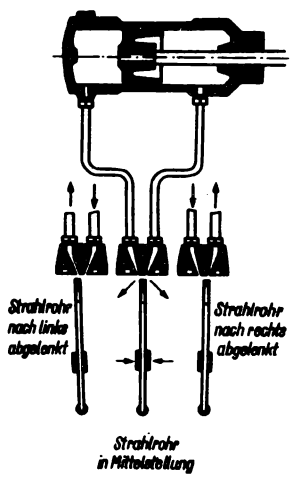
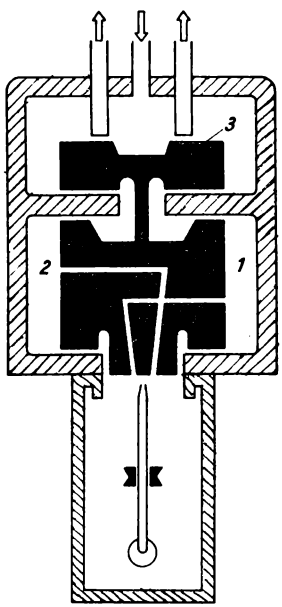


Abb. 41 Einfluß der Auslenkung des Strahlrohres

3.2. Kraftverstärker - Folgekolben

Das Drucköl gelangt von der Düse des Strahlrohres über den Druckverteiler zum Stellkolben. Hat dieser einen großen Durchmesser, so wird er sich nur relativ langsam bewegen, weil durch die dünnen Querschnitte nur verhältnismäßig wenig Drucköl nachfließen kann. Teilweise aber werden größere Stellkolbengeschwindigkeiten gefordert. Es ist deshalb ein Bauelement erforderlich, das in kurzen Zeiten genügend Drucköl zur Verfügung stellt. In pneumatischen Anlagen wird die durch den Einbau eines Schnellübertragers erreicht. Bei hydraulischen Anlagen wendet man den sogenannten Kraftverstärker-Folgekolben an (siehe Abb. 42).



Dieses Bauelement besteht aus zwei parallel liegenden Kolben, die starr miteinander gekoppelt sind. Jeder Kolben läuft in einem besonderen Zylinder. Der vor dem Strahlrohr laufende Kolben - Folgekolben genannt - enthält, ähnlich wie die Druckverteilerplatte, zwei Bohrungen zur Aufnahme des Drucköls. Hat das Strahlrohr seine Mittelstellung, so tritt der Ölstrahl mit gleichem Druck durch die beiden Aufnahmeöffnungen in die Kammern 1 und 2, und der Folgekolben (3) steht. Wird das Strahlrohr nach links ausgelenkt, so gelangt das Drucköl über die linke Auffangöffnung in die rechte Kammer (1), und der Folgekolben bewegt sich nach links. Damit geht auch der starr gekoppelte Steuerkolben nach links.

Abb. 42 Kraftverstärker-Folgekolben

Der Kraftverstärker-Folgekolben ist mit drei Ölanschlüssen ausgerüstet. Die beiden äußeren führen zum Zylinder des Arbeitskolbens und der mittlere steht in direkter Verbindung mit der Drucköl pumpe. Bewegt sich nun der Steuerkolben nach links, so wird der linke Zufluß zum Arbeitszylinder freigegeben. Dadurch kann das Drucköl ohne Druckverlust unmittelbar in den Zylinder des Arbeitskolbens gelangen und so eine schnelle Bewegung des Arbeitskolbens bewirken.

3.3. Sollwerteinstellung

Zur Auslenkung des Strahlrohres sind Kräfte erforderlich, die meist von einer Membran oder einem Metallfaltenbalg aufgebracht werden. Daraus ergibt sich, daß alle anderen Größen auch in Kräfte umgewandelt werden müssen. Das trifft auch für den Sollwert zu. Am einfachsten geschieht dies durch eine Feder. Abb. 43 zeigt ein Strahlrohr, das durch eine Membran ausgelenkt wird. Die Gegenkraft bringt die Sollwertfeder auf. Für diesen Fall gilt die Gleichgewichtsbedingung

$$c \cdot x = A \cdot p$$

Darin ist c eine Federkonstante, x der Federweg, also die Auslenkung des Strahlrohres, A die wirksame Membranfläche und p der Druck.

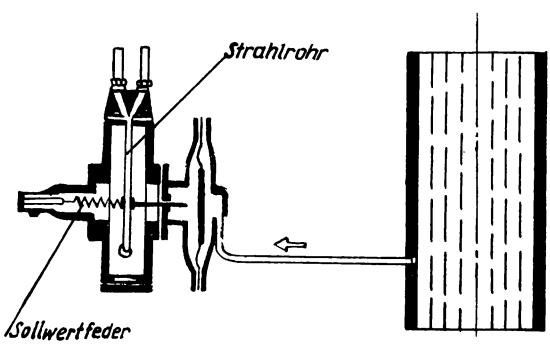


Abb. 43 Meßwerk und Sollwerteinstellung eines Strahlrohrreglers

Hieraus erkennt man, daß die Auslenkung des Strahlrohres dem zu regelnden Druck proportional ist, weil die Membranfläche A konstant bleibt. An der Skala des Sollwerteinstellers kann man den eingestellten Sollwert ablesen. Damit sich dieser eingestellte Wert nicht durch Erschütterungen oder unbefugten Eingriff verändern kann, ist eine besondere Arretierung vorgesehen. Oftmals lassen es die Betriebsbedingungen nicht zu, daß der Sollwerteinsteller direkt zugängig ist. In derartigen Fällen greift man zur biegsamen Welle. Durch Drehung des Handrades wird über ein Getriebe die Welle in Bewegung gesetzt und überträgt den an der Skalenteilung eingestellten Wert auf den Sollwerteinsteller. Sind noch größere Entfernungen zu überbrücken, wählt man einen elektrisch angetriebenen Sollwerteinsteller, bei dem ein kleiner Elektromotor (M) über ein Getriebe (G) die Feder spannt. Der Sollwert selbst läßt sich an einem Zeiger ablesen. Muß der Sollwert in eine entfernt liegende zentrale Warte übertragen werden, wird der Zeiger (2) mit einem induktiven Stellungsmelder (S) gekoppelt (siehe Abb. 44), der den Wert in die Warte überträgt.

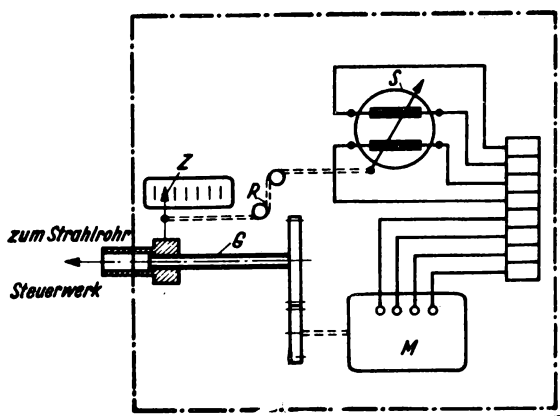


Abb. 44 Übertragung der Sollwerteinstellung über induktiven Stellungsmelder in eine zentrale Warte

3.4. Rückführungen

Um den Regler an die Regelstrecke anzupassen und ihm ein entsprechendes Übertragungsverhalten zu geben, ist, wie bei den Reglern mit pneumatischer Hilfsenergie, die Anordnung einer Rückführung erforderlich. Dabei sind die Möglichkeiten beim Regler mit hydraulischer Hilfsenergie normalerweise nicht ganz so vielseitig.

3.4.1. Starre Rückführung

Das Strahlrohr in Verbindung mit einem Stellkolben ergibt einen I-Regler, denn zu jeder Stellung des Strahlrohres als Eingangsgröße gehört eine bestimmte Geschwindigkeit des Stellkolbens als Ausgangsgröße. Durch Rückführungen kann man dieses Verhalten ändern. Wie bei pneumatischen Rückführungen wird auch bei der Hydraulik die Ausgangsgröße auf die Eingangsgröße zurückgeführt. Bei einer starren Rückführung (siehe Abb. 45) wird die Bewegung des Stellkolbens (SR über einen Seilzug auf die Sollwertfeder (F_1) übertragen. Dadurch wird dem Regler ein neuer Sollwert vorgetäuscht.

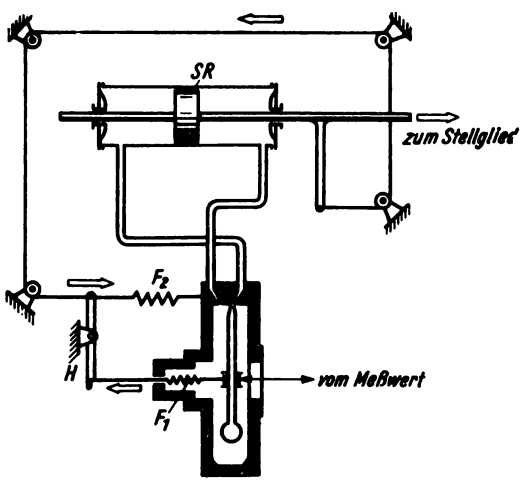


Abb. 45
Hydraulischer Regler mit starrer Rückführung

Wird beispielsweise das Strahlrohr durch das Meßwerk nach rechts gelenkt, so gelangt das Drucköl in die linke Seite des Stellzylinders und der Stellkolben bewegt sich nach rechts. Die sich daraus ergebende Seilbewegung bewirkt, daß sich das obere Ende des Hebels H nach rechts bewegt, woraus sich die Einwirkung auf die Sollwertfeder ergibt. Jede Bewegung des Rückführseiles hat also zwangsläufig eine Verstellung des Sollwertes zur Folge. Auf diese Weise wird durch die starre Rückführung aus dem I-Regler ein P-Regler, denn zu jeder Stellung des Strahlrohres gehört jetzt eine bestimmte Stellung des Stellkolbens.

3.4.2. Nachgebende Rückführung

Bei einer nachgebenden Rückführung ist der Rückführeinfluß zeitlich nicht konstant. Er ist beispielsweise bei einem sprungförmigen Verlauf der Eingangsgröße zuerst in vollem Umfang vorhanden und klingt dann allmählich ab (siehe Abb. 46).

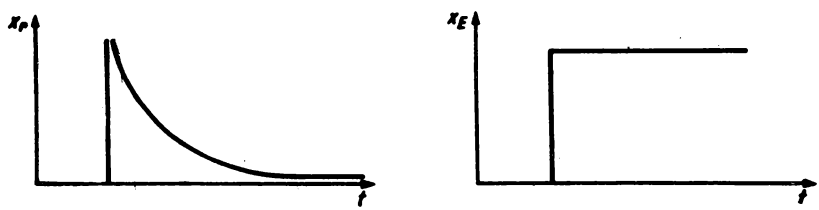


Abb. 46 Bei der nachgebenden Rückführung klingt bei einem sprungförmigen Verlauf der Eingangsgröße der Rückführeinfluß langsam ab

Durch den anfänglich vollen Rückführeinfluß wirkt der Regler zunächst als P-Regler. Im Laufe der Zeit verschwindet der Rückführeinfluß, und aus dem R-Regler wird wieder ein I-Regler. Der Regler wird also insgesamt zu einem PI-Regler.
Bei den hydraulischen Regeleinrichtungen wird dieses nachgebende Verhalten der Rückführung durch den sogenannten Ölkatarakt

erreicht. Dabei handelt es sich um einen Kolben in einem ölgefüllten Zylinder. Damit bei der Bewegung des Kolbens das Öl entweichen kann, ist ein hydraulischer Nebenschluß vorhanden (siehe Abb. 47).

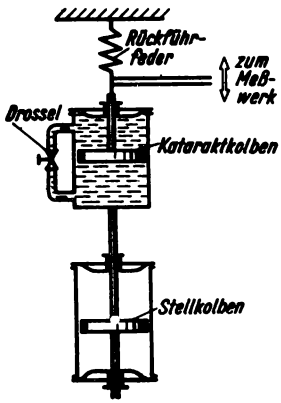
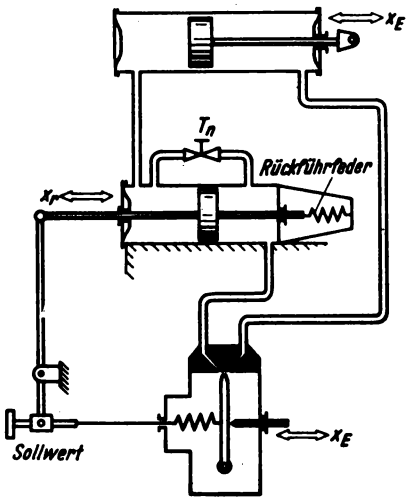


Abb. 47
Nachgebende Rückführung verwirklicht durch Ölkatarakt

Die Drossel bietet dem umlaufenden Öl einen Widerstand, der mitbestimmend ist für die Geschwindigkeit des Kataraktkolbens. Charakteristisch für den Ölkatarakt ist, daß der Zylinder nicht raumfest ist, so daß er sich relativ zum Kolben bewegen kann. Die Kolbenstange selbst ist mit der Rückführfeder raumfest angeordnet, während der Zylinder mit der Kolbenstange des Stellkolbens verbunden ist. Zieht man beispielsweise an der Kolbenstange des Stellkolbens, so wird zunächst die Feder gespannt, wodurch der volle Rückführeinfluß zur Wirkung kommt. Die Feder, im Bestreben sich wieder zu entspannen, zieht den Kataraktkolben nach oben, wodurch der Rückführeinfluß abnimmt.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß der Ölkatarakt mit dem Stellkolben nicht durch ein Gestänge (also wegmäßig), sondern durch eine Ölleitung (also kraftmäßig) verbunden ist (siehe Abb. 48). Wird das Strahlrohr in diesem Falle durch das Meßwerk nach rechts ausgelenkt, dann fließt das Drucköl, bedingt durch die Bewegung des Stellkolbens, auf die linke Seite des Rückführkolbens. Dieser bewegt sich nach rechts und spannt einerseits die Rückführfeder und hält andererseits das Strahlrohr in Mittelstellung zurück (voller Rückführeinfluß). Nun beginnt sich die Feder zu entspannen; das Strahlrohr bewegt sich etwas nach rechts. Durch die Bewegung des Stellkolbens nimmt es wieder seine Mittelstellung ein. Dieses Spiel wiederholt



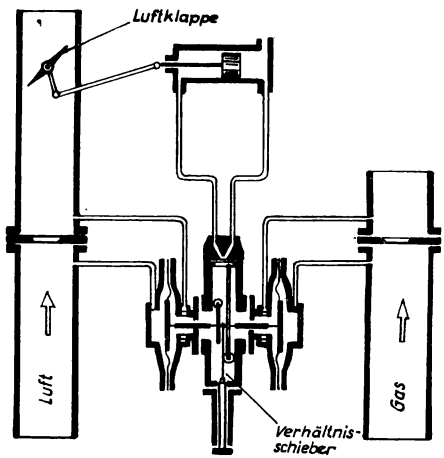
sich, bis sich die Feder gänzlich entspannt hat. Dann hat der Stellkolben eine beliebige Stellung und das Strahlrohr seine Mittelstellung; das typische Kennzeichen eines I- bzw. PI-Reglers.
Mit diesen Bauelementen läßt sich auch eine verzögerte Rückführung realisieren. Sie kommt jedoch in hydraulischen Anlagen relativ selten vor.

Abb. 48
Nachgebende Rückführung mit Ölkatarakt und kraftmäßiger Verbindung zum Stellkolben

3.5. Verhältnisschieber

Ein weiteres charakteristisches Bauelement hydraulischer Regler ist der Verhältnisschieber. Durch ihn ist es möglich, eine Verstellung im bestimmten Verhältnis zu übertragen. Wird beim Strahlrohrregler die Sollwertfeder durch ein Meßwerk ersetzt, beispielsweise durch eine Membran, so ist der Sollwert nicht mehr konstant. Er ist von dem auf der Membran lastenden Druck abhängig. Der Sollwert folgt also einem Meßwert und man spricht dann von Folgereglern.
Folgeregler sind mit zwei Meßwerken ausgestattet. Das eine stimmt den Sollwert, das andere den Istwert. So kann man beispielsweise den Durchfluß von Gasen mit einer Blende messen. Der sich so ergebende Differenzdruck wird mit einer Membran gemessen (siehe Abb. 49).
Derartige Folgeregler werden bei der Regelung des Gas-Luftgemisches für Brenner an Industrieöfen benötigt. Wichtig ist, daß

der benötigten Gasmenge eine bestimmte Luftmenge zugeordnet wird.



Man spricht daher auch von Gemischreglern. Das dem Ofen zuströmende Gas wird mit der rechten Membran (Sollwertmembran) gemessen. Ändert sich der Gasdurchfluß, so wird das Strahlrohr ausgelenkt, was eine Verstellung der Luftklappe zur Folge hat.

Abb. 49 Regelung eines Gas-Luftgemisches

Mit Hilfe eines Verhältnisschiebers (siehe Abb. 50) kann das Verhältnis von Gas zu Luft verändert werden, indem der Luftanteil zum Gas-Luftgemisch festgelegt wird.

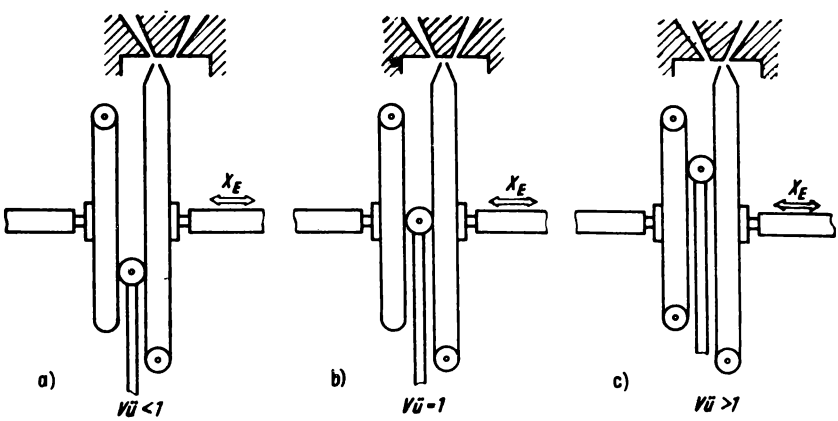


Abb. 50 Arbeitsprinzip eines Verhältnisschiebers

Wird beispielsweise der Verhältnisschieber weiter hineingeschoben, so wird bei gleichbleibender Gasgeschwindigkeit das Strahlrohr weiter nach rechts ausgelenkt und damit die Luftklappe mehr geschlossen.

3.6. Der Reglerblock

Die Zusammenfassung aller Bauelemente eines hydraulischen Reglers erfolgt im sogenannten Reglerblock. Er besteht aus einem öldichten Gehäuse, das zugleich als Ölvorratsgefäß dient und in dem die Ölumlaufanlage, das Strahlrohr und der Stellmotor untergebracht sind. Der Antriebsmotor für die Ölpumpe und das Meßwerk werden von außen angeflanscht (siehe Abb. 51).

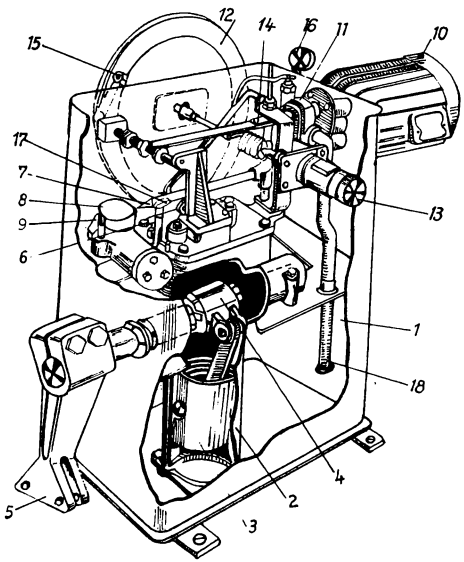


Abb. 51 Reglerblock

Diese Bauart erübrigt jegliche Schmierung und schützt gegen Korrosion. Da äußere Steueröllei-tungen nicht erforderlich sind, können keine Leckölverluste auftreten und die Druckverluste sind auf ein Minimum beschränkt. Durch die Auslenkung des Strahlrohres (7) erfolgt die Bewegung des Arbeitskolbens (3). Diese Bewegung wird auf den Kurbelarm (5) übertragen und somit auf das Stellglied. Der größte Drehwinkel des Kurbelarms beträgt etwa 80°. Die Zeit zum Stellen des vollen Kurbelausschlages ist einstellbar, sie liegt zwischen 8 und 120 Sekunden.

Die Zusammenfassung aller Bauelemente eines hydraulischen Reglers in einem Reglerblock ist gleichzeitig platzsparend und ein wesentlicher Faktor für die Robustheit hydraulischer Regeleinrichtungen, die dadurch besonders für rauhe Betriebsverhältnisse geeignet sind.

Zusammenfassung

Der Vorteil hydraulischer Regeleinrichtungen besteht in ihrem geringen Platzbedarf gegenüber gleichwertigen elektrischen Reglern der Verwendungsmöglichkeit in explosionsgefährdeten Räumen, der geringen Wartungsarbeit und der Größe der erreichbaren Verstellkräfte.
Als Nachteile stehen dem gegenüber die Reaktionsträgheit, keine Möglichkeit der Fernübertragung der Meßwerte und die zunehmende Trägheit bis zur Funktionsunfähigkeit bei sinkenden Temperaturen.
Die wichtigsten Steuereinrichtungen für den Druckölstrom sind Doppelsteuerkolben, Prallplatte-Düse-System und Strahlrohr.
Die Mehrzahl der Regler sind mit Strahlrohrsteuerung versehen.
In seiner Grundausführung mit Strahlrohr und Arbeitskolben ist der hydraulische Regler ein I-Regler. Durch Anordnung einer starren Rückführung mit Hilfe mechanischer Bauelemente kann er zum P-Regler werden. Eine nachgebende Rückführung wird durch den sogenannten Ölkatarakt erreicht. Es kann dabei sowohl eine wegmäßige als auch eine kraftmäßige Verbindung gewählt werden.
Hydraulische Regler mit verzögerter Rückführung werden kaum gebaut. Durch Anwendung eines Kraftverstärker-Folgekolbens ist es möglich, die normalerweise geringe Laufgeschwindigkeit des Stellkolbens zu erhöhen.
Die Sollwerteinstellung wird beim hydraulischen Regler normalerweise durch eine Feder vorgenommen. Durch Anwendung eines Verhältnisschiebers kann der hydraulische Regler als Folgeregler mit veränderlichem Sollwert eingesetzt werden.
Für die praktische Anwendung werden normalerweise alle Bauelemente in dem sogenannten Reglerblock vereinigt. Dieser ist ein

völlig abgeschlossenes Gehäuse, an das nur Antriebsmotor, Meßwerk und Stellglied anzuschließen sind.

Wiederholungsfragen

1. Warum wirken sich Temperaturschwankungen auf hydraulische Regler stärker aus als auf Regler mit anderer Hilfsenergie?

2. Warum liegt eines der Hauptanwendungsgebiete der hydraulischen Regler auf dem Gebiet der Dampferzeugungsanlagen?

3. Warum ist beim Doppelsteuerkolben die Anwendung einer unabhängig beweglichen Steuerhülse erforderlich?

4. Warum herrscht in hydraulischen Reglern das Strahlrohr als Steuereinrichtung vor?

5. Warum ist in vielen Fällen die Anwendung eines Kraftverstärker-Folgekolbens erforderlich?

6. Wie wird die nachgebende Rückführung in einem hydraulischen System verwirklicht?

7. Welche Vorteile ergeben sich aus der Zusammenfassung der Bauelemente im Reglerblock?

Dieser Lehrbrief besteht aus überarbeiteten Abschnitten des im VEB Verlag Technik, Berlin erscheinenden Lehrbuches "Betriebsmeß- und Regelungstechnik der chemischen Industrie" Teil 2: Regelungstechnik

INGENIEUR-
FERNSTUDIUM

Zander

Steuerungs- und Regelungstechnik 4

Herausgeber:
Institut für Fachschulwesen
der Deutschen Demokratischen Republik
Karl-Marx-Stadt

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Zander

S T E U E R U N G S - U N D R E G E L U N G S T E C H N I K

4

V e r ö f f e n t l i c h t :
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
K A R L - M A R X - S T A D T

Der Vorabdruck des Abschnittes "Technik der Schaltsysteme" aus "Das Fachwissen des Ingenieurs" erfolgt mit Genehmigung des Fachbuchverlages Leipzig.

2. Auflage

Alle Rechte vorbehalten

Ag 613/54/65/600 Best.-Nr. 5034-04

Vorzugsschutzgebühr MDN 3,50

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Elektrische Bauelemente unstetiger Steuerungen	
1. Allgemeines	6
2. Bauelemente für Steuerglieder	7
2.1. Bauelemente mit Kontakten	7
2.1.1. Elektromagnetische Relais	7
2.1.1.1. Neutrale oder ungepolte Relais	9
2.1.1.1.1. Konstruktionsarten	10
2.1.1.1.2. Berechnung von ungepolten Relais	16
2.1.1.1.3. Ströme und Stromverhältnisse am Relais	20
2.1.1.1.4. Die Kontakte des Relais	22
2.1.1.2. Gepolte Relais	24
2.1.1.3. Wechselstromrelais	27
2.1.1.3.1. Wechselstromphasenrelais mit zwei getrennten Eisenkreisen	28
2.1.1.3.2. Wechselstromphasenrelais mit Kurzschlußwicklung	30
2.1.2. Elektrodynamische Relais	32
2.1.2.1. Tauchspulrelais	32
2.1.2.2. Drehspulrelais	32
2.1.3. Thermorelais	34
2.1.3.1. Thermo-Bimetallrelais	34
2.1.3.2. Thermo-Gasrelais	39
2.1.4. Schrittschalter und Motordrehwähler	39
Übungen	41
2.2. Kontaktlose Bauelemente	43
2.3. Technische Realisierung von logischen Verknüpfungsgliedern	45
2.3.1. Logische Verknüpfungen mit Kontaktelementen	46
2.3.2. Logische Verknüpfungsglieder mit Elektronenröhren	47
2.3.3. Logische Verknüpfungsglieder mit Transistoren	49

Seite

2.3.4. Logische Verknüpfungsglieder mit Halbleiterdioden 51
2.3.5. Logische Verknüpfungsglieder mit Rechteckferriten 54
2.3.5.1. Eingabeverknüpfung mit Speicherung 54
2.3.5.2. Speicherung mit Ausgabeverknüpfung 56
2.3.5.3. Durchgangsverknüpfung 58
Übungen 60
2.4. Technische Realisierung von binären Speicherelementen 61
2.4.1. Speicherelemente mit Kontakten 62
2.4.2. Speicherelemente mit Elektronenröhren 64
2.4.3. Speicherelemente mit Transistoren 66
2.4.4. Speicherelemente mit Rechteckferriten 67
Übungen 68
2.5. Technische Realisierung von Zeitschaltgliedern 69
2.5.1. Das verzögerte elektromagnetische Relais als Zeitschaltglied 69
2.5.1.1. Abfallverzögerung 69
2.5.1.2. Anzugsverzögerung 70
2.5.2. Elektromechanische Zeitschaltglieder 71
2.5.3. Thermische Zeitschaltglieder 71
2.5.4. Zeitschaltglieder mit Elektronenröhren 72
2.5.5. Zeitschaltglieder mit Transistoren 73
Übungen 74

3. Bauelemente für Eingangsglieder 75
3.1. Handschalter 75
3.2. Schwellwertschalter 75
3.2.1. Elektrische Schwellwertschalter mit Kontakten 76
3.2.2. Mechanische Schwellwertschalter mit Kontakten 76
3.2.2.1. Mikroschalter 77
3.2.2.2. Berührungsloser Magnetschalter mit Kontakten 78
3.2.3. Kontaktlose elektrische Schwellwertschalter 79

Seite

3.2.4. Kontaktlose mechanische Schwellwertschalter 80
3.3. Transmitter 81
3.4. Programmgeber und -speicher 81
3.4.1. Lochkarte und Lochband 82
3.4.2. Magnetband- und Magnettrommelspeicher 82
3.4.3. Meisterwalze 82
3.4.4. Relaiswalze 82

4. Bauelemente für Ausgangsglieder 83
4.1. Verstärker 84
4.2. Stellglieder 84

5. Anzeige- und Meldegeräte 85

Antworten und Lösungen 87

Literaturverzeichnis 101

Elektrische Bauelemente unstetiger Steuerungen

1. Allgemeines

Eine elektrische Steuereinrichtung besteht im wesentlichen aus drei Gerätegruppen:

Die E i n g a n g s g l i e d e r wandeln beliebige physikalische Größen in elektrische Signale um. In den eigentlichen S t e u e r g l i e d e r n werden diese Signale zu neuen Steuerbefehlen verarbeitet, mit denen nach entsprechender Verstärkung die A u s g a n g s g l i e d e r beaufschlagt werden, über die dann der Eingriff in den Prozeß erfolgt. Die A n z e i g e - und M e l d e g e r ä t e dienen zur Überwachung des normalen Betriebsablaufes durch den Menschen.

Die Steuerglieder werden bei unstetigen Steuerungen aus Elementen aufgebaut, deren Ausgangsgrößen in Abhängigkeit vom Zusammenwirken bestimmter Eingangsgrößen nur diskrete (getrennte, quantisierte) Werte annehmen. Bei binären (zweiwertigen) Steuerungen sind dabei zwei diskrete Zustände, die mit den Ziffern 0 (Null) und L bezeichnet werden sollen, möglich. Bezüglich des Übergangs von einem in den anderen Zustand wirken die Bauelemente entweder stetig oder unstetig.

Unstetig wirkende Bauelemente besitzen eine sogenannte Relais- oder Schaltcharakteristik (Bild 1).

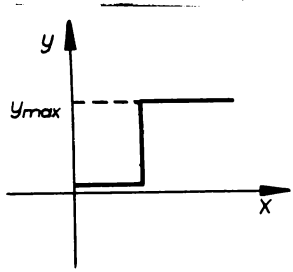


Bild 1

Erst wenn die Eingangsgröße x einen bestimmten Schwellwert erreicht hat, nimmt die Ausgangsgröße den Wert y_{max} an, der durch eine Hilfsgröße vorgegeben ist. Diese Hilfsgröße kann z.B. eine an den Arbeitskreis gelegte

Spannung sein. Unstetig wirkende Bauelemente sind alle Kontakt-Relais. Aber auch mit kontaktlosen Bauelementen läßt sich durch überkritische Mitkopplung eine Schaltcharakteristik erzielen.

Bei stetig wirkenden Bauelementen erfolgt der Übergang von dem einen Zustand in den anderen nach einer stetigen Kennlinie (Bild 2). Als Beispiel hierfür gelten alle kontaktlosen Logik-Elemente, die keine überkritische Mitkopplung enthalten. Damit der Ausgangsgröße in jedem Fall eindeutig die Werte 0 oder L zugeordnet werden können, müssen stetig wirkende Bauelemente immer mit diskreten Signalen ausgesteuert werden. Aus diesem Grunde ordnet man auch am Eingang einer Steuereinrichtung Bauelemente mit unstetigem Übertragungsverhalten (z.B. Handschalter oder Schwellwertschalter) an, die ein stetiges Eingangssignal in ein unstetiges, zweiwertiges Signal umformen.

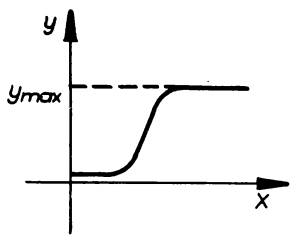


Bild 2

Für praktische Anwendungen ist sowohl bei stetig wirkenden als auch bei unstetig wirkenden Bauelementen die zeitliche Dauer des Überganges der Ausgangsgröße von dem einen Zustand in den anderen von Interesse.

2. Bauelemente für Steuerglieder

2.1. Bauelemente mit Kontakten

2.1.1. Elektromagnetische Relais

Prinzipielle Wirkungsweise:

Durch eine Kraft, die von einem Elektromagnet auf ein ferromagnetisches Material ausgeübt wird, werden im Arbeitsstromkreis Kontakte geschlossen oder

geöffnet.

Das elektromagnetische Relais besteht, wie der Elektromagnet, aus einem Eisenkreis mit Luftspalt (Bild 3).

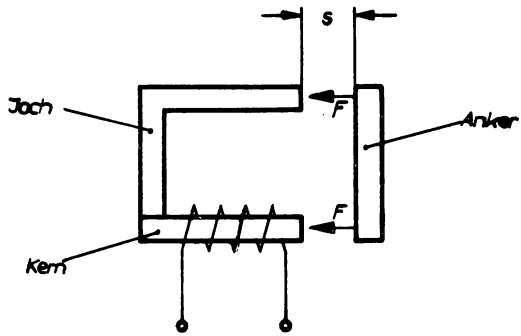


Bild 3

Die einzelnen Teile des Eisenkreises werden wie folgt bezeichnet:

Kern = Wicklung tragender Teil,
Joch = Verbindungsstück im Eisenkreis ohne Wicklung,
Anker = bewegliches, ferromagnetisches Stück

Fließt durch die Erregerwicklung ein Strom, der einen magnetischen Fluß zur Folge hat, so wird der Anker im Luftspalt durch die Kraft

$$F_m = \frac{\mathfrak{B}^2}{2\mu_0} A = \frac{\mathfrak{B} \cdot \mathfrak{H}}{2} A = \frac{\mu_0 \mathfrak{H}^2}{2} A = \frac{\phi^2}{2\mu_0 A} \quad (1)$$

angezogen. Dabei bedeuten

$\mathfrak{B}$ - Dichte des magnetischen Flusses
$\mathfrak{H}$ - Magnetische Feldstärke,
ϕ - Magnetischer Fluß
A - Querschnitt des Luftspaltes
μ_0 - Permeabilität

Den Zusammenhang zwischen dem Erregerstrom I_{err} und der

Kraft F_m erhält man, indem man gemäß $F_m \sim \phi^2$ die Ordinatenwerte der gescherten Magnetisierungskennlinie $\phi = f(I_w)$ (Bild 4a) quadriert.

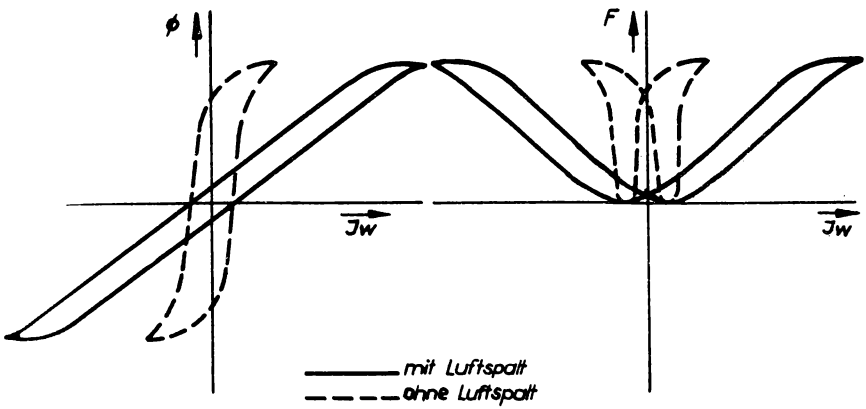


Bild 4

Aus der kelchförmigen Figur (Bild 4b) ist zu ersehen, daß die Kraft unabhängig von der Stromrichtung stets positiv ist (n e u t r a l e s oder u n g e p o l t e s R e l a i s). Damit das elektromagnetische Relais nur auf einen Strom ganz bestimmter Richtung anspricht (g e p o l t e s R e l a i s) oder bei Erregung mit Wechselstrom (W e c h s e l s t r o m r e l a i s) dauernd angezogen bleibt, müssen daher besondere konstruktive bzw. schaltungstechnische Maßnahmen getroffen werden.

2.1.1.1. Neutrale oder ungepolte Relais

Das neutrale oder ungepolte Relais spricht auf einen Gleichstrom beliebiger Richtung an. Bezüglich der Lagerung und konstruktiven Gestaltung des Ankers unterscheidet man hierbei S c h n e i d e n a n k e r r e l a i s, A c h s e n a n k e r r e l a i s, S t u m p f a n k e r r e l a i s, W ä l z a n k e r r e l a i s und

Z u n g e n a n k e r r e l a i s .

Bezüglich der Form des Kernes und des Wickelkörpers kann man die elektromagnetischen Relais einteilen in Rundrelais und Flachrelais. Beim Rundrelais wird ein runder Kern bei Ausnutzung eines zylindrischen Wickelraumes verwendet. Beim Flachrelais hingegen wird ein "flach" rechteckiger Kernquerschnitt und ein rechteckiger bzw. elliptischer Wicklungsquerschnitt zu Grunde gelegt, wodurch die Bauhöhe des Relais verringert wird.

Bezüglich der Ausbildung der Kontaktstücke kann man ferner unterteilen in Schwachstrom- und Starkstromrelais.

Aus der Vielzahl der vorhandenen Relaiskonstruktionen soll jeweils nur auf die charakteristischen hingewiesen werden [2,4.].

2.1.1.1.1. Konstruktionsarten

Schneidenankerrelais:
Das Joch 1 ist am vorderen Ende zu einer Schneide ausgeformt, auf welcher der Anker 4 bei geringer Reibung drehbar gelagert ist (Bild 5). Durch eine in der Mitte des Joches 1 angeordnete Halteschraube 3, die in einen Schlitz des Ankers eingreift, wird der Anker gegen seitliches Verschieben geschützt. Der Anker erhält einen Klebstift 5 von ca. 1 mm Stärke, der ein "Ankleben" des Ankers an die Polplatte 6 infolge von Remanenz verhindert. Auf dem Joch ist das Federnpaket 2 mit den Kontaktfedern befestigt. Bild 6 zeigt ein großes Rundrelais mit Schneidenanker vom VEB Funkwerk Leipzig.

Vorteile des Schneidenankerrelais:
Durch Ausbildung des Joches unterhalb der Schneide zu einer zweiten Polfläche liefert das Schneidenankerrelais einen guten magnetischen Schluß und benötigt damit die geringste spezifische Leistung.

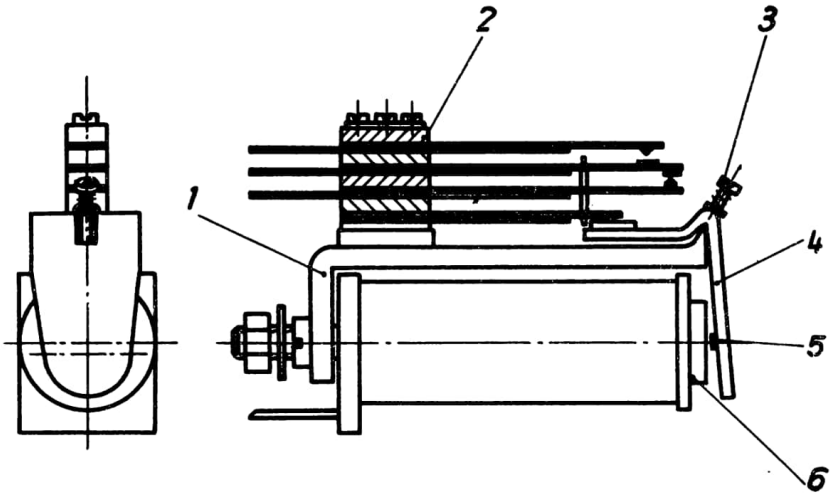


Bild 5

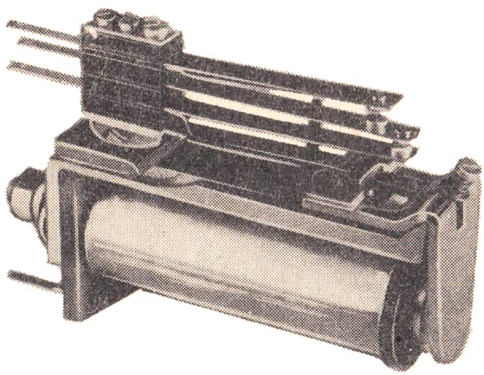


Bild 6

Nachteile des Schneidenankerrelais:
Geringere Empfindlichkeit, keine sehr genaue Einhaltung von Schaltzeiten möglich.

Achsenankerrelais:

Der Anker 1 wird auf einer Achse 2 zwischen einer auf das Joch aufgeschraubten Gabel 3 gelagert (Bild 7).

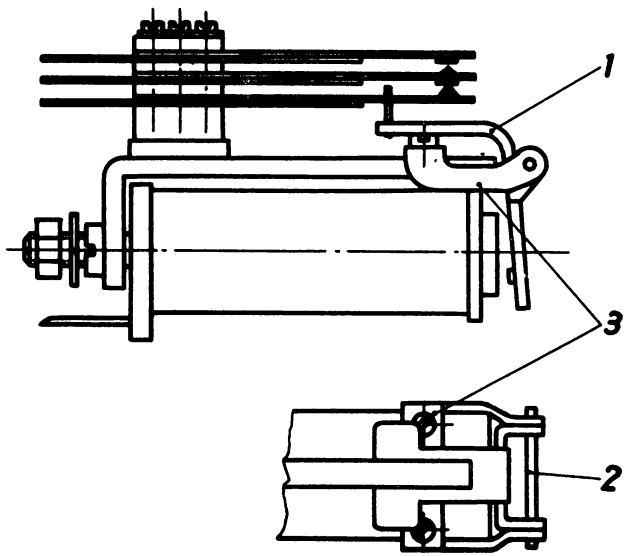


Bild 7

Vorteile des Achsenankerrelais:
Große Empfindlichkeit und Genauigkeit.

Stumpfankerrelais:
Der gewinkelte Anker 2 wird stumpf an das Ende des Joches 1 angesetzt und durch ein am Joch befestigtes Federblech 3 gegen Verschieben gesichert (Bild 8).

Vorteile des Stumpfankerrelais:
Guter magnetischer Schluß und günstige spezifische Leistung, relativ große Empfindlichkeit und Genauigkeit.

Bild 9 zeigt ein mittleres Rundrelais mit Stumpfanker vom VEB Funkwerk Leipzig.

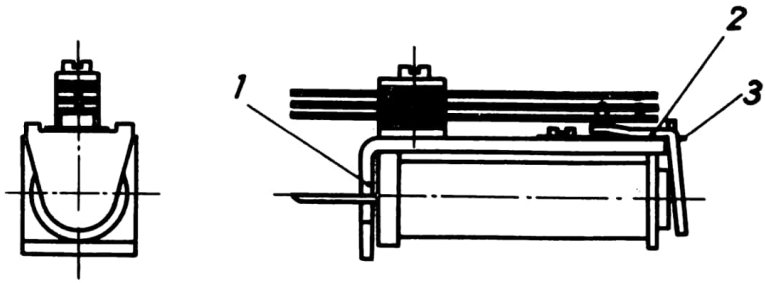


Bild 8

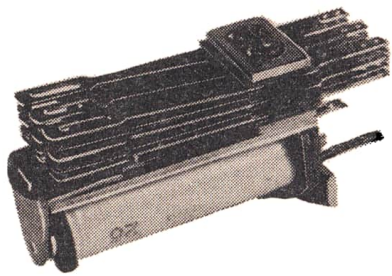


Bild 9

Wälzankerrelais:

Beim Wälzankerrelais (Bild 10) ist der Anker 2 an der

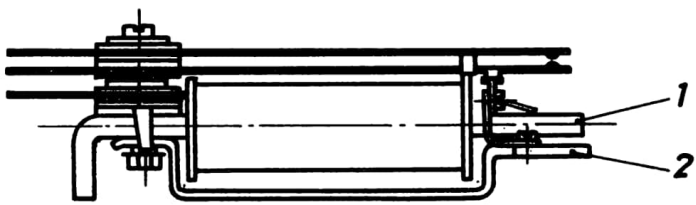


Bild 10

einen Seite des Kernes 1 auf einer Wälzfläche gelagert. Das andere vorstehende Ende des Kernes dient als Anzugsfläche für den abgewinkelten Anker. Der Eisenkreis besteht

also nur noch aus zwei Teilen, dem Kern und dem Anker. Das Joch entfällt. Das hat zwei bedeutende Vorteile:

1. Der Luftspalt an der Lagerstelle des Ankers fällt praktisch weg.
2. Der Streufluß wird zum Anzug des Ankers ausgenutzt.

Dadurch ergeben sich bezüglich der aufgewendeten Amperewindungen bis zu 10% Gewinn an magnetischer Zugkraft. Wälzankerrelais werden aus konstruktiven Gründen meist als Flachrelais mit einem flachen Kern ausgeführt. Bild 11 zeigt ein Flachrelais mit Wälzanker vom VEB Fernmeldewerk Arnstadt.

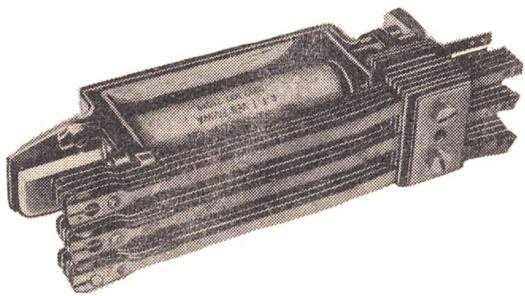


Bild 11

Zungenankerrelais:

Beim Zungenankerrelais (Bild 12) besteht der Anker aus

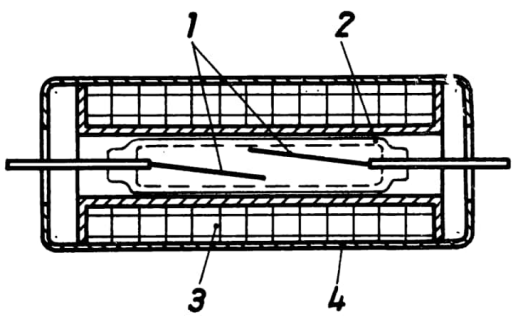


Bild 12

[illegible] Zungen 1, die in ein mit Schutzgas gefülltes [illegible] eingeschmolzen sind und gleichzeitig die Kontaktstücke bilden. Das Glasrohr befindet sich im Innern einer Spule 3. Der magnetische Kreis wird über das Eisenumschließung 4, das in diesem Fall das Joch darstellt, geschlossen. Der eigentliche Kern entfällt hierbei. Wird durch die Magnetspule ein magnetischer Fluß erzeugt, so legen sich die beiden elastischen Zungen aus magnetischem Material gegenseitig an und geben Kontakt.

In Bild 13 ist ein Zungenankerrelais mit einem Wechselkontakt gezeigt.

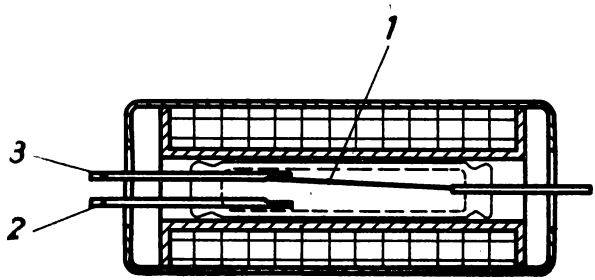


Bild 13

Die Zunge 1 befindet sich in der Ruhelage infolge elastischer Vorspannung an dem aus unmagnetischem Material bestehenden Anschlußstück 3 für den Ruhekontakt. Beim Erregen der Magnetspule wird die magnetische Zunge zum magnetischen Anschlußstück 2 des Arbeitskontaktes gezogen, so daß der Arbeitskontakt geschlossen wird. In die Spule können auch mehrere Glasröhrchen eingelegt werden, so daß man ein Zungenankerrelais mit mehreren Arbeits- bzw. Wechselkontakten erhält.

Vorteile des Zungenankerrelais:

1. Unempfindlichkeit gegen Staub, Feuchtigkeit und korrodierende Atmosphäre infolge des hermetischen Abschlusses der Kontakte.

2. Kurze Schaltzeiten infolge der sehr kleinen zu bewegenden Massen und des Fehlens von mechanischen Zwischengliedern.
3. Kurze Prellzeiten, da die magnetische Kraft direkt an der Kontaktstelle angreift.

Das Zungenankerrelais wird auch als Schutzrohrkontakt-Relais, Geko-Relais (VEB Statex, Ilmenau), Herkon-Relais (Herkon = hermetisch abgeschlossener Kontakt), Reed-Kontakt-Relais oder Trockenzungenrelais bezeichnet [2,5].

2.1.1.1.2. Berechnung von ungepolten Relais

Eine Relaisberechnung kann unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt werden:

a) Bei der Neuentwicklung von Relais sollen die zweckmäßigsten Abmessungen für die Konstruktion festgelegt werden. Die hierbei durchzuführenden Berechnungen sind sehr umfangreich und liefern meist nur annähernd genaue Ergebnisse.

b) Beim Einsatz bestimmter Relais mit vorgegebenem elektromagnetischem Kreis und Wickelraum ist es oft erforderlich, die für verschiedene Ankerbelastungen benötigten Amperewindungen, die Drahtstärken, die maximalen Windungszahlen und die Widerstandswerte zu bestimmen.

   Für derartige Berechnungen stehen meist von den relaisherstellenden Betrieben für spezielle Relaistypen herausgegebene Tabellen oder Kurvenblätter zur Verfügung, aus denen die entsprechenden Werte ermittelt werden können.

An dieser Stelle soll lediglich der Gang für eine überschlägige Berechnung eines ungepolten Relais angegeben werden, um einerseits nochmals die physikalischen Zusammenhänge an Hand mathematischer Beziehungen aufzuzeigen und zum anderen dem Praktiker die Möglichkeit zu geben,

beim Fehlen entsprechender Tabellen die für die Dimensionierung eines Relais erforderlichen Werte überschlägig ermitteln zu können.

Hierbei soll der Aufbau eines Relais nach Bild 14 zu Grunde gelegt werden.

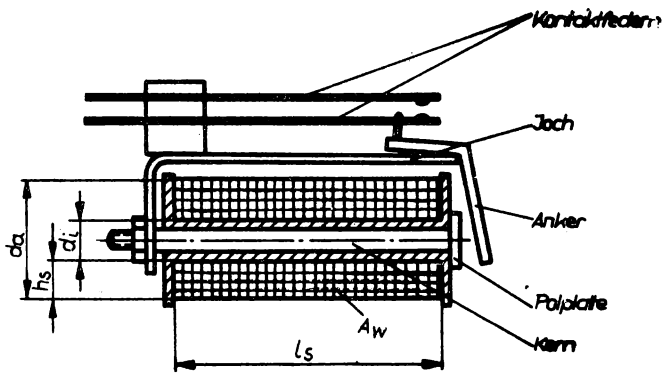


Bild 14

Berechnung des magnetischen Kreises:
Um den Anker anzuziehen, muß die magnetische Zugkraft F_m (s. Gleichung 1) folgende Gegenkräfte überwinden:
a) die elastische Gegenkraft F_f der Kontaktfedern,
b) die Reibungskraft F_r in der Ankerlagerung,
c) die Kraft F_b zur Beschleunigung des Ankers.

Dann gilt:

$$F_m = F_f + F_r + F_b . \qquad (2)$$

Wenn man mit l_f die Länge zwischen den Kontakten und der Einspannstelle, mit b_f die Breite und mit h_f die Höhe einer durchzubiegenden Kontaktfeder bezeichnet, so kann man für die Gegenkraft F_f einer Kontaktfeder bei Auslenkung der Feder an der Kontaktstelle um den Wert x in Näherung angeben (E = Elastizitätsmodul):

$$F_f = \frac{E b_f h_f^3}{4 l_f^3} \, x . \qquad (3)$$

Die Kraft F_f, mit der ein Arbeits- oder Ruhekontakt den Anker belastet, liegt etwa zwischen 30 und 60 p. Die Reibungskraft F_r ist bei guten Relaiskonstruktionen meist vernachlässigbar klein.
Die Kraft F_b zur Beschleunigung des Ankers ergibt sich aus dem Ankergewicht G, dem Ankerhub s (mittlerer Hub zwischen Anker und Polplatte) und der Anzugszeit t_{an} zu (g = Erdbeschleunigung):

$$F_b = \frac{2\,G\,s}{g\,t_{an}^2} \quad . \tag{4}$$

Aus der magnetischen Kraft F_m zwischen Anker und Polplatte läßt sich nach Gleichung 1 die im Luftspalt erforderliche Induktion berechnen (A_p = Querschnitt der Polplatte):

$$B = \frac{2\,\mu_o\,F_m}{A_p}. \tag{1a}$$

Der Induktionsfluß beträgt:

$$\phi = B\,A_p \quad . \tag{5}$$

Unter Berücksichtigung des Verlaufes des magnetischen Kreises ergeben sich daraus die gesamten Amperewindungen, die zur Erzeugung der magnetischen Urspannung erforderlich sind:

$$I \cdot w = \Theta = \phi\,(R_{m_K} + R_{m_J} + R_{m_A} + R_{m_L} + R_{m_P}). \tag{6}$$

Für die Berechnung der einzelnen magnetischen Widerstände gilt allgemein:

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad . \tag{7}$$

Bei überschlägigen Berechnungen ist es gewöhnlich ausreichend, wenn man für die Anzugsamperewindungen folgende Werte zu Grunde legt:

60 AW für das 1. Kontaktfedernpaar;
20 AW für das 2. Kontaktfedernpaar;
10 AW für jedes weitere Kontaktfedernpaar.

Elektrischer Kreis:
Die mittlere Windungslänge beträgt:

$$l_m = (d_i + h_s). \qquad (8)$$

Für den gesamten Wicklungsquerschnitt (Wickelfenster) erhält man:

$$A_w = l_s \cdot h_s = \frac{\pi\, w(d_d+\sigma)^2}{4\, k_f} = \frac{\pi\, w\, d_d^2}{4\, k_f\, k_\sigma} \cdot \qquad (9)$$

Dabei sind d_d der Durchmesser des Drahtes und σ die Dicke der Isolationsschicht. Um die Rechnung zu vereinfachen, wurde der Einfluß von σ in dem Faktor

$$k_\sigma = \frac{1}{(1 + \frac{\sigma}{d_d})^2}$$

zusammengefaßt. Bei Drähten mit einem Durchmesser von 0,05...0,5 mm und einer Lackisolationsschicht liegen die Werte für k etwa zwischen 0,5 und 0,8. k_σ ist der Füllfaktor, der das Verhältnis zwischen dem kreisförmigen Querschnitt des Drahtes und der pro Windung benötigten quadratischen Fläche des Wickelfensters berücksichtigt ($k_f = \frac{\pi}{4}$).

Der Widerstand der Wicklung berechnet sich mit den Gleichungen (8) und (9) wie folgt:

$$R = 4\, w \rho \frac{l_m}{\pi\, d_d^2} = w^2 \frac{4\rho\ (d_i+h_s)}{l_s h_s \cdot k_\sigma} \qquad (10)$$

Die aufgenommene elektrische Leistung (Verlustleistung) beträgt dann:

$$P = I^2R = (Iw)^2 \frac{4\rho\ (d_i + h_s)}{l_s \cdot h_s \cdot k_\sigma} \qquad (11)$$

Zu beachten ist ferner, daß in den Drähten im allgemeinen eine Stromdichte von 2,5 A/mm^2 nicht überschritten werden darf bzw. daß bei Dauerbelastung eine obere Leistungsgrenze eingehalten werden muß.

2.1.1.1.3. Ströme und Stromverhältnisse am Relais

In der Praxis sind folgende Ströme von Bedeutung:

a) Fehlstrom I_f:

Der Fehlstrom I_f ist der Strom, dessen magnetische Kraft gerade ausreicht, um den Anker aus der Ruhelage zu bewegen, ohne daß dabei bereits die Kontaktfedern betätigt werden (Bild 15b). Hierbei wird das als "Pimpelluft" bezeichnete Ankerspiel l_p überwunden (Bild 15a).

b) Anzugsstrom I_a:

Beim Anzugsstromwert I_a ist die Kontaktfeder F_1 so weit durchgebogen, daß sich die beiden Kontaktstücke gerade berühren (Bild 15c).

c) Betriebsstrom I:

Damit die Kontaktgabe unter einem bestimmten Druck erfolgt, müssen beide Federn F_1 und F_2 durchgebogen sein (Bild 15d). Der dazu erforderliche Strom wird als Betriebsstrom I bezeichnet.

d) Haltestrom I_h:

Beim Verringern des Stromes ist der Haltestromwert I_h dann erreicht, wenn sich die Feder F_2 nicht mehr durchbiegt, die Kontakte aber gerade noch geschlossen sind (Bild 15c). Wegen der Hysterese ist $I_a > I_h$.

e) Abfallstrom I_b:

Als Abfallstrom wird der Strom bezeichnet, bei dem auch die Kontaktfeder F_1 wieder gestreckt ist, wobei die Kontakte geöffnet sind und der Anker nahezu "abgefallen" ist (Bild 15b).

f) Störstrom I_s (Schaltungsfehlstrom):

Der Störstrom I_s ist der Strom, der auf Grund von Störeinflüssen unbeabsichtigt durch die Relaiswicklung

fließt.
Soll eine Relaisschaltung störungsfrei arbeiten, so muß $I_s > I_f$ sein.

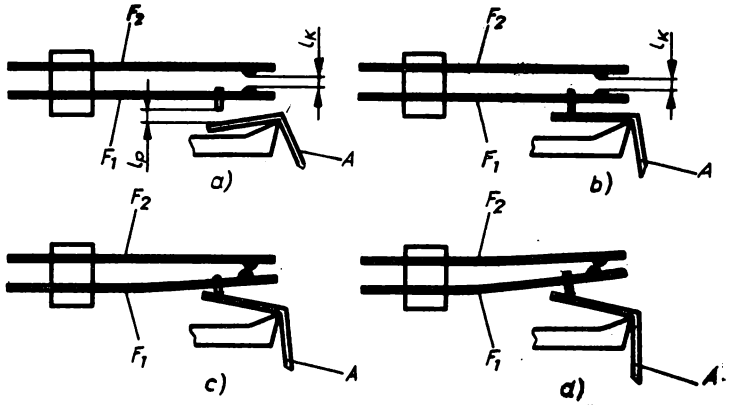


Bild 15 a - d

Mit den angegebenen Stromwerten können dann folgende Stromverhältnisse definiert werden:

a) Anzugssicherheit S_a:
Die Anzugssicherheit ist das Verhältnis von Betriebsstrom zu Anzugsstrom:

$$S_a = \frac{I}{I_a} .$$

Dieses Verhältnis berücksichtigt die Faktoren (Spannungsschwankungen, Kontaktunsicherheiten durch Erschütterungen), die für eine sichere Kontaktgabe maßgebend sind.

b) Haltesicherheit S_h:
Die Haltesicherheit ist das Verhältnis von Betriebsstrom zu Haltestrom:

$$S_h = \frac{I}{I_h} .$$

Auf Grund der Hysterese des Eisenkreises ist immer

$S_h > S_a$. Im Hinblick auf ein wirtschaftliches Arbeiten einer Relaisschaltung (Stromersparnis) ist es anzustreben, daß beide Sicherheitsfaktoren möglichst gleich groß sind.

c) Fehlstromsicherheit S_f:

Die Fehlstromsicherheit ist das Verhältnis von Fehlstrom zu Störstrom:

$$S_f = \frac{I_f}{I_s}.$$

Eine Relaisschaltung arbeitet nur dann störungsfrei, wenn $S_f > 1$ ist.

2.1.1.1.4. Die Kontakte des Relais

Die Kontakte haben die Aufgabe, einen sekundären Stromkreis zu öffnen oder zu schließen oder gleichzeitig einen Stromkreis zu öffnen und einen zweiten zu schließen. In dieser Hinsicht unterscheidet man dann zwischen Ruhekontakt, Arbeitskontakt und Umschaltkontakt (Bild 16).

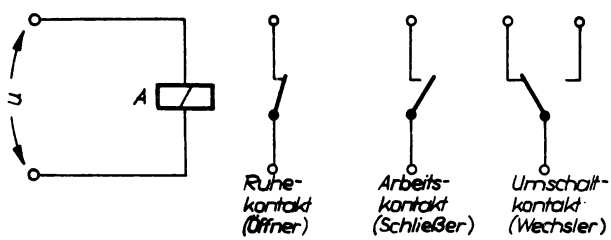


Bild 16

In der Regel werden mehrere Kontakte zu einem Kontaktsatz zusammengestellt. Auf ein Relais können normalerweise bis zu drei Kontaktsätze montiert werden (vergl. Bilder 5 bis 11).

Die Kontakte bestehen aus einer elastischen Feder und dem eigentlichen Kontaktstück, für das vorwiegend reines Silber verwendet wird. Mit derartigen Silberkontakten können

ströme bis zu 1 A geschaltet werden. Für höhere Schaltströme können diese Silberkontakte noch mit einem Überzug z.B. aus Platin versehen werden. Auch bei sehr kleinen Schaltströmen werden die Kontaktstücke zur Verringerung des Übergangswiderstandes mit Platin, Gold oder Palladium legiert.

Kontaktstörungen können durch Staub, Verschmutzung, chemische Einflüsse (z.B. organische Dämpfe, schwefelhaltige Atmosphäre), Materialwanderungen auf Grund von Funkenbildung beim Öffnen oder Schließen der Kontakte oder durch mechanische Erschütterungen verursacht werden.

Durch verschiedene Maßnahmen lassen sich diese Störeinflüsse in der Praxis meist etwas verringern.

Um die Materialwanderungen an den Kontakten klein zu halten, wendet man Funkenlöschschaltungen an, bei denen z.B. durch Parallelschalten eines Kondensators zum Kontakt die Bildung einer Glimmentladung oder eines Lichtbogens weitestgehend unterdrückt wird.

Staubstörungen innerhalb geschlossener Räume können durch geeignete Wahl der Luftfeuchte oder durch Aufrechterhaltung eines geringen Überdruckes im Raum vermindert werden. Um die Ablagerung von Staub auf den Kontaktflächen zu unterbinden, ordnet man das Relais bei der Montage so an, daß die Kontaktfedern mit ihrer Breitseite in vertikaler Richtung stehen. Eine Herabsetzung der Kontaktstörungen brachte auch die Einführung des Doppelkontaktes (Bild 17) mit sich.

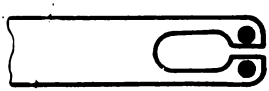


Bild 17

Einen sehr guten Schutz gegen Staub und chemische Einflüsse bewirkt man neuerdings dadurch, daß man die Kontakte in ein hermetisch abgeschlossenes Gefäß einbringt, das man meist noch mit einem Schutzgas füllt. (Vergl. Abschn.2.1.1.1.1.).

2.1.1.2. Gepolte Relais

Bei einem gepolten oder polarisierten Relais erfolgt die Betätigung der Kontakte in Abhängigkeit von der Stromrichtung. Grundsätzlich muß man dabei zwei Fälle unterscheiden:

1) Der Anker des Relais wird nur beim Strom bestimmter Richtung betätigt, Strom in Gegenrichtung bleibt unwirksam. Bei Strom einer ganz bestimmten Richtung wechseln die Kontakte also zwischen einer Ruhe- und einer Arbeitslage. Diese Bedingung kann mit jedem neutralen Relais erfüllt werden, wenn man dieses in einer bestimmten Richtung vorerregt oder einen Gleichrichter in den Erregerkreis schaltet.

2) Der Anker des Relais wird bei Strom in einer Richtung in die eine bei Strom in entgegengesetzter Richtung in die andere Lage bewegt. Um dieses Verhalten zu erzielen, werden die meisten gepolten Relais mit einem magnetischen Kreis für die Erregung durch den Steuerstrom und mit einem Dauermagnetkreis ausgerüstet. Beide Magnetkreise sind so angeordnet, daß sich der Steuerfluß und der Dauerfluß in ihrer Wirkung auf den Anker unterstützen oder gegeneinander gerichtet sind, je nachdem, welchen Richtungssinn der Steuerstrom hat.

Bei der Konstruktion von gepolten Relais muß darauf geachtet werden, daß sich beide Magnetkreise nicht störend beeinflussen. In diesem Zusammenhang sind verschiedene Relaiskonstruktionen bekannt geworden, die sich vor allem dadurch unterscheiden, wie der Steuer- und Dauerfluß in den beiden Magnetkreisen verlaufen [2].
Bei der in Bild 18 gezeigten Anordnung schließt sich der Steuerfluß hauptsächlich in dem die Steuerspulen tragenden Weicheisenkern 1 und durchläuft nicht den Dauermagnetkreis 2, während der Dauerfluß allerdings noch die beiden Schenkel des Weicheisenkreises durchsetzt. Sind beide Felder

so gepolt, daß Steuer- und Dauerfluß im linken Luftspalt gleichsinnig, im rechten Luftspalt also gegensinnig verlaufen, so wird der Anker 3 nach links bewegt.

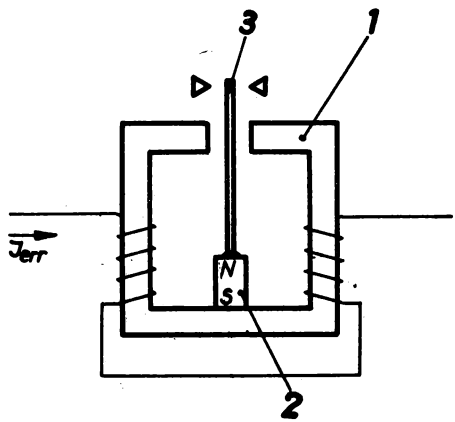
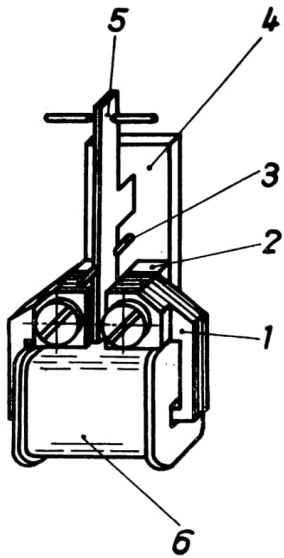


Bild 18

Bei dieser Anordnung ist noch von Nachteil, daß der Dauerfluß den Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskennlinie des Weicheisenkernes verschiebt. Dadurch kann der Steuerkreis bei gleicher Steueramperewindungszahl unter Umständen bis in das Sättigungsgebiet hinein ausgesteuert werden, so daß die Änderung der Steuerinduktion dann kleiner wird. Damit wird aber auch die Anzugskraft des Ankers verringert. Bei der im Bild 19 dargestellten Ausführung sind die beiden Magnetkreise aus diesem Grunde so angeordnet, daß Dauerfluß und Steuerfluß nur auf sehr kleinen Strecken, nämlich in den Polen des Weicheisenkernes und im Luftspalt gemeinsam verlaufen, wodurch eine störende gegenseitige Beeinflussung der beiden magnetischen Felder fast vollkommen vermieden wird. Der Steuerfluß durchsetzt den lamellierten Weicheisenkern 1 mit der Erregerwicklung 6, während der vom Dauermagneten 4 herrührende Fluß sich über den Anker 5, der zur Verringerung des magnetischen Kreiswiderstandes seitlich verlängert ist, den Luftspalt,



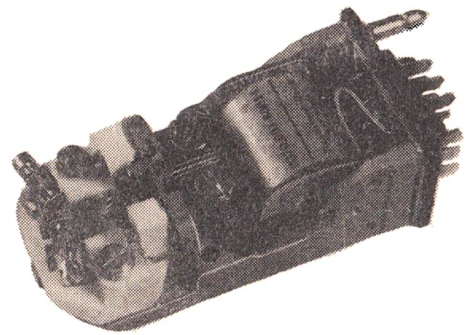
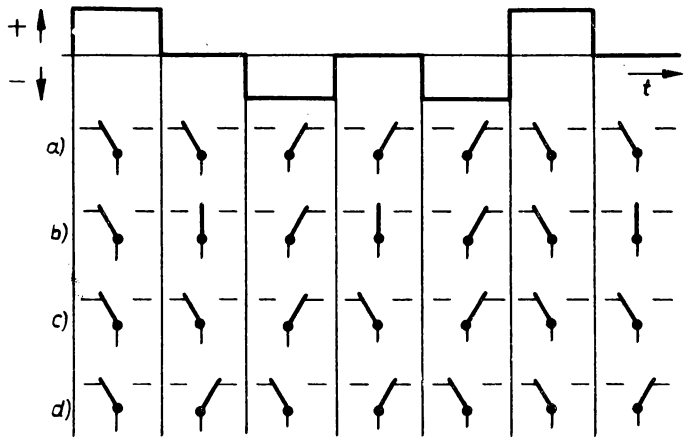


Bild 19 Bild 20

die Polschuhe des Weicheisenkernes und das Verbindungsstück 2 schließt. Der Anker ist auf einer Achse 3 oder mittelts eines Spannbandes gelagert. Nach diesem Prinzip arbeiten die von Siemens und RFT gefertigten polarisierten Relais (Bild 20).

Die Richtkraft F_F des Spannbandes und die im Luftspalt wirkenden magnetischen Kräfte, die Dauerflußkraft F_D und die Steuerflußkraft F_S bestimmen die Arbeitsweise des jeweiligen Relaistyps, die im Bild 21 im Vergleich zur Arbeitsweise eines neutralen Relais erläutert ist. Ist $F_D > F_F$, so bleibt der Anker jeweils in der Lage, in die er durch den letzten Steuerimpuls gebracht wurde (gepoltes Relais mit 2 Ruhelagen des Ankers). Wenn $F_F > F_D$ gewählt wird, dann kehrt der Anker bei stromloser Steuerspule in seine Mittellage zurück (gepoltes Relais mit mittlerer Ruhelage des Ankers). Bei mechanisch oder magnetisch unsymmetrischer Einstellung erhält man ein gepoltes Relais mit einseitiger Ruhelage des Ankers.



a) Gepoltes Relais mit 2 Ruhelagen des Ankers
b) Gepoltes Relais mit mittlerer Ruhelage des Ankers
c) Gepoltes Relais mit einseitiger Ruhelage des Ankers
d) Neutrales Relais

Bild 21

2.1.1.3. Wechselstromrelais

Das Wechselstromrelais ist dazu bestimmt, auf Wechselstrom wie auf Gleichstrom in gleicher Weise anzusprechen, ohne dabei die Schwingungen des Wechselstromes mitzumachen.

Bei sinusförmiger Erregung ändert sich die Zugkraft F mit der Zeit gemäß Gleichung (1) nach einer Sinusquadratkurve (Bild 22)

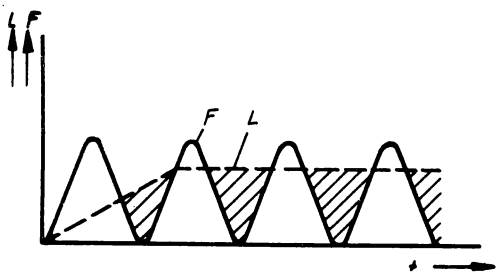


Bild 22

Die Last L hingegen würde zunächst proportional mit der Federausbiegung ansteigen und nach vollzogenem Ankeranzug konstant bleiben. In den schraffierten Bereichen ist die

Last größer als die Zugkraft, so daß der Anker wieder abfällt, und zwar um so schneller, je kleiner die Ankermasse ist. Anker mit großer Trägheit werden innerhalb dieser schraffierten, kurzen Zeitintervalle keine nennenswerten Bewegungen ausführen. Normale Schneiden- oder Stumpfankerrelais lassen sich demgemäß durch Aufsetzen zweier gleichschwerer Massestücke auf die beiden Enden des winkelförmigen Ankers zur Erhöhung der Ankerträgheit als Wechselstromrelais verwenden. Derartige Wechselstromrelais haben jedoch den Nachteil, daß Anzug- und Abfallverzögerung sehr stark phasenabhängig sind. Bessere Ergebnisse erhält man mit Relais, bei denen zwei um etwa 90 Grad phasenverschobene Strom- bzw. Flußkomponenten für den Anzug des Ankers ausgenutzt werden [2].

2.1.1.3.1. Wechselstromphasenrelais mit zwei getrennten Eisenkreisen

Zur Aufteilung des Erregerstromes i_{err} in zwei um 90 Grad phasenverschobene Komponenten wird das Relais mit zwei Spulen versehen, die auf getrennten Kernen angeordnet sind, aber auf einen gemeinsamen Anker arbeiten. Vor eine Spule wird dabei ein Kondensator C geschaltet. Bild 23 zeigt das Schaltbild und das Ersatzschaltbild eines derartigen Wechselstromphasenrelais.

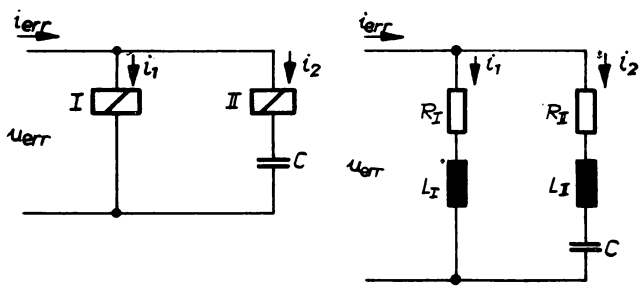


Bild 23

Das dazugehörige Zeigerdiagramm der Ströme und Spannungen ist in Bild 24 dargestellt.

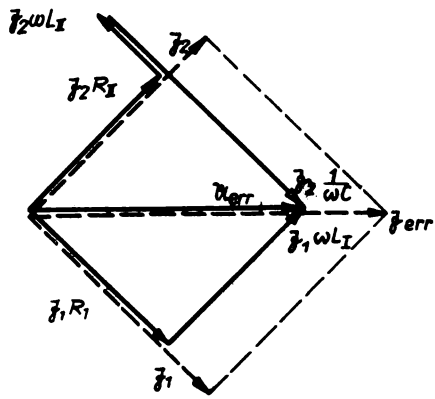


Bild 24

Widerstände und Induktivitäten der Spulen werden zunächst so bemessen, daß die Ströme der Erregerspannung u_{err} um 45 Grad nacheilen. Durch Vorschalten eines Kondensators vor die Spule II wird die Phase des Stromes i_2 so weit gedreht, daß er der Spannung u_{err} um 45 Grad vorauseilt. Für die Bemessung der einzelnen Größen ergibt sich also:

$$R_I = R_{II} = \omega L_I = \omega L_{II} = \frac{1}{2\omega C} .$$

Für die Zugkraft folgt dann:

$$F = c_1 \cdot i_1^2 + c_2 \cdot i_2^2$$

wobei die Größen c_1 und c_2 die Daten der beiden magnetischen Kreise enthalten. Sind diese in gleicher Weise aufgebaut, so ist $c_1 = c_2 = c$.

Auf Grund der Dimensionierung ist ferner

$$I_1 = I_2 = I.$$

Damit erhält man für die Zugkraft folgenden zeitunabhängigen Wert:

$$F = c\, I^2(\sin^2\omega t + \cos^2\omega t) = c\, I^2 .$$

Beim Abfall des Relais entlädt sich der Kondensator über die Reihenschaltung beider Spulen, so daß eine phasen-

abhängige Abfallverzögerung auftritt. Durch Vorschalten entsprechend abgestimmter Kapazitäten vor beide Spulen läßt sich dieser Einfluß vermindern, da dann beim Ausschalten beide Kapazitäten in Reihe liegen.

2.1.1.3.2. Wechselstromphasenrelais mit Kurzschlußwicklung

Bei einer anderen Ausführung des Wechselstromphasenrelais besitzt der Eisenkern zwei Pole (Bild 25).

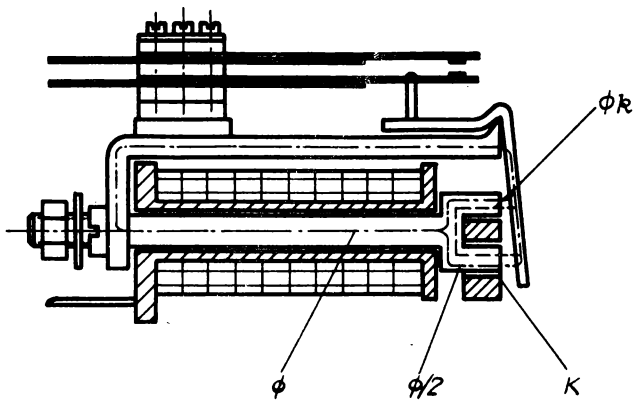


Bild 25

Über den einen Pol wird ein Kupferkurzschlußring K geschoben. Der von der Erregerspule erzeugte Fluß Φ teilt sich in den Polen in die beiden Teilflüsse $\Phi/2$ auf. Der Fluß $\Phi/2$ im unteren Pol induziert in der Kurzschlußwicklung die Spannung u_k, die dem Fluß $\Phi/2$ um 90 Grad nacheilt (Bild 26). Als Folge davon fließt in der Kurzschlußwicklung der Strom i_k, der infolge induktiver Last gegenüber u_k nacheilt. Die Magnetisierungskomponente des Stromes i_k erzeugt den Fluß Φ_k. Durch vektorielle Addition erhält man die resultierenden Flüsse $\Phi/2 + \Phi_k$ und $\Phi/2 - \Phi_k$ innerhalb der beiden Pole. Aus dem Zeigerdiagramm ist ersichtlich, daß zwischen $\Phi/2 + \Phi_k$ und $\Phi/2 - \Phi_k$ eine Phasenverschiebung von 90 Grad erreich-

bar ist. Allerdings sind die Amplituden der beiden resultierenden Teilflüsse nicht gleich, so daß der konstanten Zugkraft dadurch noch eine Wechselkomponente überlagert wird.

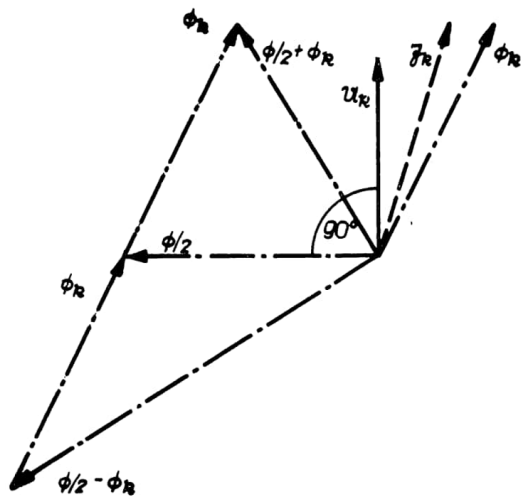


Bild 26

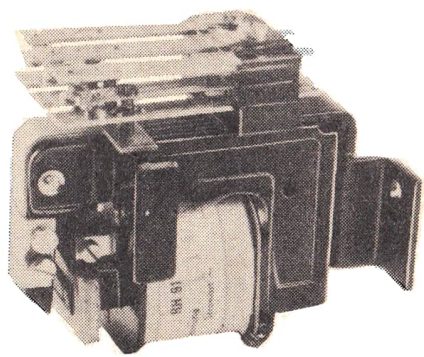


Bild 27

Bild 27 zeigt ein Wechselstromphasenrelais mit Kurzschlußring und Achsenanker vom VEB Elektro-Apparate-Werke Berlin Treptow.

2.1.2. Elektrodynamische Relais

Prinzipielle Wirkungsweise:

Durch eine elektrodynamische Kraft, die ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld erfährt, werden im Arbeitsstromkreis Kontakte geschlossen oder geöffnet.

2.1.2.1. Tauchspulrelais

Im Luftspalt 3 eines permanenten Topfmagneten 1 (Bild 28) wird ein radiales Magnetfeld B erzeugt, in dem sich, aufgeklebt auf eine Membran 2, die Erregerspule 4 befindet, die vom Steuerstrom I_{st} durchflossen wird. Auf die Spule wirkt dann die elektrodynamische Kraft:

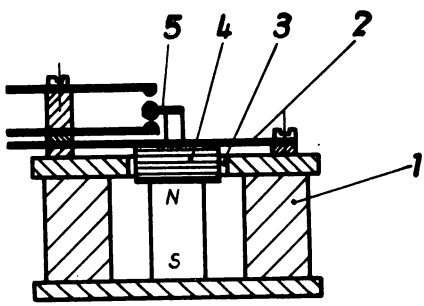


Bild 28

$$F = \pi \, d \, w \, B \, I_{st} \qquad (12)$$

(d = Durchmesser der Spule, w = Windungszahl der Spule).

Dadurch wird die Membran ausgelenkt und das mit der Membran verbundene Kontaktstück 5 betätigt. Je nach der Stromrichtung wird entweder der obere oder der untere Kontakt geschlossen. In diesem Sinne kann das Tauchspulrelais als polarisiertes Relais aufgefaßt werden.

Tauchspulrelais sind sehr empfindlich. Der Leistungsbedarf für die Erregerspule beträgt etwa 10^{-7} Watt bei Erregerströmen von 5 bis 8 mA. Die Schaltleistung wird mit etwa 0,8 W angegeben [4].

2.1.2.2. Drehspulrelais

In einem homogenen radialen Magnetfeld, das von einem Dauermagneten 6 (Bild 29) erzeugt wird, ist eine Spule 2

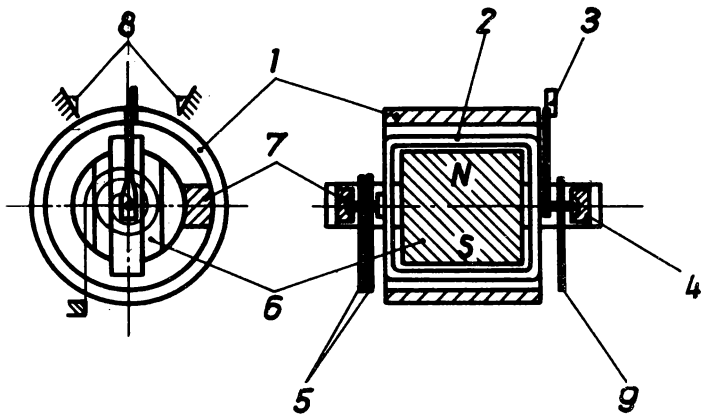


Bild 29

drehbar angeordnet (Prinzip des Drehspulmeßinstrumentes). Sie wird über Spiralfedern 5, die zugleich das mechanische Rückstellmoment liefern, stromgespeist. Für das vortreibende Moment gilt:

$$M_V = I\ B\ a\ b\ w \qquad (13)$$

(a = Länge der Spule, b = Breite der Spule).
Das rückstellende Moment ist gegeben durch:

$$M_r = c\ \alpha \qquad (14)$$

(c = Federkonstante, α = Ausschlagwinkel).
Aus dem Momentengleichgewicht folgt für den Ausschlagwinkel

$$\alpha = \frac{B\ a\ b\ w}{c}\ I. \qquad (15)$$

Mit dem Spulenrahmen ist eine Kontaktfahne 3 isoliert verbunden, deren Potential über eine weitere Spiralfeder 9 an die äußeren Anschlußstifte geführt wird. Am Gehäuse sind zwei Kontakte 8 angeordnet, die meist von außen einstellbar sind. Bei Drehung des Spulenrahmens wird entweder der linke oder der rechte Kontakt geschlossen, je nach Polarität des Spulenstromes. Auch das Drehspulrelais ist also ein gepoltes Relais.

Gewöhnlich ist mit der Drehspule noch ein Zeiger fest

verbunden, der den jeweiligen Stromwert auf einer Skala anzeigt. Drehspulrelais zeichnen sich durch eine besonders große Empfindlichkeit aus. Der Leistungsbedarf für die Erregerspule beträgt etwa 10^{-8} W bei Erregerströmen von $1\mu A$. Die Schaltleistung wird mit maximal 2 Watt angegeben.

2.1.3. Thermo-Relais

Prinzipielle Wirkungsweise:

Durch Kräfte, die durch Wärmeausdehnung bei Temperaturerhöhung entstehen, werden im Arbeitsstromkreis Kontakte geschlossen oder geöffnet.

Praktisch werden hauptsächlich die Wärmeausdehnungen von Metallen und Gasen zur Herstellung von Thermo-Relais ausgenutzt.

2.1.3.1. Thermo-Bimetallrelais

Bimetall ist aus zwei Metallschichten aufgebaut, die auf ihrer ganzen Berührungsfläche fest miteinander verbunden sind, und die aus verschiedenen Materialien mit möglichst unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten der Längenausdehnung bestehen. Bei der Erwärmung des Bimetalls entsteht infolge der ungleichen Wärmeausdehnung beider Komponenten eine Ausbiegung des Materials. Bimetallelemente können sehr unterschiedliche geometrische Formen aufweisen. Bild 30 zeigt die einfachste Form eines Bimetallelementes, den geraden Bimetallstreifen mit über der gesamten Länge l gleichmäßig rechteckigem Querschnitt q = bh.

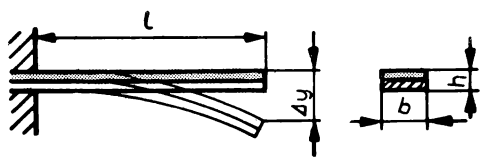


Bild 30

Wird dieser Streifen überall gleichmäßig um die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ erwärmt, so wird seine Ausbiegung

gegenüber der Ausgangslage durch folgende Gleichung beschrieben [3]:

$$\Delta y = \frac{K \; l^2 \; 10^{-4}}{h} \Delta \vartheta . \qquad (16)$$

K ist die spezifische Ausbiegung:

$$K = 10^4 \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\frac{4}{3} + \frac{(E_2 h_2^2 - E_1 h_1^2)^2}{3 h^2 h_1 h_2 E_1 E_2}} . \qquad (17)$$

Darin bedeuten:

α_1, α_2: Temperaturkoeffizient der Längenausdehnung von Schicht 1 bzw. Schicht 2;

E_1, E_2: Elastizitätsmodul von Schicht 1 bzw. Schicht 2;

h_1, h_2: Höhe von Schicht 1 bzw. Schicht 2.

In Tabelle 1 sind die spezifischen Ausbiegungen und andere Kennwerte von Thermobimetallen des VEB Halbzeugwerk Auerhammer, Aue/Sachsen, angegeben.

Die Erwärmung der Bimetallelemente kann einmal unmittelbar durch die Temperatur des das Thermorelais umgebenden Mediums erfolgen. In dieser Ausführung wird das Thermo-Bimetallelement als unstetiges Temperatur-Eingangsglied in unstetig arbeitenden Steuereinrichtungen, als überwachendes Meßglied für Temperaturen in Sicherheitssystemen oder als Zweipunktregler zur Temperaturregelung verwendet.

Zum anderen können die Bimetallelemente durch einen elektrischen Strom direkt (Bild 31a) oder indirekt über eine Heizwicklung (Bild 31b) erwärmt werden. In dieser Form werden die Bimetallrelais als thermische Überstromauslöser in Motorschutz-, Leitungsschutz- und Leistungsschaltern verwendet, wobei das Bimetall durch den gleichen Strom erwärmt wird, der auch die Erwärmung oder Belastung der zu schützenden Einrichtung oder Anlage hervorruft.

Sorte	Spez. Ausbiegung K 1/grd	Temperaturbereich °C	Grenztemperatur °C	Spez. elektrischer Widerstand mm^2/m				Härte HV $\frac{kp}{mm^2}$	Zuläss. Biegespann. kp/mm^2 bei 20°C	Elastizitätsmodul kp/mm^2
				bei 20°C	bei 100°C	bei 200°C	bei 300°C			
155	0,155	- 20 bis +250	400	0,78	0,85	0,93	1,02	180	20	$14 \cdot 10^3$
145	0,145									
135	0,135	- 20 bis +300								
110	0,110	- 20 bis +400	450	0,70	0,79	0,87	0,92			$15 \cdot 10^3$

Tabelle 1: Thermobimetalle vom VEB Halbzeugwerk Auerhammer, Aue/Sachsen

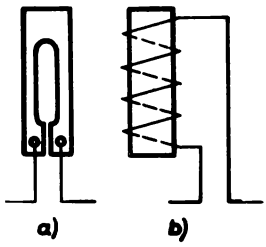


Bild 31

In vielen Fällen ist es dabei erforderlich, den Einfluß der Raumtemperatur auf die Ausbiegung des Bimetallelementes zu kompensieren. Zu diesem Zweck kann man das Bimetallelement aus einzelnen Teilen zusammensetzen, deren Ausbiegungen infolge Temperaturänderung des umgebenden Mediums sich gerade aufheben. Durch die Heizwicklung wird dabei nur ein bestimmter Teil des Bimetallelementes erwärmt, wodurch die Arbeitsausbiegung erfolgt.

Im Bild 32 sind einige der möglichen Ausführungsformen kompensierter Bimetallrelais aufgezeigt. In Bild 32 a

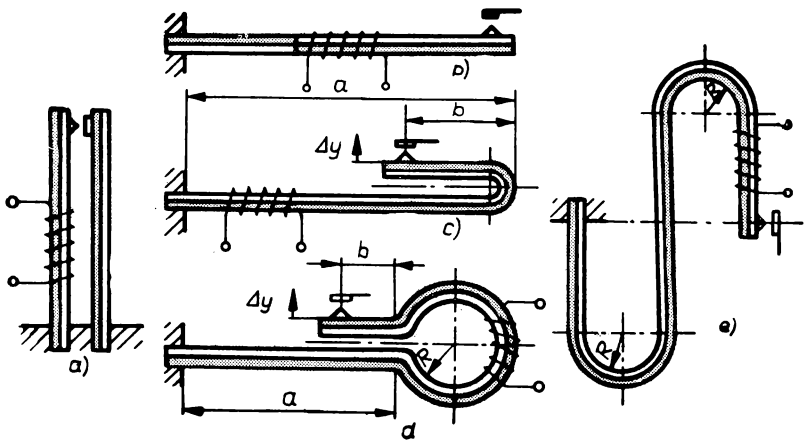


Bild 32 a - e

besteht das Bimetallrelais aus zwei gleichlangen Bimetallstreifen, die bei Änderung der Umgebungstemperatur in der gleichen Weise ausgebogen werden, so daß sich der Abstand der Kontakte hierbei nicht ändert.

Bei der in Bild 32b gezeigten Ausführung ist der Bimetallstreifen in zwei Abschnitte unterteilt, in denen die

Schichten mit den größeren Temperaturausdehnungskoeffizienten auf den einander entgegengesetzten Seiten angeordnet sind, so daß die Ausbiegung an der Kontaktstelle unabhängig von der Umgebungstemperatur ist.

Die Ausbiegung des in Bild 32 c dargestellten gebogenen Bimetallstreifens beträgt an der Kontaktstelle bei gleichmäßiger Erwärmung infolge Änderung der Umgebungstemperatur:

$$\Delta y = \frac{K\,10^{-4}}{h}\,(b^2 - a^2 + 2ab)\,\Delta\vartheta. \qquad (18)$$

Für $a = b\,(1 + \sqrt{2})$
wird diese Ausbiegung zu Null.

Bei dem Bimetallrelais nach Bild 32d ist die Ausbiegung an der Kontaktstelle bei gleichmäßiger Erwärmung des Streifens durch folgende Gleichung gegeben:

$$\Delta y = \frac{K\,10^{-4}}{h}\,(b^2 - a^2 + 2ab + 4R^2 + 4\pi Rb)\,\Delta\vartheta \quad . \qquad (19)$$

Diese Ausbiegung wird für

$$a = b + \sqrt{2b^2 + 4R^2\pi + 4\pi Rb}$$

zu Null.

Bei dem nach Bild 32e geformten Bimetallstreifen addieren sich die Teilausbiegungen ebenfalls derart, daß die resultierende Ausbiegung an der Kontaktstelle bei gleichmäßiger Erwärmung des gesamten Streifens infolge Änderung der Umgebungstemperatur Null ist.

Bei thermischen Überstromauslösern für Motorschutzschalter oder Sicherungsautomaten ist der Bimetallstreifen meist Bestandteil eines Klinkenmechanismus. Aus Bild 33 ist das Prinzip eines derartigen Klinkenmechanismus zu ersehen, der als Energiespeicher wirkt. Damit die Kontakte eines Bimetallrelais beim Schalten größerer Ströme möglichst schnell schließen oder öffnen, läßt man bisweilen auf das Bimetallelement neben den durch die Wärmeaus-

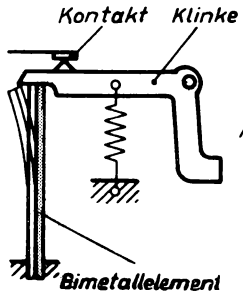


Bild 33

dehnung hervorgerufenen Kräften zusätzlich äußere Kräfte einwirken. Dadurch läßt sich eine Arbeitskennlinie mit einem instabilen Bereich erzielen, so daß die Kontakte beim Erreichen einer bestimmten Ausbiegung sprunghaft bewegt werden [3].

2.1.3.2. Thermo-Gasrelais

Thermo-Gasrelais (Bild 34) bestehen im wesentlichen aus

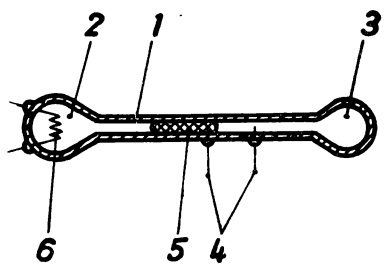


Bild 34

einem Kapillar-Rohr 1, das beiderseitig in etwas größere Hohlräume 2 und 3 übergeht. Die gesamte Anordnung ist mit einem Gas, z.B. Stickstoff von hohem Druck gefüllt. In dem Hohlraum 2 (Heizraum) befindet sich ein Heizdraht, über den beim Einschalten des Steuerstromes das Gas erwärmt wird. Durch das sich hierbei ausdehnende Gas wird der im Kapillar-Rohr befindliche Quecksilberfaden 5 so weit zum anderen Hohlraum hin verschoben, bis der Druck beider Hohlräume wieder gleich ist. Bei dieser Bewegung des Quecksilberfadens werden die im Kapillar-Rohr seitlich angeordneten Kontakte 4 verbunden [4].

2.1.4. Schrittschalter und Motordrehwähler

Für Programmsteuerungen werden sehr häufig Schrittschalter verwendet, bei denen in vorgegebener Reihenfolge

Kontakte betätigt werden können. Als Antrieb dient dabei ein Elektromagnet (Bild 35), dessen Anker 2 beim Anzug eine Stoßklinke 3 bewegt, durch die bei jedem neuen Stromimpuls ein gezahntes Triebrad 4 um einen "Schritt" weitergedreht wird. Dadurch wird der mit dem Triebrad verbundene Kontaktarm 5 von einem Kontaktsegment zum nächsten

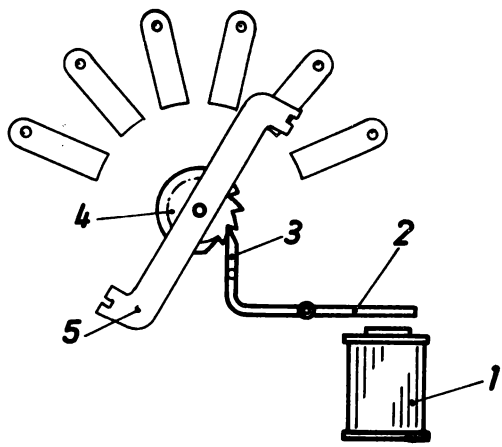


Bild 35

weitergeschaltet. Die zum Weiterschalten erforderlichen Impulse können einmal einzeln der Steuereinrichtung entnommen werden. Zum anderen kann der Schrittschalter auch durch eine fortlaufende Impulsfolge betrieben werden. Zu diesem Zweck ist am Anker des Schrittschalters noch ein Kontakt angeordnet, mit dem sich eine Selbstunterbrecherschaltung aufbauen läßt. Bild 36 zeigt einen Schrittschalter vom VEB Werk für Signal- und Sicherungstechnik Berlin.

Zur Weiterschaltung des Kontaktarmes kann anstelle des Schrittantriebes auch ein Motorantrieb gewählt werden, wie das bei dem im Bild 37 gezeigten Motordrehwähler der Fall ist. Während der Schrittschalter nur bei jedem neu eintreffenden Impuls um einen Schritt weitergeschaltet wird, bewegt sich der Kontaktarm des Motordrehwählers mit einer gleichförmigen Drehgeschwindigkeit an den Kontakt-

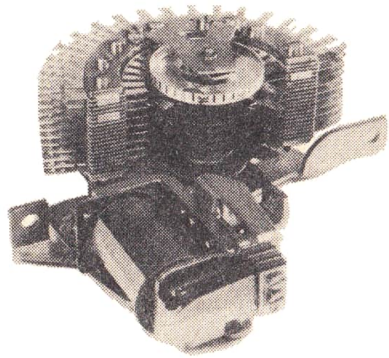


Bild 36

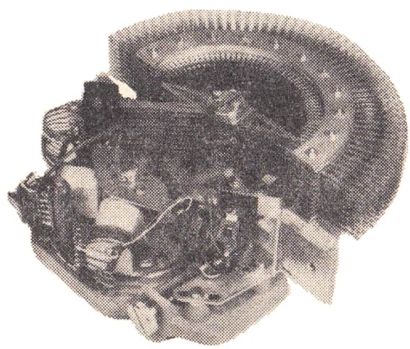


Bild 37

segmenten vorbei. Um den Motordrehwähler für die gleichen Aufgaben verwenden zu können wie den Schrittschalter, nämlich, daß nach Ablauf eines Steuertaktes um einen "Schritt" weitergeschaltet wird, muß der Motor jeweils beim Erreichen des nächsten Kontaktsegmentes abgebremst werden [5, 9].

Übungen

1) Bei welchen Relaisarten erfolgt die Betätigung der Kontakte in Abhängigkeit von der Stromrichtung ?

2) Welche Bedeutung hat der Klebstift beim Relais ? Erläutern Sie die physikalischen Zusammenhänge!

3) Unter welchen Bedingungen wird die Kraft im Luftspalt eines Relais bei fest vorgegebener Luftspaltlänge l_L und veränderlich angenommenem Luftspaltquerschnitt A_L ein Maximum ?

4) Welche Bedeutung haben die Anzugssicherheit und die Haltesicherheit bei Relais ?
Durch welche Maßnahmen kann man erreichen, daß beide Sicherheitsfaktoren nahezu gleich groß werden ?

5) Wie ändern sich die unterzubringende Windungszahl, der erforderliche Strom, die aufzubringende Amperewindungszahl, der Widerstand der Wicklung und die Verlustleistung bei einem Relais, wenn der Drahtdurchmesser um den Faktor n verringert und die Spule bei gleichem Wicklungsquerschnitt dabei ebenfalls voll bewickelt wird ?

6) Wie ist es zu erklären, daß die für überschlägige Berechnungen angegebenen Anzugsamperewindungen pro Kontaktfedernpaar mit steigender Kontaktzahl sinken ?
(vergl. S. 18!)

7) Bestimmen Sie überschlägig, mit welchem Strom ein Rundrelais mit 6 Kontakten bei einer Betriebsspannung von 24 V betrieben werden muß und wie groß dabei die Windungszahl und der Drahtdurchmesser zu wählen sind, wenn eine zweifache Anzugssicherheit gefordert wird. Die Abmessungen des Spulenkörpers betragen: l_s = 47 mm, d_i = 7 mm, d_a = 17 mm. Ferner ist vorgegeben:

$$\varrho = 17{,}8 \frac{m\,\Omega \cdot mm^2}{m} \quad ; \quad k_\sigma = 0{,}6$$

2.2. Kontaktlose Bauelemente

Obwohl die Bauelemente mit Kontakten auf Grund ihrer nahezu idealen Schaltcharakteristik für digitale Steuerungsaufgaben als besonders geeignet erscheinen, haben zum Teil schwerwiegende Nachteile dieser Kontaktelemente, so z.B. die Störanfälligkeit der Kontakte und die Empfindlichkeit gegen Erschütterungen (siehe Tabelle 2) dazu geführt, daß in neuerer Zeit auf vielen Anwendungsgebieten der unstetigen Steuerungstechnik in erhöhtem Maße kontaktlose Bauelemente eingesetzt werden.

Zunächst wurden zur Realisierung der logischen Verknüpfungen Elektronenröhren verwendet. Obwohl sich dabei extrem kurze Schaltzeiten erreichen lassen, haben sich derartige Elemente zumindest bei industriellen Steuerungen nicht in größerem Umfang durchgesetzt, da sich die erforderlichen hohen Betriebsspannungen, die großen Verlustleistungen, der große Raumbedarf, die Stoß- und Vibrationsempfindlichkeit und die zum Teil beschränkte Lebensdauer von Elektronenröhren für viele Anwendungsfälle als nachteilig erwiesen haben.

Für Zähl- und Kippschaltungen werden häufig Kaltkatodenröhren verwendet, die im Bereich der Glimmentladung arbeiten und demzufolge keine zusätzliche Heizleistung benötigen. Von Nachteil sind auch hier die hohen Betriebsspannungen und die große Störanfälligkeit (z.B. Lichtabhängigkeit der Zündung).

In neuerer Zeit werden in erhöhtem Maße Halbleiter-Bauelemente für unstetige Steuerungen eingesetzt. Niedrige Betriebsspannung, keine Heizung, kleiner Raumbedarf, geringes Gewicht, Schlag- und Vibrationsunempfindlichkeit und relativ lange Lebensdauer sind dabei für die Praxis nicht zu unterschätzende Vorteile.

Als besonders robuste Bauelemente bieten sich darüber

	Bauelemente mit Kontakten	Kontaktlose Bauelemente
Vorteile	Erregerkreis relativ stark überlastbar hohe Betriebstemperaturen zulässig zwei Stromrichtungen im Arbeitskreis möglich galvanische Trennung zwischen Steuer- und Laststromkreis	kleine Ansprechzeiten erhöhte Ansprechempfindlichkeit prellfreie Kontaktabgabe nicht lageabhängig erschütterungsunempfindlich
Nachteile	Abnutzung der Kontakte relativ große Ansprechzeiten kleine Arbeitsgeschwindigkeiten relativ große Ansprechleistung Prellen der Kontakte lageabhängiges Betriebsverhalten Erschütterungsempfindlichkeit Explosionsgefahr Wartung der Kontakte	endlicher Widerstand im ausgeschalteten Zustand Steuer- und Laststromkreis sind meist nicht galvanisch getrennt Im Lastkreis ist meist nur eine Stromrichtung möglich

Tabelle 2: Vergleich zwischen Bauelementen mit Kontakten und kontaktlosen Bauelementen

hinaus die Magnetverstärker an, die gegenüber den Halbleiterbauelementen auch bei noch höheren Temperaturen eingesetzt werden können. Beim Aufbau umfangreicherer Steuerungen wirken sich jedoch der große Raumbedarf und das hohe Gewicht meist nachteilig aus. Um kürzere Schaltzeiten zu erlangen, geht man vielfach zu höheren Frequenzen der Betriebsspannung über.

Sehr betriebssichere Bauelemente sind auch die Ferritkerne, die ihr Hauptanwendungsgebiet in der digitalen Rechentechnik haben.

Bezüglich des Aufbaues und der Eigenschaften der aufgezählten Grundbauelemente, die in kontaktlosen Steuereinrichtungen verwendet werden, kann in diesem Rahmen nur auf Spezialliteratur verwiesen werden [1, 5, 6, 8].

2.3. Technische Realisierung von logischen Verknüpfungsgliedern

Die im Lehrbrief "Berechnung von Schaltsystemen" definierten Grundverknüpfungen Konjunktion, Disjunktion und Negation können auf verschiedene Art schaltungstechnisch realisiert werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen logischen Verknüpfungsgliedern mit Kontakten und kontaktlosen Logikelementen. $x_1, x_2, \ldots, x_n$; $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \ldots, \bar{x}_n$ sind die Eingangsgrößen einer Schaltung und stellen die Variablen einer logischen Rechenoperation dar. $y_1, y_2, \ldots, y_m$; $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \ldots, \bar{y}_m$ sind die entsprechenden Ausgangsgrößen.

Eingangs- und Ausgangsgrößen können nur die zwei diskreten Werte 0 und L annehmen. Diese Werte können entweder zeitunabhängig sein (stationärer Betrieb) oder nur innerhalb bestimmter Zeiten auftreten (Impulsbetrieb).

Bei stationärem Betrieb stehen die Ausgangsgrößen zu jedem beliebigen Zeitpunkt entweder als 0-Signal oder als

L Signal zur Verfügung. Bei Impulsbetrieb wird längs der Zeitachse eine Quantelung vorgenommen, so daß die logischen Verknüpfungen nur zu definierter Zeit gebildet werden.

Um eine logische Funktion elektrisch nachbilden zu können, müssen den beiden Zuständen 0 und L einer binären Variablen elektrische Äquivalente zugeordnet werden. Aus der Vielzahl der vorhandenen Möglichkeiten sollen hier nur einige Wertepaare angegeben werden:

Stationärer Betrieb:

Positive Gleichspannung	-	keine Gleichspannung
Negative Gleichspannung	-	keine Gleichspannung
Positive Gleichspannung	-	Negative Gleichspannung
Wechselspannung vorhanden	-	keine Wechselspannung vorhanden

Impulsbetrieb:

Positiver Impuls	-	kein Impuls
Negativer Impuls	-	kein Impuls

Da z.B. die Ausgangsspannung eines logischen Gliedes bei unterschiedlicher Belastung auch unterschiedliche Werte annimmt, müssen die den binären Signalen entsprechenden Spannungen genügend weit toleriert werden. An Stelle der angegebenen Spannungswerte treten dann jeweils Spannungsbereiche. So entspricht z.B. beim Translog-Steuersystem (vergl. Abschnitt 2.3.4.) dem 0-Signal der Spannungsbereich von 0...-1 V und dem L-Signal der Spannungsbereich von -3,5 V...-12 V. Der Einfachheit halber sollen jedoch dafür im folgenden die Begriffe "Spannung Null" bzw. "negative Spannung" verwendet werden.

2.3.1. Logische Verknüpfungen mit Kontaktelementen

a) Und-Glied (Bild 38)

Nur wenn Spule X_1 und Spule X_2 erregt sind, d.h. die Arbeitskontakte x_1 und x_2 geschlossen sind, ist die Ausgangsgröße y in Form einer Spannung bzw. eines

Stromes vorhanden.

b) Oder-Glied (Bild 39)
Wenn Spule X_1 <u>oder</u> Spule X_2 <u>oder</u> beide Spulen X_1 und X_2 gleichzeitig erregt sind, ist die Ausgangsgröße y in Form einer Spannung bzw. eines Stromes vorhanden.

c) Nicht-Glied (Bild 40)
Nur wenn Spule X nicht erregt ist, ist Ruhekontakt x geschlossen, d.h. die Ausgangsgröße in Form einer Spannung bzw. eines Stromes vorhanden.

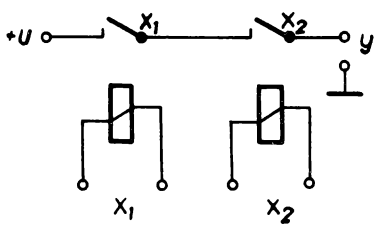


Bild 38

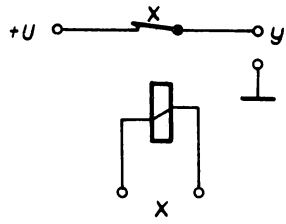


Bild 40

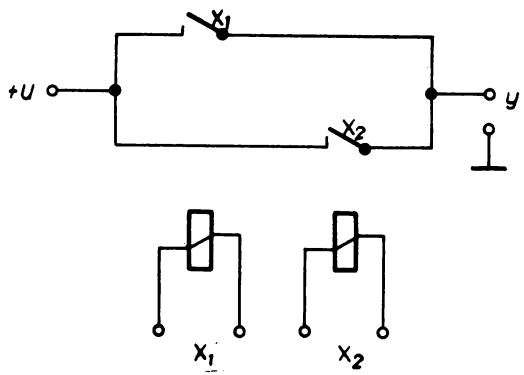


Bild 39

2.3.2. Logische Verknüpfungsglieder mit Elektronenröhren

Bei Verknüpfungsgliedern, die aus Elektronenröhren aufgebaut sind, wird zweckmäßigerweise dem Wert 0 eine negative Spannung und dem Wert L die Spannung Null zugeordnet.

a) Und-Glied

Wenn sowohl das Steuergitter als auch das Bremsgitter einer Pentode (Bild 41) auf Null-Potential liegen, fließt ein Strom durch den Katodenwiderstand. Liegt dagegen am Steuergitter oder am Bremsgitter eine genügend negative Spannung an, so ist die Röhre gesperrt. Damit die Ausgangsspannung bei geöffneter Röhre Null (L-Signal) und bei gesperrter Röhre negativ (0-Signal) ist, wird die Katode über einen hochohmigen Spannungsteiler an eine negative Hilfsspannung $-U_H$ gelegt. Am Abgriff des Spannungsteilers kann dann das elektrische Äquivalent der logischen Verknüpfung $y = x_1 \wedge x_2$ abgenommen werden.

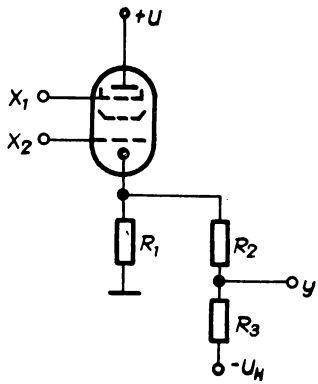


Bild 41

b) Oder-Glied

Zur Realisierung der Disjunktion kann eine Doppeltriode in Anodenbasisschaltung verwendet werden (Bild 42), deren gemeinsame Katode über einen hochohmigen Spannungsteiler an eine negative Hilfsspannungsquelle gelegt ist. Liegt mindestens eines der beiden Gitter auf Null-Potential, so fließt durch den Katodenwiderstand ein Strom. Am Ausgang y des Spannungsteilers erscheint dann ebenfalls ein L-Signal (Spannung Null). Nur wenn beide Gitter mit einer genügend negativen Spannung

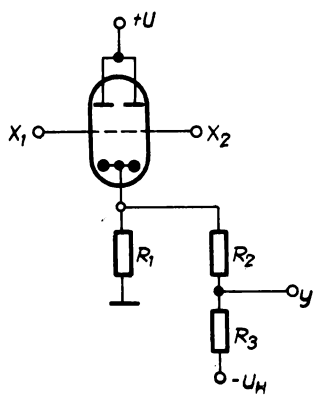


Bild 42

beaufschlagt werden, steht am Ausgang y eine negative Spannung an.

c) Nicht-Glied

Die Negation kann durch eine Triode in Katodenbasisschaltung realisiert werden (Bild 43). Liegt das Gitter auf Nullpotential, so ist an der Anode eine geringe positive Spannung vorhanden. Wenn an das Gitter eine negative Spannung gelegt wird, tritt an der Anode eine positive Spannung auf. Durch einen hochohmigen Spannungsteiler, der zwischen der Anode und einer negativen Hilfsspannungsquelle angeordnet ist, wird das jeweilige Anodenpotential in den für L- bzw. O-Signal definierten Spannungsbereich verschoben.

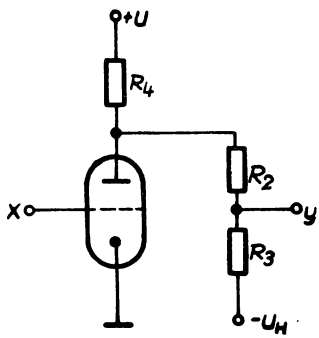


Bild 43

2.3.3. Logische Verknüpfungsglieder mit Transistoren

a) Und-Glied

Bild 44 zeigt ein Und-Glied, das mit pnp-Transistoren aufgebaut ist. Dem Wert L entspricht dabei eine negative Spannung, dem Wert O die Spannung Null. Liegen an beiden Eingängen x_1 und x_2 negative Spannungen (L-Signale), so sind beide Transistoren leitend, und am Ausgang ist ebenfalls eine negative Spannung (L-Signal) vorhanden. Befinden sich ein oder beide Eingänge auf Nullpotential, so fließt kein Strom.

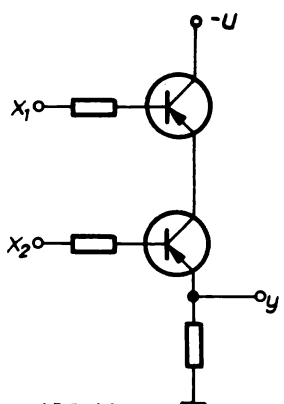


Bild 44

Der Ausgang führt dann O-Signal.

b) Oder-Glied

In Bild 45 ist ein Oder-Glied dargestellt, das aus zwei

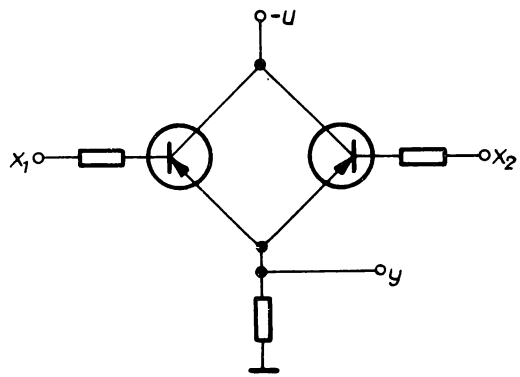


Bild 45

parallel geschalteten pnp-Transistoren mit gemeinsamem Emitterwiderstand besteht. Werden der eine oder beide Eingänge an eine negative Spannungsquelle gelegt, so fließt durch den gemeinsamen Emitterwiderstand ein Strom, der am Ausgang y eine gegenüber Null negative Spannung (L-Signal) zur Folge hat. Nur wenn beide Eingänge auf Nullpotential liegen, sind beide Transistoren gesperrt, so daß am Ausgang O-Signal erscheint.

c) Nicht-Glied

Bild 46 zeigt ein Nicht-Glied, das aus einem Transistor in Emitterschaltung aufgebaut ist. Wenn am Eingang x eine negative Spannung anliegt, sinkt die Spannung am Ausgang y nahezu auf Null ab. Der Ausgang führt dagegen L-Signal, wenn der Eingang auf Nullpotential liegt.

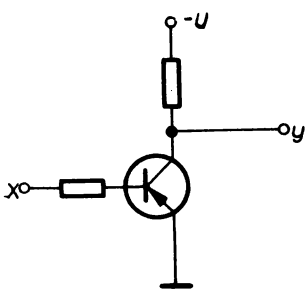


Bild 46

Diese Verknüpfungsglieder mit Transistoren haben gegenüber denen mit Halbleiterdioden den Vorteil, daß sie in beliebiger Reihenfolge zusammengeschaltet werden können. Von Nachteil ist jedoch, daß die Realisierung der Grundverknüpfungen mit Transistoren teurer ist als die mit Halbleiterdioden.

7.3.4. Logische Verknüpfungsglieder mit Halbleiterdioden

a) Und-Glied

Das Und-Glied mit zwei Eingängen im Bild 47 besteht aus zwei Dioden und einem Arbeitswiderstand, der an einer negativen Spannung -U liegt. Als L-Signal wird hier eine negative Spannung und als O-Signal die Spannung Null definiert. Wenn die Eingänge auf Nullpotential liegen, fließt durch die Dioden und den Arbeitswiderstand ein Strom zum negativen Pol der Betriebsspannungsquelle. Auf Grund des geringen Durchlaßwiderstandes der Dioden steht dabei am Ausgang y eine sehr kleine negative Spannung an, die noch im Bereich des O-Signals liegt. Nur wenn beide Eingänge mit L-Signalen (negativen Spannungen) belegt sind, erscheint auch am Ausgang ein L-Signal.

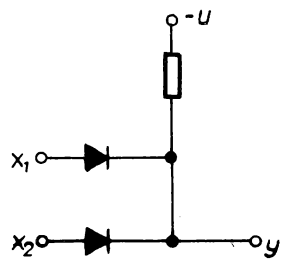


Bild 47

b) Oder-Glied

Wenn ein Eingang oder beide Eingänge des Oder-Gliedes (Bild 48) mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbunden werden, steht auch am Ausgang y eine negative Spannung (L-Signal) an. Liegen jedoch beide Eingänge auf Nullpotential, so gibt auch der

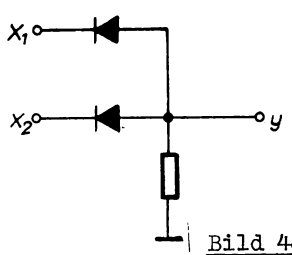


Bild 48

Ausgang ein O-Signal ab.

Ein Nicht-Glied läßt sich mit Dioden nicht verifizieren. Dazu sind in jedem Fall verstärkende Elemente erforderlich, die die Phase umkehren. Wegen des einfachen Aufbaues der Verknüpfungsglieder "Und" und "Oder" mit Halbleiterdioden hat sich für praktische Anwendungen eine Ergänzung dieser Elemente durch einen Transistor-Negator gemäß Bild 46 als besonders zweckmäßig erwiesen. In dieser Weise aufgebaute Verknüpfungsglieder in Bausteinform vom VEB Funkwerk Dresden zeigt Bild 49.

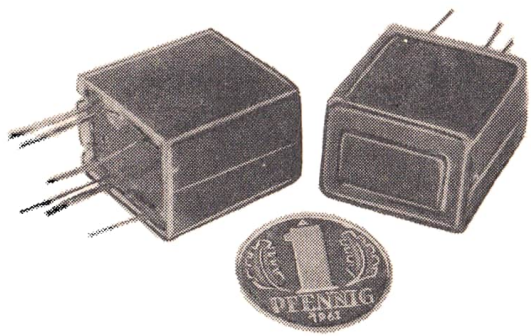


Bild 49

Die in Bild 47 angegebene Schaltung eines Und-Gliedes mit Dioden hat folgenden Nachteil: Wird ein Eingang des Und-Gliedes weder mit einem O-Signal noch mit einem L-Signal belegt, so ist dies gleichbedeutend damit, als ob an diesem betreffenden Eingang ein L-Signal anliegen würde. Dieser Fall tritt praktisch dann auf, wenn z.B. eine Zuführungsleitung unterbrochen ist oder das Und-Glied über einen Ruhe- oder Arbeitskontakt mit L-Signal ausgesteuert wird. Um dies zu vermeiden, können die Eingänge eines Und-Gliedes über Widerstände R_1, R_2 und R_3 positiv vorgespannt werden, Bild 50. Wenn hierbei ein Eingang, z.B. x_1, unbelegt ist, stellt sich an diesem über den Spannungsteiler R_1, R_4 immer O-Signal ein, so daß das Und-Glied in diesem Fall kein L-Signal abgeben kann.

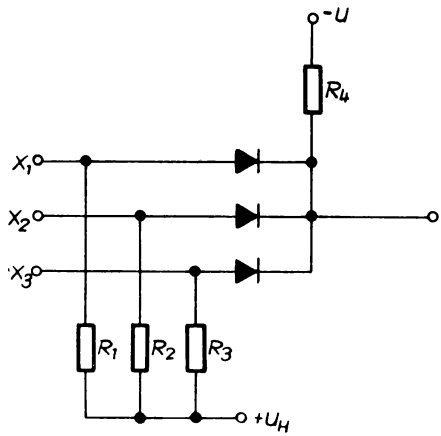


Bild 50

Auf Grund der Vorspannwiderstände am Und-Glied erübrigt sich dann der Arbeitswiderstand des Oder-Gliedes (Bild 51).

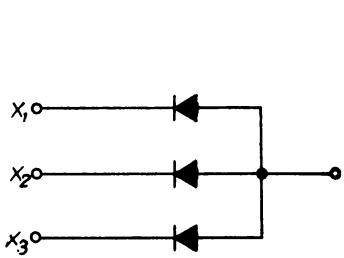


Bild 51

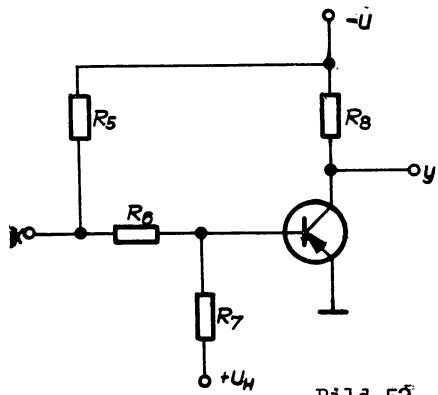


Bild 52

Die Basis des Transistor-Negators (Bild 52) wird gewöhnlich über einen Widerstand R_7 an eine positive Vorspannung gelegt. Dadurch wird der Transistor sicher gesperrt, wenn am Eingang ein 0-Signal liegt, da dann die Basis positiver als der Emitter ist. Im Bild 53 sind Logik-Bausteine vom VEB Elektro-Apparate-Werke Berlin Treptow wiedergegeben, die jeweils zwei gemäß Bild 50 bis 52 aufgebaute Verknüpfungsglieder enthalten.

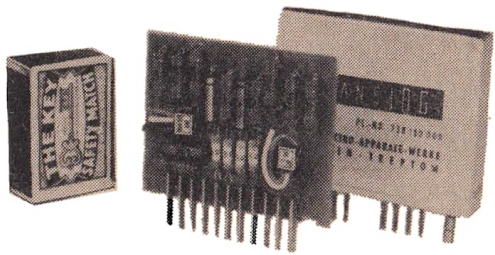


Bild 53

2.3.5. Logische Verknüpfungsglieder mit Rechteckferriten

Bei logischen Schaltungen mit Rechteckferriten erfolgt die Signalübertragung durch Impulse (Impulsbetrieb). Je nachdem, wie der Arbeitspunkt durch eine Vormagnetisierungsfeldstärke H_o auf der Hystereseschleife (Bild 54)

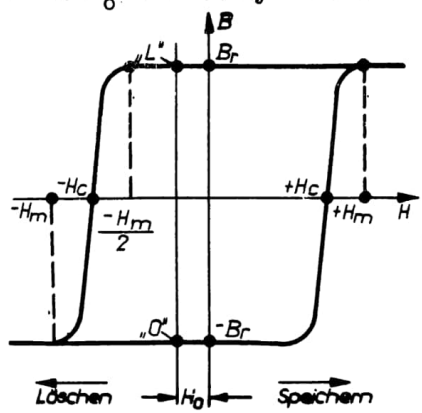


Bild 54

festgelegt wird, können dabei entweder logische Verknüpfungsglieder mit Speichervermögen ($|H_o| < H_c$) oder ohne Speichervermögen ($|H_o| > H_c$) verifiziert werden. Man kann folgende Schaltungsarten unterscheiden:

2.3.5.1. Eingabeverknüpfung mit Speicherung (Bild 55)

Die logische Verknüpfung der Variablen erfolgt bei der

Und-Glied
Oder-Glied
Nicht-Glied
Takt I
Takt II
Le
B
H
H_0
$y = x_1 \wedge x_2$
$y = x_1 \vee x_2$
$y = \bar{x}$
x_1
x_2
$\bar{x}$
t

Bild 55

Eingabe der elektrischen Signale in die Schaltungsanordnung mit Rechteckferrit-Kernen. Dabei wird das Ergebnis der logischen Verknüpfung im Kern als magnetische Energie gespeichert. Durch eine sogenannte Lesefeldstärke Le in negativer Feldrichtung, die den Kern wieder "zurückklappt", wird die so gespeicherte Information anschließend ausgelesen. Bei Schaltungen dieser Art werden zwei Taktschritte benötigt (Einspeichern und Auslesen).

a) Und-Glied
Für jede Variable ist auf dem Kern eine gesonderte Wicklung vorhanden. Die Impulsamplituden x_1, x_2,...,x_n müssen so bemessen sein, daß z.B. bei insgesamt zwei Variablen beim Auftreten von nur einer Eingangsgröße, z.B. x_1, sich die Magnetisierung nur auf dem flachen Teil der Magnetisierungskennlinie ändert, während der Kern beim Vorhandensein beider Eingangssignale x_1 und x_2 in die entgegengesetzte Magnetisierungsrichtung umgeklappt wird.

b) Oder-Glied
Jedes Eingangssignal x_1 oder x_2 oder ... oder x_n kann bereits allein den Kern ummagnetisieren.

c) Nicht-Glied
Um ein Eingangssignal zu negieren, werden auf die eine Wicklung des Kernes Testimpulse gegeben, die so bemessen sind, daß sie allein den Kern ummagnetisieren können. Tritt gleichzeitig mit dem Testimpuls t ein Eingangssignal x auf, das bestrebt ist, den Kern in negativer Richtung zu magnetisieren, so behält der Kern seinen ursprünglichen Magnetisierungszustand bei.

2.3.5.2. Speicherung mit Ausgabeverknüpfung (Bild 56)

Die einzelnen Eingangssignale werden in getrennten Kernen gespeichert. Beim Auslesen der gespeicherten Werte über eine gemeinsame Auslesewicklung wird die logische Ver-

Oder-Glied
Takt I
Takt II
Kern 1
Kern 2
Le
$y = x_1 \vee x_2$
Nicht-Glied
Takt III
R
$y = \bar{x}$

Bild 56

knüpfung vollzogen. Bei Schaltungen dieser Art werden drei Taktschritte benötigt (Einspeichern, Auslesen und Rückstellen).

a) Und-Glied
Und-Glieder lassen sich durch Ausgabeverknüpfung nicht unmittelbar realisieren.

b) Oder-Glied
Die Eingangssignale werden in getrennten Kernen gespeichert, die eine gemeinsame Ausgangswicklung besitzen. In dieser tritt beim Auslesen immer dann ein Impuls auf, wenn in mindestens einem Kern ein L-Signal gespeichert wurde.

c) Nicht-Glied
Die gespeicherte Eingangsgröße wird im zweiten Takt durch einen Leseimpuls Le in Schreibrichtung ausgelesen. Bei dieser an sich einfachen Verifizierung der Negation wird allerdings noch ein dritter Takt benötigt, um den Kern vor dem Eintreffen der nächsten Information durch einen Rückstellimpuls R in den Ausgangszustand zu bringen (reset).

2.3.5.3. Durchgangsverknüpfung (Bild 57)

Die Vormagnetisierung H_o wird so groß gewählt, daß der Arbeitspunkt außerhalb der Hystereseschleife liegt ($|H_o| > H_c$). Schaltungen dieser Art arbeiten in einem Taktschritt, da die logische Verknüpfung bei der Eingabe vollzogen wird und die Ausgangsgröße dabei gleichzeitig als elektrisches Signal vorhanden ist.

a) Und-Glied
Die einzelnen Eingangssignale müssen so bemessen sein, daß nur bei ihrer Koinzidenz (zeitliches Zusammentreffen zweier binärer Signale) ein Umklappen der Magnetisierung des Kernes erfolgt. Dabei wird in einer getrennten Ausgangswicklung ein Spannungsimpuls indu-

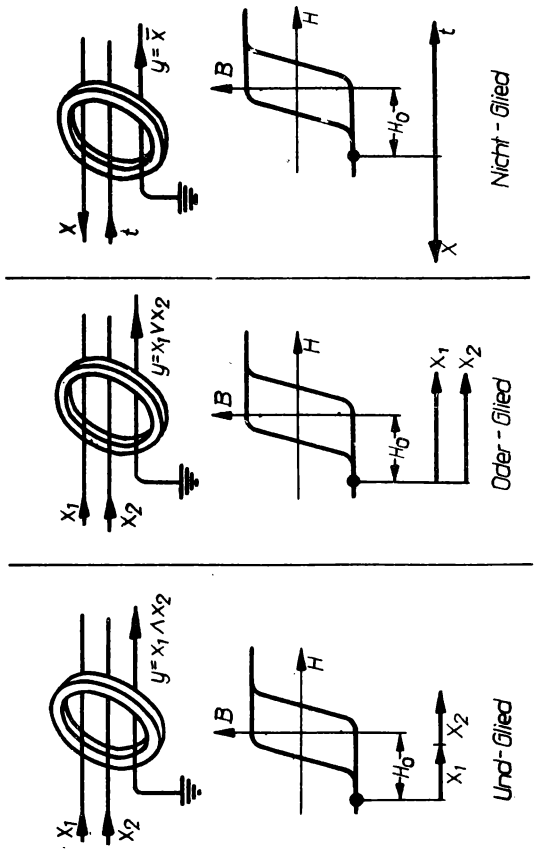

y=x̄
x
t
B
H
H₀
t
X
Nicht - Glied
y=x₁∨x₂
x₁
x₂
B
H
H₀
x₁
x₂
Oder - Glied
y=x₁∧x₂
x₁
x₂
B
H
H₀
x₁
x₂
Und - Glied

Bild 57

ziert. Nachdem die koinzidierenden Eingangssignale abgeklungen sind, klappt der Kern auf Grund der Vormagnetisierung wieder in den Ausgangszustand zurück. Der hierbei entstehende Impuls in Gegenrichtung kann durch eine Diode abgesperrt werden.

b) Oder-Glied
Beim Oder-Glied muß jedes Eingangssignal für sich den Kern ummagnetisieren können.

c) Nicht-Glied
Ist kein Eingangssignal x vorhanden, so wird der Kern durch einen Testimpuls t ummagnetisiert. Nur wenn gleichzeitig mit dem Testimpuls ein Eingangssignal auftritt, das den Kern in entgegengesetzter Richtung magnetisiert, verbleibt der Kern in seinem Ausgangszustand, so daß dann kein Ausgangssignal entsteht.

Übungen

8) a, Vergleichen Sie Relais und kontaktlose Logik-Elemente bezüglich der Anzahl ihrer Ein- und Ausgänge! Welche Schlußfolgerungen ergeben sich daraus für den Aufbau von Steuerungen?
b, Beurteilen Sie auf Grund dessen, ob eine Relaissteuerung oder eine kontaktlose Steuerung bezüglich der Verdrahtung vorteilhafter ist, wenn die Eingangsglieder (z.B. Taster oder Schalter) sehr weit entfernt von der übrigen Steuereinrichtung angeordnet werden müssen, wobei das Ausgangssignal jedes Schalters innerhalb der Steuereinrichtung mehrmals benötigt wird !

9) Unter welchen Bedingungen können Und- und Oder-Glieder hintereinander geschaltet werden,
a, wenn am Und-Glied keine Vorspannwiderstände vorgesehen sind,
b, wenn das Und-Glied mit Vorspannwiderständen versehen ist ?

10) Wie ist ein Und-Glied und ein Oder-Glied mit Dioden aufzubauen, wenn als 0-Signal die Spannung Null und als L-Signal eine positive Spannung definiert wird ? Erläutern Sie die Wirkungsweise dieses Und-Gliedes !

11) Unter welchen Bedingungen ist es zweckmäßig, eine Steuerung mit Rechteckferritkernen nach dem Prinzip
a, der Eingabeverknüpfung
b, der Ausgabeverknüpfung
c, der Durchgangsverknüpfung
aufzubauen ?

2.4. Technische Realisierung von binären Speicherelementen

Zum Aufbau von Folgeschaltungen werden binäre Speicherelemente benötigt, die Eingangs-, Ausgangs- oder Zwischensignale einer Steuereinrichtung als 0- oder L-Signale speichern können. Diese binären Speicherelemente mit Kontakten können durch Relais in Selbsthalteschaltung realisiert werden. Bei magnetischen Speicherelementen wird die Remanenz eines Magnetmaterials mit rechteckförmiger Magnetisierungskennlinie zur Speicherung ausgenutzt. Speicherelemente, die aus elektronischen Bauteilen (Röhren, Transistoren) aufgebaut sind, können als überkritisch mitgekoppelte Verstärker aufgefaßt werden. In diesem Sinne lassen sich elektronische Speicherelemente prinzipiell auch aus zwei durch Oder-Glieder entkoppelte Negatoren in Form eines Selbsthaltekreises aufbauen (Bild 58).

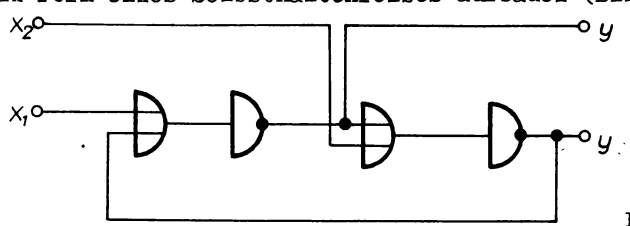


Bild 58

Normalerweise besitzt ein Speicherelement zwei Eingänge, über die einmal das Einspeichern einer Information, zum anderen das Löschen der gespeicherten Information erfolgt (Bild 59a).

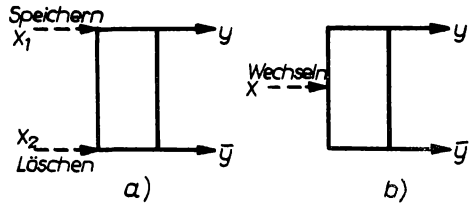
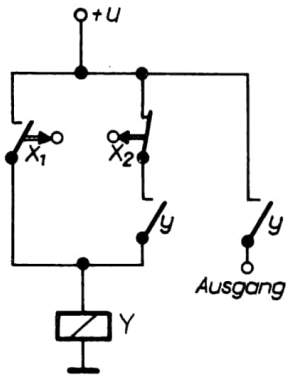


Bild 59a-b

In speziellen Anwendungsfällen, z.B. für Wechselschaltungen oder für Zählschaltungen, werden jedoch auch Speicherelemente benötigt, die beim Auftreten einer Eingangsgröße den einen Zustand einnehmen und beim erneuten Vorhandensein der Eingangsgröße in die andere Lage kippen (Bild 59 b), bei denen also das Einspeichern und Löschen durch ein einziges Eingangssignal abwechselnd erfolgt (symmetrische Triggerung).

2.4.1. Speicherelemente mit Kontakten

Bild 60 zeigt ein Relais in Selbsthalteschaltung als Speicherelement. Über den Taster x_1 wird das Relais Y erregt, das sich dann über einen Kontakt y selbst hält. Durch Betätigen des Tasters x_2 wird die Selbsthaltung unterbrochen, bzw. die gespeicherte Information gelöscht.
Eine Schaltung, bei der das Einspeichern und Löschen einer Information durch ein einziges Eingangssignal x abwechselnd erfolgt, zeigt Bild 61. Wird der Kontakt x zum ersten Mal geschlossen, so wird das Relais Y erregt. Erst wenn der Kontakt x wieder geöffnet wird, zieht auch das Relais H an, wobei die Wechselkontakte h umgelegt werden. Gleichzeitig hält sich dann das Relais Y über seinen Kontakt y (Speichern). Beim erneuten Schließen von Kon-



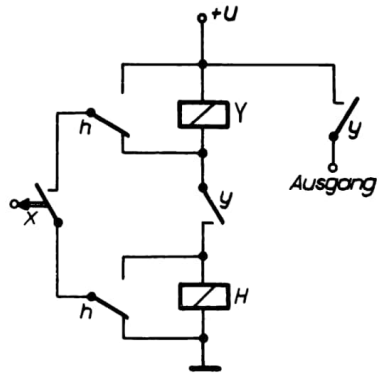


Bild 60 Bild 61

takt x wird dann das Relais Y kurzgeschlossen, so daß die Kontakte y geöffnet werden (Löschen). Beim Öffnen von x fällt dann auch das Relais H wieder ab.

Die Eigenschaften der Schaltung nach Bild 61 können z.B. auch durch ein einziges Spezialrelais (Bild 62) vom VEB Statex Ilmenau verwirklicht werden. Bei diesem Relais wird

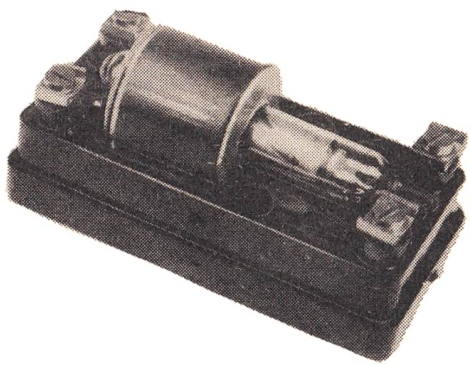


Bild 62

der Weicheisenkern durch einen Stift in speziell ausgebildeten Schlitzen einer Messinghülse geführt (Bild 63), so daß beim Anzug auch gleichzeitig eine Drehung des Kernes erfolgt. Beim Abfall des Kernes wird der Stift dann vom gegenüberliegenden Schlitz aufgenommen. Da die beiden

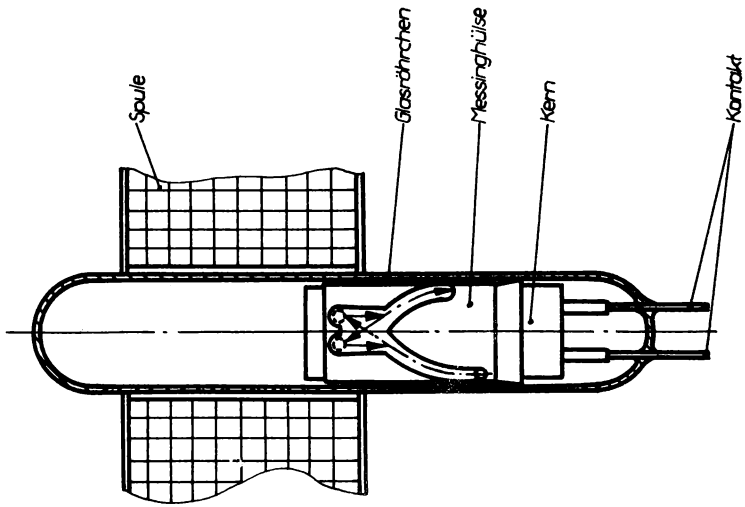


Bild 63

unteren Schlitze verschieden lang sind, werden die Kontakte nach dem ersten Eingangsimpuls geschlossen (Stift im linken unteren Schlitz des Bildes 63) und bleiben nach dem zweiten Eingangsimpuls geöffnet.

2.4.2. Speicherelemente mit Elektronenröhren

Speicherelemente mit Elektronenröhren sind als bistabile Multivibratoren in der Eccles-Jordan-Schaltung (Bild 64) realisiert.

Arbeitsweise:
Es wird zunächst angenommen, daß Röhre 1 Strom zieht. Dann ist das Anodenpotential an a_1 so niedrig, daß das Gitter g_2 der Röhre 2 bei geeigneter Dimensionierung über den Spannungsteiler R_{12}, R_{13} stark negativ ist. Dadurch wird Röhre 2 gesperrt. Ihr hohes Anodenpotential an a_2 bewirkt über den Spannungsteiler R_{22}, R_{23}, daß das Gitter g_1 der Röhre 1 nahezu auf dem gleichen Potential liegt, wie deren Katode, so daß Röhre 1 geöffnet ist. Der angenommene Zustand ist also stabil. Das gleiche läßt sich für den Fall nachweisen, daß Röhre 2 Strom führt und

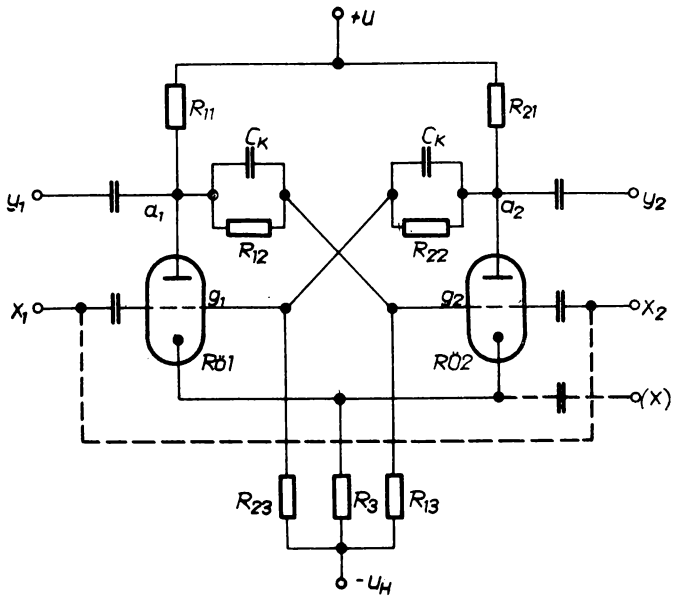


Bild 64

Röhre 1 gesperrt ist.

Wird im angenommenen Fall dem Gitter g_1 ein negativer Impuls zugeführt, so sperrt Röhre 1. Ihr hohes Anodenpotential überträgt sich auf das Gitter der Röhre 2 und macht diese leitend. In dem bistabilen Multivibrator ist dann eine Information in Form eines L-Signals gespeichert. Das Löschen der gespeicherten Information erfolgt durch einen Impuls, der auf das Gitter g_2 gegeben wird. Wird an beide Gitter gleichzeitig ein negativer Impuls geleitet, so wird die bisher geöffnete Röhre gesperrt. Die vorher gesperrte Röhre wird über den Koppelspannungsteiler leitend. Der bistabile Multivibrator "kippt" dann bei jedem eintreffenden Impuls in den jeweils entgegengesetzten Zustand (abwechselndes Speichern und Löschen). Die gleiche Wirkung erzielt man, wenn an die verbundenen Katoden ein Impuls gegeben wird.

2.4.3. Speicherelemente mit Transistoren

Bild 65 zeigt ein Speicherelement mit Transistoren in Form eines bistabilen Multivibrators.

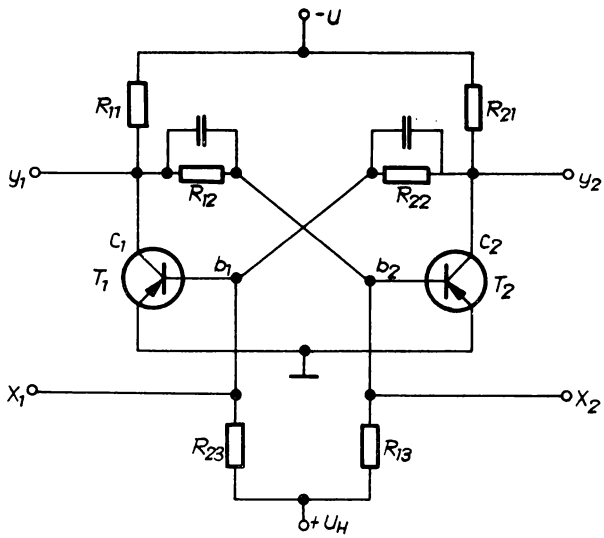


Bild 65

Arbeitsweise:

Transistor T_1 möge leitend und Transistor T_2 gesperrt sein. Dann liegt das Kollektorpotential von T_1 nahe bei Null, so daß die Basis von T_2 über den Spannungsteiler R_{12}, R_{13} gegenüber dem Emitter positiv vorgespannt wird, Transistor T_2 also sicher gesperrt ist. Andererseits fließt auf Grund des hohen negativen Kollektorpotentials an T_2 ein großer Basisstrom über den Widerstand R_{22} im Transistor T_1, so daß dieser bei richtiger Dimensionierung der Schaltung völlig geöffnet ist. Der angenommene Zustand ist also stabil. Das gleiche gilt für den Fall, daß T_1 gesperrt und T_2 leitend ist.

Wird nun an die Basis b_2 des gesperrten Transistors T_2 ein negativer Impuls geführt, so wird T_2 leitend, wobei das Kollektorpotential an c_2 nahezu auf Null absinkt.

Dadurch wird T_1 über den Koppelspannungsteiler R_{22}, R_{23} gesperrt. Die hierbei gespeicherte Information kann dadurch gelöscht werden, daß an die Basis von T_1 ein negativer Impuls geleitet wird.

Werden auf beide Basen gleichzeitig negative Impulse gegeben, so "kippt" der bistabile Multivibrator in analoger Weise wie die entsprechende Schaltung mit Elektronenröhren bei jedem eintreffenden Impuls in den jeweils entgegengesetzten Zustand, was einem abwechselnden Speichern und Löschen entspricht (symmetrische Triggerung).

2.4.4. Speicherelemente mit Rechteckferriten

Aus Magnetmaterialien mit angenähert rechteckiger Hystereseschleife lassen sich ebenfalls Speicherelemente aufbauen (Bild 54). Das Rechteckigkeitsverhältnis ist dabei definiert als:

$$r = \frac{B(-\frac{H_m}{2})}{B(+H_m)} \qquad (20)$$

(H_m = Sättigungsfeldstärke). Es hat vor allem Bedeutung im Zusammenhang mit der Koinzidenzspeicherung.

Liegt der Arbeitspunkt (Wert "0") innerhalb der Koerzitivkraft $\pm H_c$, so kann das Magnetmaterial durch entsprechende Feldstärkeimpulse in den Zustand "L" ummagnetisiert werden. Die so z.B. in einem Rechteckferritkern gespeicherte Information kann dann durch einen Feldstärkeimpuls in entgegengesetzter Richtung wieder ausgelesen werden. Bei diesem Zurückklappen entsteht eine Signalspannung, für die gilt:

$$U_s \approx k(H_L - H_c) \qquad (21)$$

(H_L = Feldstärke beim Auslesen).

Dabei wird der Speicherinhalt gleichzeitig gelöscht. Durch spezielle Ausbildung der Rechteckferrite (mehrere getrennte Bohrungen) kann dies jedoch verhindert werden (Trans-

fluxoren).

Mit Ferritkernen lassen sich sehr einfache magnetische Matrixspeicher aufbauen, indem die einzelnen Speicherkerne in Form einer Matrix mit den Elementen a_{ik} angeordnet werden (Bild 66). Die Kerne jeder Zeile (x) und jeder Spalte(y) besitzen dabei je eine gemeinsame Magnetisierungswicklung. Sämtliche Kerne der Matrix sind darüber hinaus durch eine gemeinsame Ausgangswicklung (Z) verbunden. Wird gleichzeitig eine Zeile und eine Spalte jeweils mit der Feldstärke + $\frac{H_m}{2}$ erregt ($H_o = 0$), so wird der betreffende Kern durch die resultierende Feldstärke H_m ummagnetisiert (vergl. Bild 54), wobei im Kern eine binäre Ziffer gespeichert wird. Das Auslesen eines gespeicherten "L" erfolgt durch zwei koinzidente Feldstärkeimpulse - $\frac{H_m}{2}$ über die der betreffenden Zeile und Spalte zugeordneten Magnetisierungswicklung.

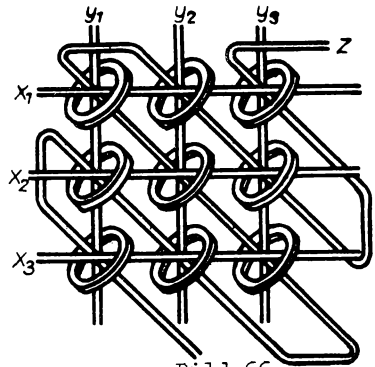


Bild 66

Übungen

12) Wie verhält sich bei einer symmetrisch getriggerten bistabilen Kippschaltung die Frequenz der Ausgangsgröße zur Frequenz der Eingangsgröße?

13) Durch welche Schaltungsmaßnahmen kann erreicht werden, daß eine bistabile Kippschaltung mit Transistoren beim Einschalten der Betriebsspannung eine festgelegte Vorzugslage einnimmt ?

2.5. Technische Realisierung von Zeitschaltgliedern

Zeitschaltglieder werden zum verzögerten Einleiten von Schaltvorgängen benötigt. Sie bestehen im allgmeinen aus einem Zeitglied, das als integrierendes Glied eine Zeit-Funktion liefert, und aus einem Schaltglied, das als Schwellwertschalter arbeitet und bei einem vorgegebenen Wert der Zeit-Funktion ein Signal abgibt.
Bezüglich der Länge der geforderten Verzögerung unterscheidet man Kurz- und Langzeitschaltglieder.

2.5.1. Das verzögerte elektromagnetische Relais als Zeitschaltglied

Um mit elektromagnetischen Relais längere Verzögerungen zu bekommen als sie durch die Anzugs- bzw. Abfallzeiten des Ankers bedingt sind, muß durch schaltungstechnische oder konstruktive Maßnahmen dafür Sorge getragen werden, daß der Aufbau bzw. Abbau des magnetischen Feldes entsprechend langsamer erfolgt. Von den vielen bekannten Schaltungen zur Anzugs- bzw. Abfallverzögerung von Relais sollen hier nur einige charakteristische angegeben werden.

2.5.1.1. Abfallverzögerung

Bild 67 zeigt eine Verzögerungsschaltung, bei der ein RC-Glied parallel zur Erregerwicklung geschaltet ist. Beim Abschalten der Betriebsspannung entlädt sich der Kondensator, so daß auch nach dem Öffnen des Schalters noch ein Strom durch die Erregerwicklung fließt, und der Anker erst verzögert abfällt. Die Abfallverzögerungszeit beträgt dabei

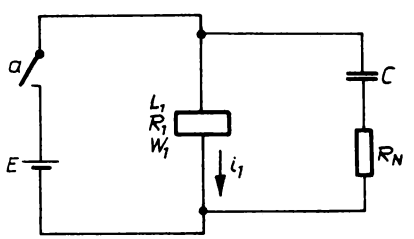


Bild 67

angenähert:

$$t_b = C\,(R_1 + R_N)\,\ln\left[\frac{R_1}{R_1 + R_N}\cdot S_h\right] \qquad (22)$$

Durch diese Schaltung erreicht man Abfallverzögerungszeiten bis zu etwa 500 ms.

Versieht man das Relais mit einer zweiten Wicklung, die über einen Widerstand R_K kurzgeschlossen ist (Bild 68),

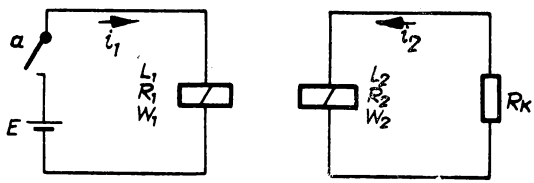


Bild 68

so wird der vor dem Abschalten in der primären Arbeitswicklung w_1 fließende Strom nach dem Abschalten in die sekundäre Kurzschlußwicklung transformiert, wo er mit der Zeitkonstanten

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2 + R_K} \qquad (23)$$

abklingt. Für die Abfallverzögerungszeit erhält man in Näherung:

$$t_b = \frac{L_2}{R_2 + R_K}\,\ln\,S_h\,. \qquad (24)$$

Für $R_K = 0$ (Kurzschlußwicklung!) wird die Verzögerungszeit am größten.

Relativ große Verzögerungen ergeben sich, wenn man den sekundären Kurzschlußkreis als rohrförmigen Kupfermantel ausbildet und auf den Relaiskern aufsetzt. Dadurch kann man Abfallverzögerungszeiten bis zu etwa 1 sec erzielen.

2.5.1.2. Anzugsverzögerung

Durch die Schaltung im Bild 69 erhält man unter der Be-

dingung, daß $CR_v \gg \frac{L_1}{R_1}$ ist, eine Anzugsverzögerung, deren Größe durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$t_a = C \frac{R_1 R_v}{R_1 + R_v} \cdot \ln \frac{S_a}{S_a - 1} \quad . \qquad (25)$$

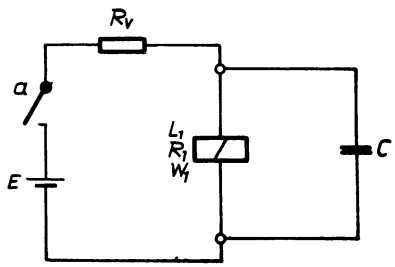


Bild 69

Die in Bild 68 angegebene Schaltung mit Kurzschlußwicklung zur Abfallverzögerung verursacht beim Einschalten der Betriebsspannung auch eine Anzugsverzögerung, deren Größe sich folgendermaßen angeben läßt:

$$t_a = \left(\frac{L_1}{R_1} + \frac{L_2}{R_2 + R_K} \right) \cdot \ln \frac{S_a}{S_a - 1} \quad . \qquad (26)$$

Mit dieser Anordnung lassen sich bei kleiner Anzugssicherheit S_a Verzögerungszeiten von etwa 50 ms erreichen.

2.5.2. Elektromechanische Zeitschaltglieder

Bei elektromechanischen Zeitschaltgliedern wird gewöhnlich ein Synchronmotor als Zeitglied verwendet, der über ein Getriebe eine Nockenscheibe antreibt. Durch die Nocken werden nach Ablauf einer bestimmten Zeit die Schaltkontakte betätigt. Bild 70 zeigt ein in dieser Weise aufgebautes Langzeitrelais vom VEB EAW Berlin-Treptow, mit dem Verzögerungszeiten bis zu 30 min und mehr erreicht werden können.

2.5.3. Thermische Zeitschaltglieder

Da die Zeitkonstanten von Bimetallelementen relativ groß

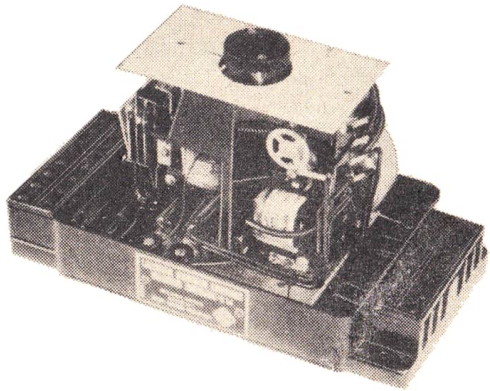


Bild 70

sind, werden auch Thermorelais als Zeitschaltglieder verwendet (vgl.Abschnitt 2.1.3.). Bei Beheizung durch elektrischen Strom wird der Bimetallstreifen entsprechend der thermischen Zeitkonstante ausgelenkt, bis sich die Kontaktstücke öffnen oder schließen. Um den Einfluß der Umgebungstemperatur zu kompensieren, werden Bimetallanordnungen nach Bild 32 verwendet. Durch Verstellen der Kontaktschraube mit dem Kontaktstück kann der Kontaktweg und damit die Verzögerungszeit verändert werden /3/.

Thermische Zeitschaltglieder können überall dort eingesetzt werden, wo keine besondere Genauigkeit der Verzögerungszeit verlangt wird, und wo die lange Rückstellzeit nicht störend ist.

2.5.4. Zeitschaltglieder mit Elektronenröhren

Das einfachste elektronische Zeitglied ist ein RC-Glied (Bild 71). Wird sprungförmig eine Eingangsspannung U_e angelegt, so wächst die Spannung über dem Kondensator entsprechend der Beziehung

$$u_c = U_e \left(1 - e^{-t/RC} \right) \qquad (27)$$

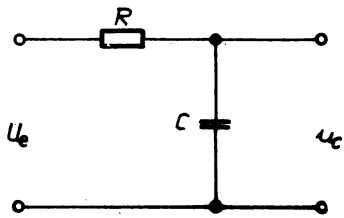


Bild 71

an. Bei einem bestimmten Wert dieser Spannung kann über einen Verstärker ein Relais oder ein kontaktloser Schwellwertschalter zum Ansprechen gebracht werden. Auf diese Weise lassen sich mit den handelsüblichen Bauelementen (C und R) allerdings nur relativ kleine Verzögerungszeiten erreichen. Für lange Verzögerungszeiten kann ein Miller-Integrator (Bild 72) verwendet werden, bei dem die Wirkung eines Verstärkers, seine Gitter-Anoden-Kapazität um das (V+1)-fache zu vergrößern, ausgenutzt wird. (V = Verstärkung des Röhrenverstärkers). Für die Ausgangsspannung des Integrators gilt folgende Beziehung:

$$u_a = - V U_e (1 - e^{-t/RC(V+1)}). \qquad (28)$$

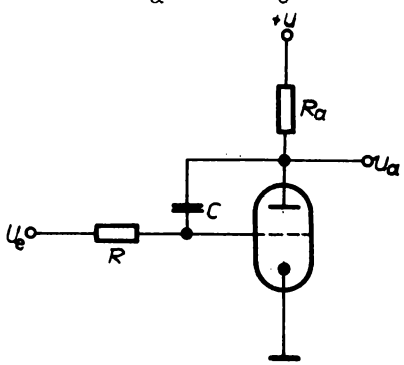


Bild 72

Mit derartigen elektronischen Zeitgliedern lassen sich Verzögerungszeiten von 20 - 30 min erreichen.

2.5.5. Zeitschaltglieder mit Transistoren

Wegen der niedrigen Eingangswiderstände normaler Transistorschaltungen ist es schwierig, mit Transistoren entsprechende Integrationsschaltungen für lange Verzögerungszeiten wie mit Elektronenröhren aufzubauen. Für Verzögerungszeiten bis zu etwa 10 min können monostabile Kippstufen verwendet werden (Bild 73). Wird an den Eingang x_E

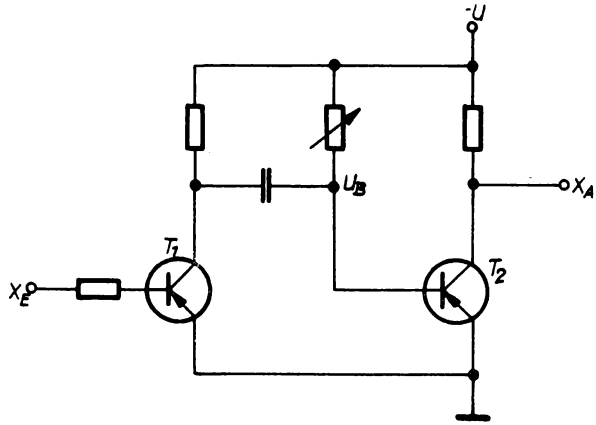


Bild 73

dieser Kippstufe ein L-Signal (-U) gelegt, so wird Transistor T_1 leitend. Durch den dabei auftretenden positiven Spannungssprung am Kollektor wird die Basis von Transistor T_2 stark positiv gegenüber Null, so daß T_2 gesperrt und sein Kollektorpotential negativ wird. Erst wenn der Kondensator so weit umgeladen ist, daß die Basis von T_2 negativ geworden ist, öffnet T_2 wieder.

Um mit dieser monostabilen Kippstufe eine Anzugsverzögerung zu realisieren, kann man sie in der in Bild 74 angegebenen Weise mit Logik-Elementen zusammenschalten.

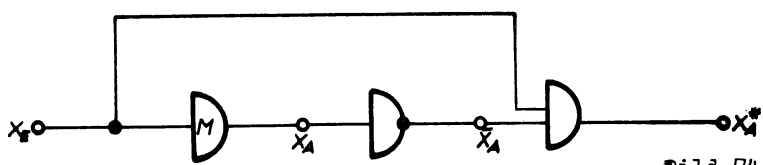


Bild 74

Die Wirkungsweise dieser Schaltung ist im Zeit-Diagramm des Bildes 75 veranschaulicht.

Übungen

14) Wie läßt sich bei einem Relais mit Kurzschlußwicklung eine Anzugsverzögerung erzielen, ohne daß die Abfallzeit dabei merklich vergrößert wird ?

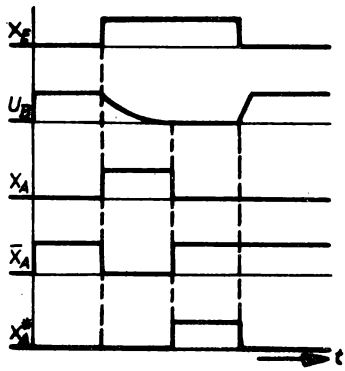


Bild 75

15) Wie kann bei kontaktlosen Steuerungen durch eine monostabile Kippstufe in Zusammenschaltung mit Logik-Elementen eine Abfallverzögerung realisiert werden ? Veranschaulichen Sie sich die Wirkungsweise der Schaltung an einem Zeitdiagramm!

3. Bauelemente für Eingangsglieder

3.1. Handschalter

Für Handsteuerungen werden als Eingangsglieder die verschiedensten Arten von handbetätigten Schaltern verwendet, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

3.2. Schwellwertschalter

Schwellwertschalter besitzen eine Eingangs-Ausgangs-Charakteristik nach Bild 1 (Schaltcharakteristik) und haben die Aufgabe, beim Über- oder Unterschreiten eines Grenzwertes ein L- oder O-Signal abzugeben. Schwellwertschalter, bei denen sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsgröße elektrische Größen sind, werden hier elektrische Schwellwertschalter genannt. Ist die Eingangsgröße dagegen eine

mechanische Größe, so soll von mechanischen Schwellwertschaltern gesprochen werden.

3.2.1. Elektrische Schwellwertschalter mit Kontakten

Sämtliche unter 2.1. beschriebenen Kontaktrelais können als elektrische Schwellwertschalter mit Kontakten angesehen werden, da sie eine Schaltcharakteristik nach Bild 1 besitzen. Derartige Relais werden auch von den Herstellerfirmen in spezieller Ausführung als sogenannte Schutzrelais mit meist einstellbaren Schwellwerten angeboten. Diese haben die Aufgabe, bei Überstrom oder Unterspannung gefährdete Anlagenteile abzuschalten. Bild 76 zeigt ein Unterspannungsrelais vom VEB EAW Berlin Treptow.

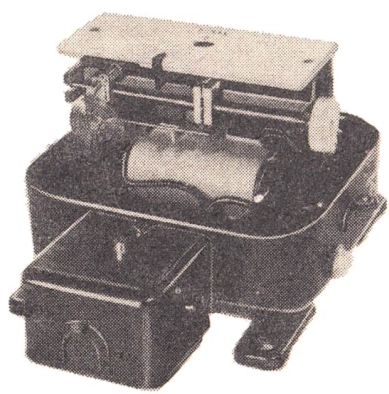


Bild 76

3.2.2. Mechanische Schwellwertschalter mit Kontakten

Um bei Steuerungen von sich mechanisch bewegenden Systemen beim Erreichen bestimmter Grenzwerte von Stellungen, Winkeln, Lagen oder ähnlichem Steuersignale auslösen zu können, sind sogenannte Endlagenschalter erforderlich. Durch eine mechanische Eingangsgröße werden dabei Kontakte geschlossen oder geöffnet, wodurch entweder ein Steuerstromkreis oder auch direkt der Arbeitsstromkreis

beeinflußt wird. In diesem Zusammenhang sind die verschiedensten konstruktiven Lösungen bekannt geworden. An dieser Stelle soll nur auf einige neuere Ausführungsformen eingegangen werden.

3.2.2.1. Mikroschalter

Bei dem in Bild 77 skizzierten Mikroschalter sorgt ein sogenanntes Schnappfederelement dafür, daß selbst bei relativ langsamer Betätigung des Schaltstößels S ein schlagartiges Umklappen der Kontaktwippe erfolgt. Greift nämlich an S eine Kraft F an, so verharrt die Kontaktwippe K so lange in ihrer unteren Endlage (Öffner geschlossen), wie der Winkel γ zwischen Federachse und Kontaktwippe positiv ist (Bild 78). Wird nun die als Kraft-

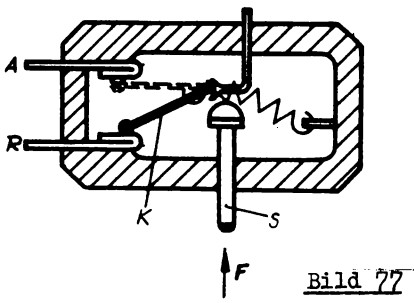


Bild 77

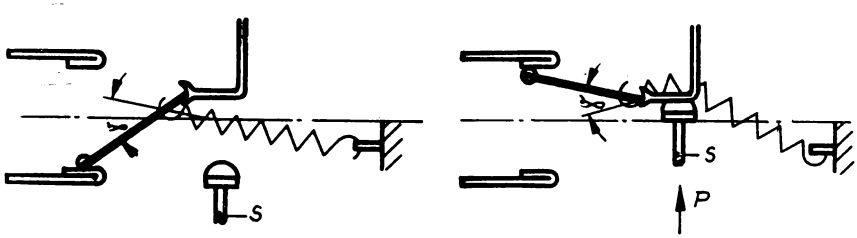


Bild 78

speicher wirkende Schraubenfeder so weit durchgebogen, daß γ negativ wird, so schlägt das Kontaktelement ruckartig um (Schließer geschlossen). Wird die Kraft allmählich wieder verringert, so springt die Kontaktwippe bei $\gamma = 0$ in ihre Ausgangslage zurück.

Durch geeignete Anordnung der beiden Endlagenkontakte zum Wippendrehpunkt kann man auch einen Schalter mit Selbsthalteeigenschaften herstellen (Bild 79). Läßt man nämlich

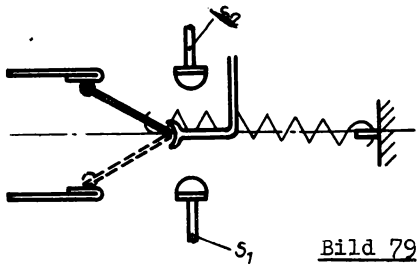


Bild 79

bei dieser Ausführung nach erfolgter Schaltung die Schaltertaste S_1 los, so geht γ nicht auf Null zurück. Der Schalter besitzt zwei stabile Lagen. Ein Rückstellen der Wippe erfolgt erst bei Betätigung der Rückstelltaste S_2.

Bei einer neueren Ausführung besteht das Schnappfederelement aus einem einzigen Teil (Bild 80). Bild 81a zeigt einen mit dieser Schnappfeder aufgebauten Mikroschalter mit zwei stabilen Lagen. Bei der Ausführung nach Bild 81b mit nur einer stabilen Lage wird die Schnappfeder beim Loslassen der Betätigungstaste durch eine zusätzliche Feder wieder in die Ausgangsstellung gedrückt.



Bild 80

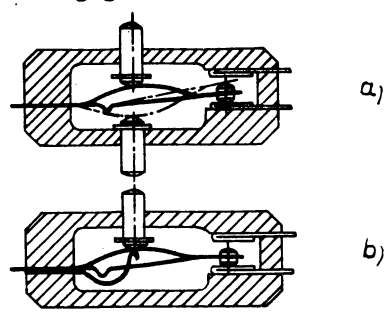


Bild 81a-b

3.2.2.2. Berührungsloser Magnetschalter mit Kontakten

Bei der in Bild 82 skizzierten Anordnung eines Magnetschalters wird ein Schutzgaskontakt 1 von einem Dauermagneten 2 dauernd angezogen. Wird eine Eisenfahne 3 in den Schlitz gebracht, so wird das magnetische Kraftfeld abgeschirmt. Dadurch fällt die Nickel-Eisenfeder ab, so daß der Arbeitskontakt geschlossen wird.

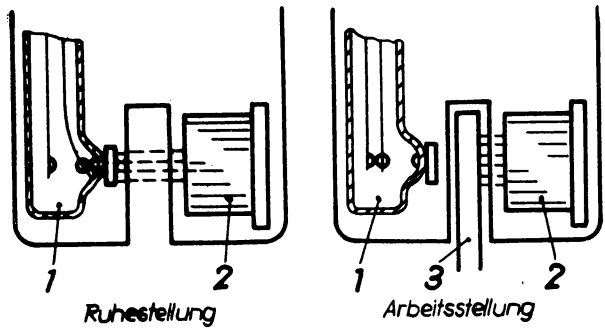


Bild 82

3.2.3. Kontaktlose elektrische Schwellwertschalter

Als kontaktlose elektrische Schwellwertschalter können sämtliche Schmitt-Triggerschaltungen angesehen werden. Derartige Schaltungen, die mit Elektronenröhren oder Transistoren aufgebaut werden können, besitzen eine Eingangs-Ausgangskennlinie mit teilweise negativem Verlauf, wodurch die Schaltung beim Überschreiten des Schwellwertes der Eingangsgröße instabil wird. Dadurch ergibt sich für statische Betrachtungen eine Schaltcharakteristik nach Bild 1. Bild 83 zeigt einen Schmitt-Trigger mit Transistoren.

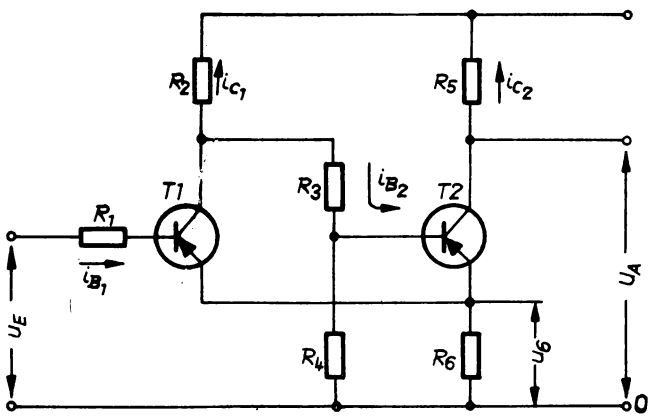


Bild 83

Der Transistor T_2 möge dabei durch den Basisstrom i_{B2} bis in das Sättigungsgebiet hinein ausgesteuert werden.

Für $u_E = 0$ ist T_1 gesperrt, da der Emitter von T_1 gegenüber der Basis u_6 negativ vorgespannt ist. Bei $|u_E| > |u_6|$ geht T_1 vom gesperrten Zustand in den leitenden über, wobei der Kollektorstrom i_{c1} fließt. Dadurch wird der Basisstrom i_{B2} von T_2 herabgesetzt. Solange i_{B2} noch groß genug ist, um T_2 in der Sättigung zu halten, steigt die Spannung u_6 mit wachsendem u_E an, da durch R_6 sowohl der Sättigungsstrom von T_2 als auch der Kollektorstrom von T_1 fließt. Wenn der Basisstrom i_{B2} so weit abgesunken ist, daß T_2 aus der Sättigung gerät, wird u_6 mit wachsendem u_E bzw. i_{B1} kleiner. Da der Basisstrom i_{B1} aber wiederum von der Spannungsdifferenz $u_E - u_6$ abhängt, steigt i_{B1} aber immer weiter an. Dadurch nimmt u_6 noch mehr ab usw. Dieser Zustand ist instabil und ist erst dann beendet, wenn T_2 gesperrt ist. Der Schmitt-Trigger besitzt also eine Schaltcharakteristik nach Bild 1.

3.2.4. Kontaktlose mechanische Schwellwertschalter

Kontaktlose mechanische Schwellwertschalter können dadurch verifiziert werden, daß ein entsprechender Transmitter (siehe Abschnitt 3.3.) vor einen Schmitt-Trigger nach Bild 83 geschaltet wird. Sehr einfach lassen sich solche Schwellwertschalter auch realisieren, indem man einen Oszillatorschwingkreis kapazitiv oder induktiv verstimmt. Bild 84 zeigt einen solchen kontaktlosen Schwellwertschalter mit Transistoren, der aus einem Oszillator und einem Verstärker (Negator) besteht. Beim Einführen einer metallischen Fahne zwischen Oszillator- und Rückkopplungsspule setzen die Schwingungen aus. Am Ausgang des Negators erscheint dann ein L-Signal.

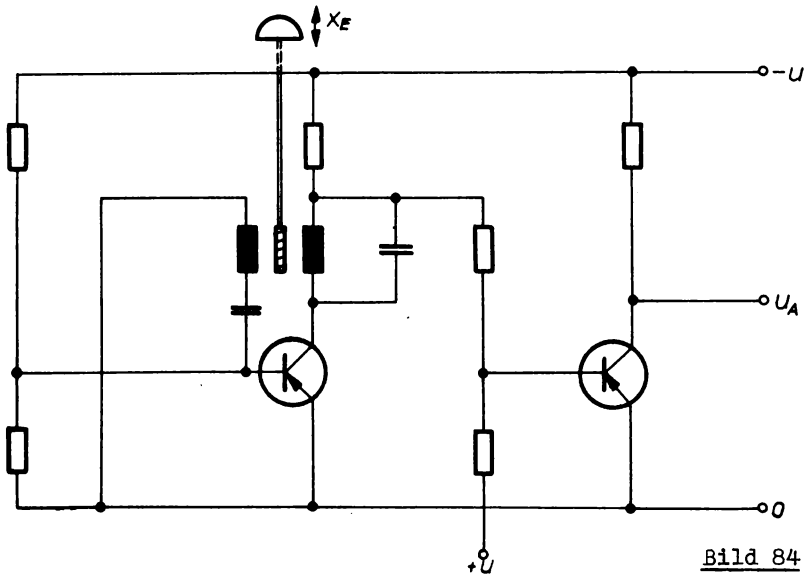


Bild 84

3.3. Transmitter

Transmitter dienen dazu, beliebige physikalische Größen in elektrische Informationen umzuwandeln.
Transmitter mit einer unstetigen Eingangs-Ausgangs-Charakteristik liefern dabei direkt logische Signale. Nach einem Transmitter mit einer stetigen Eingangs-Ausgangs-Charakteristik muß erst ein Schwellwertschalter nach Abschnitt 3.2. geschaltet werden. Der Aufbau derartiger Transmitter soll hier nicht näher beschrieben werden.

3.4. Programmgeber und -speicher

Für Programmsteuerungen (Zeitplansteuerungen) werden Einrichtungen benötigt, die die gewünschten Arbeitsprogramme speichern und je nach Bedarf ablaufen lassen. Die Programmspeicher unterscheiden sich von den Speichern für Rechenmaschinen dadurch, daß sie keine Adresse benötigen, da die in ihnen gespeicherten Informationen stets in der gleichen schon bei der Eingabe festgelegten Reihenfolge

entnommen werden. Praktisch angewendete binäre Programmspeicher sind z.B. Lochkarte, Lochband, Magnetband, Magnettrommel, Meisterwalze und Relaiswalze.

3.4.1. Lochkarte und Lochband

Die zu speichernden Signale werden entsprechend ihrer zeitlichen Reihenfolge nacheinander als Löcher in Karten oder Bänder eingestanzt. Die gestanzten Karten oder Bänder werden beim Auslesen elektromechanisch oder photoelektrisch abgetastet.

3.4.2. Magnetband- und Magnettrommelspeicher

Auf ein Band oder eine rotierende Trommel ist ein ferromagnetischer Lack aufgetragen, der über sogenannte Schreibköpfe in bestimmter Richtung magnetisiert wird. Nach Beendigung des Magnetisierungsimpulses verharrt der unter dem Kopf liegende Bereich im positiven oder negativen Remanenzpunkt. Durch diese remanente Magnetisierung wird beim Auslesen in der Wicklung des sogenannten Lesekopfes ein positiver oder negativer Impuls induziert, der einem logischen L- oder O-Signal entspricht.

3.4.3. Meisterwalzen

Bei der sogenannten Meisterwalze wird das Arbeitsprogramm durch einzelne Nockenscheiben gespeichert. Jeder Nocke ist ein Kontaktsatz zugeordnet, der bei einer bestimmten Stellung der Walze betätigt wird. Der Antrieb der Meisterwalze erfolgt meist durch einen Elektromotor oder ein Uhrwerk.

3.4.4. Relaiswalze

Die Relaiswalze ist eine Verbindung von Schrittschalter und Zeitgliedern. In Bild 85 sind die Zeitglieder durch verzögerte Relais ZR angedeutet. Beim Drücken der Taste T

(Anlauf der Relaiswalze) wird über den Kontakt hr des

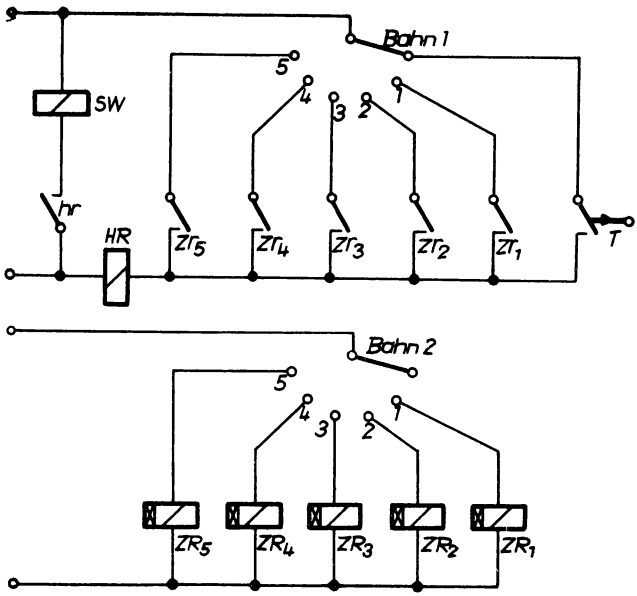


Bild 85

Hilfsrelais HR das Schrittschaltwerk SW betätigt, so daß der Schrittschalter um einen Schritt weiterschaltet. Über die Bahn 2 wird dann das Zeitrelais ZR_1 erregt, das nach Ablauf der eingestellten Verzögerungszeit den Kontakt zr_1 betätigt. Dadurch schaltet das Schrittschaltwerk erneut einen Schritt weiter, wobei jetzt das Zeitrelais ZR_2 Strom erhält usw. Durch die Zeitrelais können die geforderten Teilintervalle des Programmes eingestellt werden. Über eine oder mehrere Kontaktbahnen werden dann die entsprechenden Steuer- oder Ausgangsglieder betätigt.

4. Bauelemente für Ausgangsglieder

Über die Ausgangsglieder erfolgt bei entsprechender Verstärkung der Steuersignale der Eingriff in den Prozeß. Die Ausgangsglieder umfassen demnach sowohl Verstärker als auch Stellglieder.

4.1. Verstärker

Um mit den zweiwertigen Ausgangssignalen der Steuerglieder irgendwelche Stellglieder betätigen zu können, ist in den meisten Fällen noch eine Leistungsverstärkung erforderlich. Hierzu können einmal unstetig wirkende verstärkende Elemente, z.B. irgendwelche Zwischenrelais mit höher belastbaren Kontakten verwendet werden. Darüber hinaus können zur Verstärkung der zweiwertigen Steuersignale auch stetige Verstärker eingesetzt werden. Auf derartige Verstärkungsanordnungen, die z.B. aus Elektronenröhren, Transistoren, Transduktoren oder steuerbaren Gleichrichtern aufgebaut werden können, soll hier nicht näher eingegangen werden.

4.2. Stellglieder

Die Stellglieder haben die Aufgabe, den Steuerbefehl auszuführen. Man unterscheidet stetig und unstetig wirkende Stellglieder.

Unstetige Stellglieder sind alle fernbetätigten elektrischen Schaltgeräte, z.B. Schütze oder Leistungsschalter. Das Schütz (Bild 86) ist ein magnetisch betätigtes Stellglied, das zur Lastschaltung von Strömen verwendet wird. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Relais ist es daher

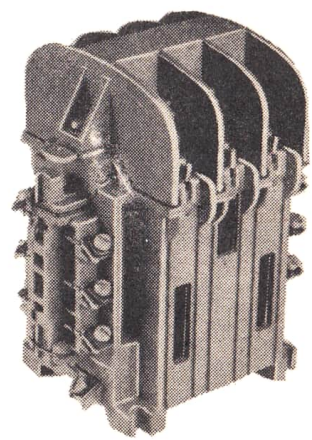


Bild 86

generell mit Funkenlöschkammern ausgerüstet.
Der Leistungsschalter, der mit einer magnetischen, hydraulischen, pneumatischen oder motorischen Fernbetätigung ausgerüstet sein kann, besitzt gegenüber dem Schütz einen Klinkenmechanismus.
Durch ihn wird das Schaltgerät im eingeschalteten Zustand verriegelt, so daß die Betätigungsenergie nach erfolgtem Schaltvorgang nicht mehr aufgebracht werden muß. Beim Öffnen des Schalters wird die Klinke entsprechend gelöst. Darüber hinaus werden sowohl Leistungsschalter als auch Schütze meist mit Bimetall- oder magnetischen Überstromauslösern versehen.

Auch spezielle Kupplungen, Bremsen und Ventile, die über Elektromagnete betätigt werden, können als unstetige Stellglieder angesehen werden.

5. Anzeige- und Meldegeräte

Anzeige- und Meldegeräte dienen zur Überwachung des normalen Betriebsablaufes einer Anlage oder eines Prozesses durch den Menschen. Sie haben einmal die Aufgabe, bestimmte Meßwerte dem Bedienungspersonal laufend anzuzeigen, sie zu registrieren und gegebenenfalls zu verarbeiten. In diesem Zusammenhang soll auf die verschiedenartigsten anzeigenden und schreibenden (registrierenden) Meßgeräte hingewiesen werden. Zur Weiterverarbeitung der Meßwerte zum Zwecke der Betriebsüberwachung oder der Betriebsabrechnung werden digitale Rechengeräte eingesetzt. Zum anderen sind Anzeige- und Meldegeräte zur Signalisierung bestimmter Betriebszustände erforderlich. Derartige Geräte melden dem Bedienungspersonal einmal, ob eine gewünschte Schalthandlung ausgeführt ist oder nicht (Rückmeldung). Andererseits haben sie die Aufgabe, beim Erreichen kritischer Meßwerte (Grenzwerte) oder unzulässiger Betriebsbedingungen Alarmsignale abzugeben (Fehlermeldung). Man unterscheidet

hierbei Sichtmelder und Hörmelder:

Sichtmelder:	Fallklappe
	Signallampe
	Schauzeichen
Hörmelder:	Hupe
	Glocke
	Sirene

Mit diesen Meldegeräten, deren Eingangssignale von Schwellwertschaltern geliefert werden, können gewöhnlich nur zwei verschiedene Zustände signalisiert werden (z.B. Licht oder kein Licht). In vielen Fällen ist es jedoch wünschenswert, daß neu aufgetretene Zustandsänderungen bzw. Störungen gegenüber den vom Bedienungspersonal bereits erkannten und quittierten Fehlern z.B. durch ein intermittierendes Signal besonders kenntlich gemacht werden, wozu jedoch noch eine Verarbeitung des zweiwertigen Fehlersignals erforderlich ist. In Bild 87 ist eine logische Schaltung

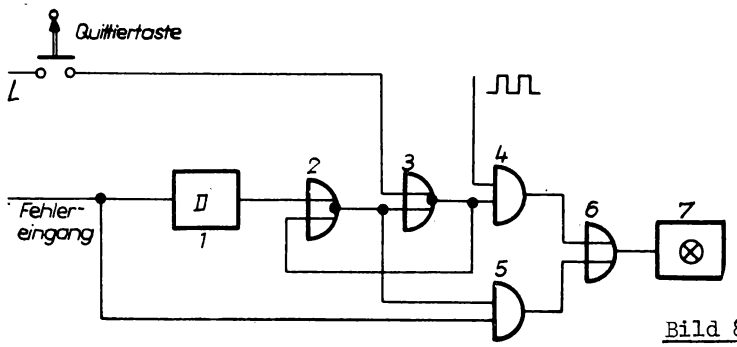


Bild 87

angegeben, durch die die Fehlersignale in der geforderten Weise verarbeitet werden. Jedes neu eingelaufene Fehlersignal wird durch das Differenzierglied 1 in einen Impuls umgeformt, durch den der Selbsthaltekreis, der aus den negierten Oder-Gliedern 2 und 3 besteht, angeregt wird. An dem einen Eingang des Und-Gliedes 4 liegt damit L-Signal, wodurch das intermittierende Signal über das Oder-

Glied 6 zur Signallampe 7 gelangen kann. Beim Drücken der Quittiertaste wird der Selbsthaltekreis gelöscht, so daß über das Und-Glied 5 bei noch anstehendem Fehler ein Dauersignal zur Signallampe gelangt.

Antworten und Lösungen

1) Bei polarisierten Relais, Tauchspulrelais und Drehspulrelais erfolgt die Betätigung der Kontakte in Abhängigkeit von der Stromrichtung.

2) Der Klebstift soll das Ankleben des Ankers an der Polplatte auf Grund von Remanenz verhindern.
Um den Anker bis an die Polplatte zu ziehen, muß durch die Erregeramperewindungen die Kraft F_A aufgebracht werden (Bild 88). Im angezogenen Zustand des

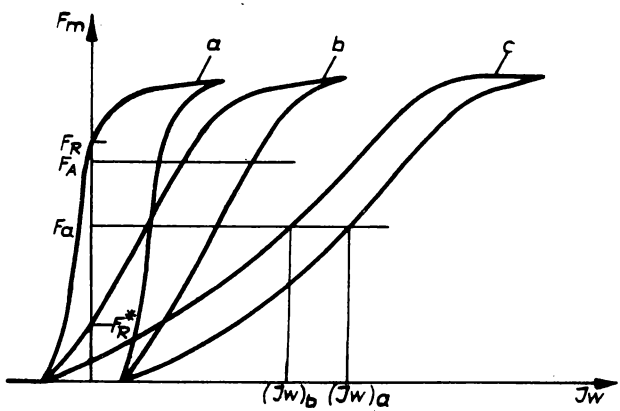


Bild 88

Ankers ist der Luftspalt gleich Null, so daß dann Kurve a gilt. Wird in diesem Zustand der Erregerstrom abgeschaltet, so wirkt auf den Anker weiterhin die remanente Kraft F_R, die im betrachteten Fall größer als die Kraft F_A ist, so daß der Anker angezogen ("kleben") bleibt. Durch einen Klebstift aus nichtmagneti-

schem Material (s.5 in Bild 5) wird verhindert, daß sich der Anker beim Anzug völlig an die Polplatte anlegt. Auf Grund des verbleibenden kleinen Luftspaltes ist jetzt für den Kraftverlauf die gescherte Kurve b (Bild 88) maßgebend. Dabei gilt:
$F_R^* < F_A$, so daß der Anker beim Abschalten des Erregerstromes wieder abfällt.

3) Mit den Gleichungen 1 und 6 erhält man:

$$F_m = \frac{\phi^2}{2\mu_o A_L} = \frac{\Theta^2}{2\mu_o A_L (R_{m_{Fe}} + R_{m_L})^2} ,$$

wobei $R_{m_{Fe}}$ der magnetische Widerstand des gesamten Eisenkreises und
R_{m_L} der magnetische Widerstand des Luftspaltes ist.
Mit

$$R_{m_L} = \frac{l_L}{\mu_o A_L}$$

ergibt sich:

$$F_m = \frac{\Theta^2}{2\mu_o A_L (R_{m_{Fe}} + \frac{l_L}{\mu_o A_L})^2}$$

$$F_m = \frac{\Theta^2 A_L}{2 \cdot \mu_o (R_{m_{Fe}} A_L + \frac{l_L}{\mu_o})^2} .$$

Um das Maximum der Kraft bei fest vorgegebener Luftspaltlänge l_L und veränderlich angenommenem Luftspaltquerschnitt A_L zu bestimmen, muß die erste Ableitung der Kraft F_m nach dem Querschnitt A_L gebildet und gleich Null gesetzt werden. Durch Anwendung der Quotienten- und Kettenregel erhält man:

$$\frac{dF_m}{dA_L} = \frac{\Theta^2}{2\mu_o} \cdot \frac{(R_{m_{Fe}} A_L + \frac{l_L}{\mu_o})^2 - A_L \cdot 2 (R_{m_{Fe}} A_L + \frac{l_L}{\mu_o}) R_{m_{Fe}}}{(R_{m_{Fe}} A_L + \frac{l_L}{\mu_o})^4}$$

Durch Ausheben und Kürzen wird:

$$\frac{dF_m}{dA_L} = \frac{\Theta^2}{2\mu_o} \cdot \frac{\frac{l_L}{\mu_o} - R_{m_{Fe}} A_L}{(R_{m_{Fe}} A_L + \frac{l_L}{\mu_o})^3}$$

Die Ableitung wird zu Null, wenn der Zähler Null wird:

$$\frac{l_L}{\mu_o} - R_{m_{Fe}} A_L = 0$$

Daraus erhält man die Bedingung:

$$R_{m_{Fe}} = \frac{l_L}{\mu_o A_L} = R_{m_L}$$

Durch Bilden der zweiten Ableitung kann nachgewiesen werden, daß der gefundene Extremwert ein Maximum ist.

Die Kraft im Luftspalt eines Relais wird also dann ein Maximum, wenn der magnetische Widerstand $R_{m_{Fe}}$ des Eisenkreises gleich dem magnetischen Widerstand R_{m_L} des Luftspaltes ist (Magnetische Widerstandsanpassung!)

4) Die Anzugssicherheit $S_a = \frac{I}{I_a}$ beinhaltet die Faktoren (Spannungsschwankungen, Erschütterungen), die für eine sichere Kontaktgabe maßgebend sind, da sie bis zu gewissem Grade ein Maß für den Kontaktdruck darstellt. Darüber hinaus wird die Anzugszeit eines Relais von der Anzugssicherheit beeinflußt.

Die Haltesicherheit $S_h = \frac{I}{I_h}$ gibt an, mit welcher Sicherheit die Kontakte geschlossen bleiben.
Die Haltesicherheit beeinflußt ferner die Abfallzeit eines Relais.

Auf Grund der Hystereseeigenschaften des Eisens ist immer $I_h < I_a$ und damit $S_h > S_a$. Aus ökonomischen Gründen (Stromersparnis) ist man bestrebt, daß S_h S_a wird.
Um diese Forderung angenähert zu erfüllen, kann man folgende Maßnahmen durchführen:

a) konstruktiv:
Verwendung von weichem Eisen mit einer schlanken Hysteresekurve (vgl. Bild 88),

b) schaltungstechnisch:
Bei erfolgtem Anzug wird durch Öffnen eines Ruhekontaktes ein Widerstand in Reihe zur Erregerwicklung geschaltet, durch den der Betriebsstrom um den Faktor $\frac{I_h}{I_a}$ verringert wird. (Bild 89)

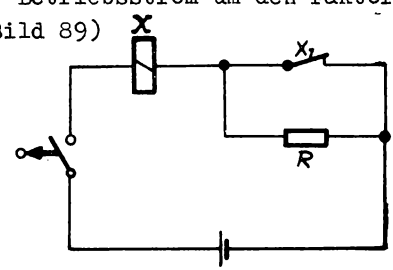


Bild 89

5)Eine Verringerung des Drahtdurchmessers d_o um den Faktor n bedeutet:

$$d_d = \frac{d_{d_o}}{n} \; ; \qquad A_d = \frac{A_{d_o}}{n^2}$$

Dann wird bei A_w = konst.:

a) die unterzubringende Windungszahl (nach Gl.9):

$$w = \frac{A_w \cdot k_\sigma}{d_d^2} = \frac{A_w \cdot k_\sigma}{d_{d_o}^2} \; n^2$$

$$\underline{w = w_o \, n^2}$$

b) der erforderliche Strom (Stromdichte G = konst.!)

$$I = G \cdot A_d = G \frac{A_{d_o}}{n^2}$$

$$\underline{I = \frac{I_o}{n^2}}$$

c) die aufzubringende Amperewindungszahl:

$$\Theta = I \cdot w = \frac{I_o}{n^2} \cdot w_o \; n^2$$

$$\underline{\Theta = Iw = I_o w_o = \text{konst.}}$$

d) der Widerstand der Wicklung (Gl. 10):

$$R = w \rho \frac{l_m}{A_d} = w_o \, n^2 \rho \frac{l_m}{A_{d_o}} n^2$$

$$\underline{R = R_o \, n^4}$$

e) die Verlustleistung (Gl. 11):

$$P = I^2 R = \frac{I_o^2}{n^4} R_o \, n^4$$

$$\underline{P = I^2 R = I_o^2 R_o = \text{konst.}}$$

6) Die elastische Gegenkraft F der Kontaktfedern nimmt etwa proportional mit der Anzahl der Federnpaare zu. Da die hierfür aufzubringende magnetische Zugkraft angenähert quadratisch mit der Amperewindungszahl ansteigt, nehmen die pro Kontaktfedernpaar erforderlichen Anzugsamperewindungen mit steigender Kontaktzahl ab. Zu beachten ist ferner, daß durch die für den 1. Kontakt erforderliche Anzugsamperewindungszahl die von der Kontaktzahl unabhängigen Reibungs- und Be-

schleunigungskräfte berücksichtigt werden.

7) Der Strom in der Erregerwicklung muß folgenden beiden Gleichungen genügen:

$$I = \frac{U}{R},$$

$$I = \frac{\Theta_a \cdot S_a}{w},$$

wobei Θ_a die aufzubringenden Anzugsamperewindungen sind.

Mit Gleichung (10) erhält man daraus durch Eliminieren von I und entsprechender Umformung die unterzubringende Windungszahl:

$$w = \frac{U A_w k_\sigma}{4 \Theta_a S_a \rho (d_i + h_s)},$$

mit $h_s = {}^1/2 (d_a - d_i)$.

Damit läßt sich nach Gleichung (9) der Drahtdurchmesser wie folgt berechnen:

$$d_d = \sqrt{\frac{A_w \cdot k_\sigma}{w}} = \sqrt{\frac{4 \Theta_a S_a \rho (d_i + h_s)}{U}}$$

Zahlenrechnung:
Erforderliche Anzugsamperewindungen:

$$\Theta_a = (60 + 20 + 4 \cdot 10)\ A = 120\ A$$

Drahtdurchmesser:

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \cdot 120A \cdot 2 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-6} \Omega mm \cdot 12mm}{24\ V}}$$

$d_d = 0{,}09$ mm (abgerundet!)

Windungszahl:

$$w = \frac{A_w \, k\sigma}{d_d^2} = \frac{235 \cdot 0{,}6 \text{ mm}^2}{0{,}09^2 \text{ mm}^2}$$

$$\underline{w = 17400}$$

Widerstand:

$$R = 4 \, w \rho \, \frac{d_i + h_s}{d_d^2} = 4 \cdot 17400 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-6} \Omega\text{mm} \, \frac{12 \text{ mm}}{0{,}09^2 \text{ mm}^2}$$

$$\underline{R = 1{,}84 \text{ k } \Omega}$$

Erregerstrom:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24 \text{ V}}{1{,}84 \text{ k } \Omega}$$

$$\underline{I = 13{,}1 \text{ mA}}$$

Stromdichte:

$$G = 4 \, \frac{I}{\pi \, d_d^2} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{\pi \, 0{,}09^2 \text{ mm}^2}$$

$$\underline{G = 2{,}05 \, \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}}$$

Der errechnete Wert der Stromdichte liegt unter dem als maximal vorgeschriebenen Wert von $G_{max} = 2{,}5 \, \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$.

Erreichte Anzugssicherheit:

$$S_a = \frac{I_w}{\Theta_a} = \frac{13 \text{ mA} \cdot 17400}{120 \text{ A}}$$

$$\underline{S_a \approx 2}$$

8) a. Ein Relais besitzt nur einen Eingang (Erregerwicklung) und mehrere Ausgänge (Kontakte), ein kontaktloses Logik-Element (Und- oder Oder-Glied) dagegen mehrere Eingänge und nur einen Ausgang (Bild 90).

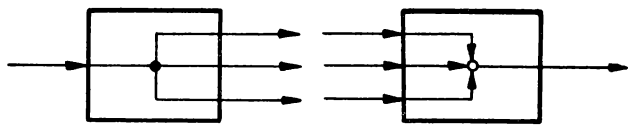


Bild 90

Durch ein Relais erfolgt lediglich eine Vervielfachung eines Eingangssignales (Signalverzweigung). In einem kontaktlosen Logik-Element werden mehrere Eingangssignale zu einem neuen Ausgangssignal verarbeitet, es erfolgt also eine Signalverarbeitung in Form einer logischen Verknüpfung.
Soll mit Relais eine logische Verknüpfung durchgeführt werden, so müssen zu diesem Zweck die Kontakte mehrerer Relais in bestimmter Weise zusammengeschaltet werden. Die Signalvervielfachung wird bei Logik-Elementen durch Verzweigung der Ausgangsleitungen bewirkt.

Bei Steuerungen mit Relais erfolgt also die Signalvervielfachung durch die Kontakte im Bauelement und die Signalverarbeitung außerhalb des Bauelementes. Bei kontaktlosen Steuerungen wird das Signal dagegen im Logik-Element verarbeitet und außerhalb desselben vervielfacht (Bild 91).

b. Da das Ausgangssignal des Eingangsgliedes (Schalter) in der Steuereinrichtung mehrmals benötigt wird, muß eine Signalvervielfachung durchgeführt werden.

Bei Relaissteuerungen erfolgt die Signalvervielfachung durch die Kontakte, so daß ein Schalter mit mehreren Kontakten verwendet werden müßte. Diese Kontakte müßten darüber hinaus durch je zwei

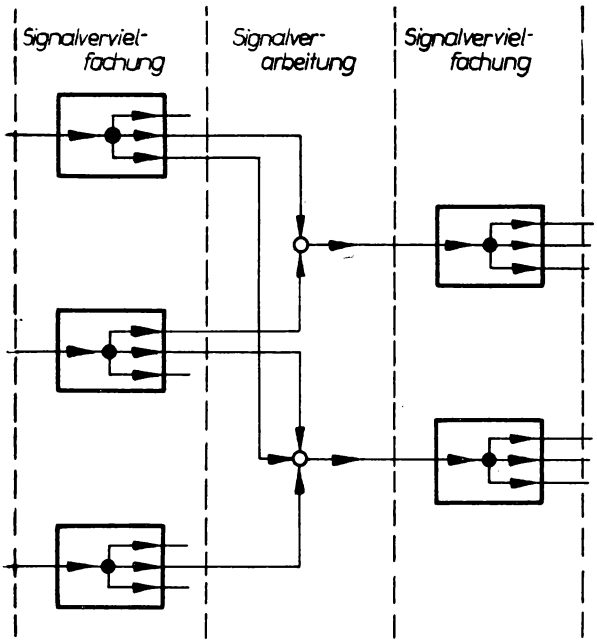
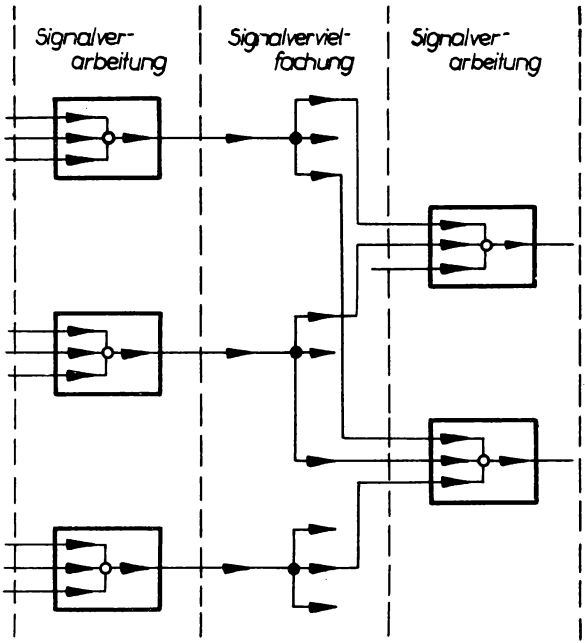


Bild 91

a) Aufbau einer Steuerung mit Relais



b) Aufbau einer Steuerung mit Logik-Elementen

Leitungen in die Steuereinrichtung eingeschleift werden. Bei zehn Kontakten (Ausgangssignalen) müßte dann die Steuereinrichtung durch 20 Leitungen mit dem entsprechenden Eingangsglied verbunden werden. Man kann diese Kontaktvervielfachung auch durch zusätzliche Hilfsrelais durchführen und würde dann mit einem Leiterpaar auskommen.

Bei kontaktlosen Steuerungen erfolgt die Signalvervielfachung durch Verzweigung der Ausgangsleitung außerhalb des betreffenden Bauelementes. Es ist dabei gleichgültig, wie weit die Verzweigungsstelle von dem Bauelement entfernt ist. Die Vervielfachung des Ausgangssignals des Eingangsgliedes kann also auch in der Steuereinrichtung erfolgen, so daß unter den gleichen Bedingungen bei kontaktlosen Steuerungen auch ohne das Einfügen von zusätzlichen Hilfsrelais nur ein Leiterpaar benötigt wird.
Bei flächenmäßig weit ausgedehnten Anlagen ist also im allgemeinen eine kontaktlose Steuerung vorteilhafter, wodurch sehr viel Steuer- und Meldekabel eingespart werden kann.

9) a. Und-Glied und Oder-Glied nach Bild 47 und Bild 48:

Soll nach einem Und-Glied ein Oder-Glied geschaltet werden (Bild 92a), so muß folgende Bedingung erfüllt

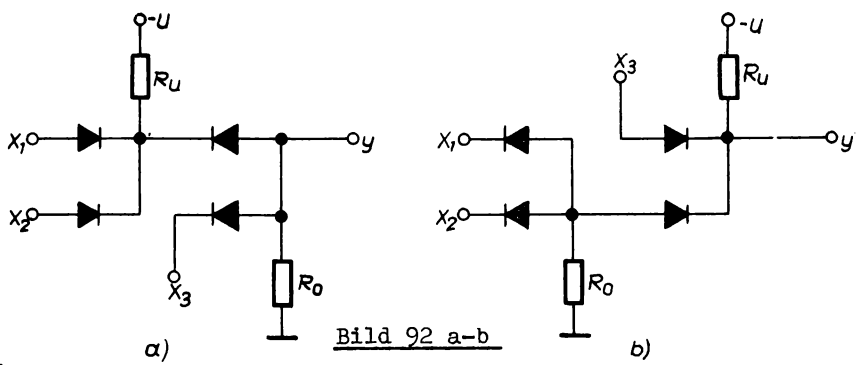


Bild 92 a-b

sein, damit das L-Signal innerhalb des vorgeschriebenen Bereiches bleibt:

$$R_O \gg R_U$$

Wird das Oder-Glied vor das Und-Glied geschaltet (Bild 92b), so muß

$$R_U \gg R_O$$

sein, damit bei $x_2 \equiv 0$ und $x_1 \equiv 0$ die Eingangsspannung am Und-Glied noch im 0-Signal-Bereich liegt.

Beide Bedingungen widersprechen einander und können deshalb nicht gleichzeitig erfüllt werden. Daraus folgt, daß bei festgelegter Dimensionierung unter der Bedingung $R_O \gg R_U$ ein Oder-Glied nur nach einem Und-Glied geschaltet werden darf und nicht davor. Bei einer Dimensionierung unter der Bedingung $R_U \gg R_O$ darf dann ein Oder-Glied nur vor einem Und-Glied angeordnet werden und nicht danach.

Und-Glied und Oder-Glied dieses Steuersystems können also nicht in beliebiger Reihenfolge hintereinander geschaltet werden.

b. Und-Glied und Oder-Glied nach Bild 50 und Bild 51: Durch ein nachgeschaltetes Oder-Glied wird ein Und-Glied nicht belastet (Bild 93a). Als Belastungswiderstand gilt erst der Basiswiderstand der folgenden Transistorstufe. Wird ein Oder-Glied vor ein Und-Glied geschaltet, so ist der entsprechende Vorspannwiderstand des Und-Gliedes gleichzeitig Arbeitswiderstand des Oder-Gliedes (Bild 93b).

Und- und Oder-Glied dieses Steuersystems können also in beliebiger Reihenfolge hintereinander geschaltet werden.

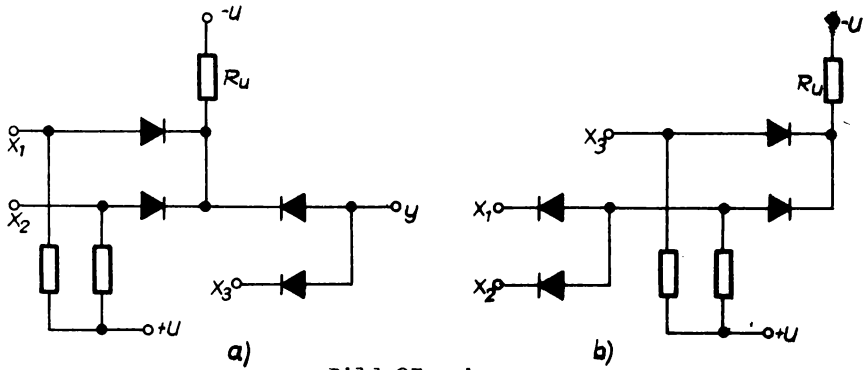


Bild 93 a-b

10) Wird eine positive Spannung als L-Signal definiert, so ist in den Bildern 47 und 48 die Polarität der Dioden umzukehren und der Arbeitswiderstand des Und-Gliedes mit dem positiven Pol der Betriebsspannungsquelle zu verbinden (Bild 94).

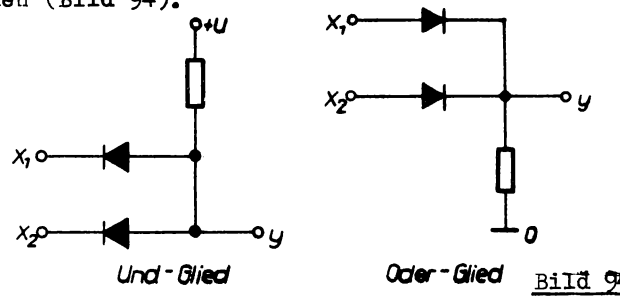


Bild 94

Wenn man diese Vertauschungen berücksichtigt, folgt direkt aus 2.3.4.a die Beschreibung der Arbeitsweise des Und-Gliedes für positive Spannungen als L-Signal.

11) Das Prinzip der Eingabeverknüpfung (mit Speicherung) wendet man zweckmäßigerweise dort an, wo das Ergebnis einer logischen Verknüpfung gespeichert oder zwischengespeichert werden soll.
Nach dem Prinzip der (Speicherung mit) Ausgabeverknüpfung wird man dann arbeiten, wenn aus irgend einem

Grund die zu verknüpfenden Funktionen sowieso gespeichert werden müssen.
Das Prinzip der Durchgangsverknüpfung wird man dort anwenden, wo die Logik möglichst schnell arbeiten soll.

12.) Eine symmetrisch getriggerte, bistabile Kippschaltung kippt bei jedem neu eintreffenden Impuls in den jeweils entgegengesetzten Zustand. Dadurch ist die Frequenz der Ausgangsgröße nur halb so groß wie die der Eingangsgröße (Bild 95). Eine symmetrisch getriggerte, bistabile Kippschaltung arbeitet also als Frequenzuntersetzer mit dem Untersetzungsverhältnis $f_{aus} : f_{ein} = 1 : 2$.

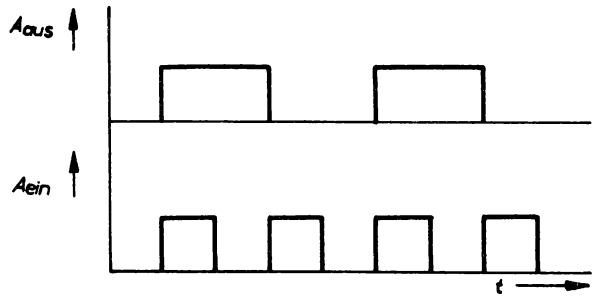


Bild 95

13.) Beim Einschalten der Betriebsspannung läßt es sich von vornherein nicht eindeutig sagen, welche Lage die bistabile Kippschaltung einnimmt. Durch besondere Schaltungsmaßnahmen kann aber erreicht werden, daß die Kippschaltung dabei in eine vorher festgelegte Vorzugslage einkippt. So kann z.B. über einen Handtaster auf den Löscheingang des Speichers zusätzlich ein Triggerimpuls gegeben werden, durch den der Speicher in die Vorzugslage gezwungen wird.

Durch ein RC-Glied, das zwischen dem Löscheingang und dem negativen Pol der Betriebsspannungsquelle angeordnet ist, wird erreicht, daß der betreffende Transistor im Moment des Einschaltens der Betriebsspannung einen

negativen Impuls erhält und somit der Speicher in die Vorzugslage gekippt wird.

14.)Um die Transformation des Erregerstromes in die Kurzschlußwicklung beim Ausschalten der Betriebsspannung zu verhindern, kann man in die Kurzschlußwicklung eine Diode in Sperrichtung einschalten. Dadurch wird die Zeitkonstante T_2 beim Abschalten zu Null. Die Wirkung der Anzugsverzögerung bleibt jedoch dadurch erhalten, daß beim Einschalten der Betriebsspannung der Strom in der Kurzschlußwicklung in entgegengesetzter Richtung fließt.

15.)Im Bild 96 ist das Signalflußbild zur Realisierung einer Abfallverzögerung mit kontaktlosen Bauelementen wiedergegeben. Das dazugehörige Zeitdiagramm zeigt Bild 97.

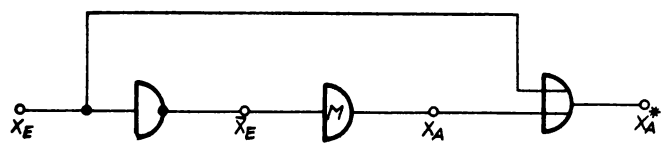


Bild 96

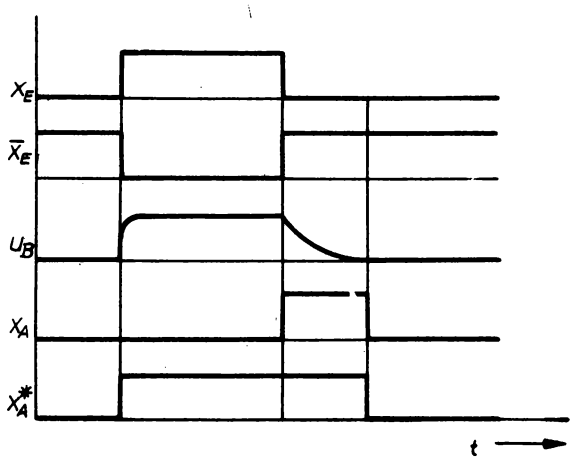


Bild 97

Literatur

/1/ Gabler,M.,Haškovec,J. und E. Tománek:
Magnetische Verstärker.
VEB Verlag Technik Berlin,1960.

/2/ Hebel,M. und W.Vollmeyer: Das Fernmelderelais.
Verlag R.Oldenbourg München,1961.

/3/ Kašpar,F.: Thermobimetalle in der Elektrotechnik.
VEB Verlag Technik Berlin,1960.

/4/ Petzoldt,H.: Das Fernmelderelais und seine Schaltung.
Akademische Verlagsgesellschaft Geest u.Portig K.-G.,Leipzig, 1952.

/5/ Rumpf,K.-H.: Elektronik in der Fernsprechvermittlungstechnik.
VEB Verlag Technik Berlin und Porta Verlag München, 1956.

/6/ Rumpf,K.-H.: Bauelemente der Elektronik.
VEB Verlag Technik Berlin, 1959.

/7/ Schaposchnikow,A.A.: Elektronen- und Ionenröhren.
VEB Verlag Technik Berlin, 1957.

/8/ Shea,R.F.: Transistortechnik.
VEB Verlag Technik Berlin und Berliner Union Stuttgart,1961.

/9/ Zühlsdorf,W.: Kleines Handbuch der Steuerungstechnik. VEB Verlag Technik Berlin, 1961.

INGENIEUR-
FERNSTUDIUM

Knüpfer

Steuerungs- und Regelungstechnik 5

Herausgeber:
Institut für Fachschulwesen
der Deutschen Demokratischen Republik
Karl-Marx-Stadt

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Ing. Achim Knüpfer

S T E U E R U N G S - U N D R E G E L U N G S T E C H N I K

5

Schaltsysteme

V e r ö f f e n t l i c h t :
INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
K A R L - M A R X - S T A D T

"Dieser Lehrbrief wurde mit Genehmigung des Verlages Technik als Vorabdruck aus dem Lehrbuch "Automatisierungstechnik" hergestellt."

2. Auflage

Alle Rechte vorbehalten

Ag 613/55/65/450 Best.-Nr. 5034-05

Vorzugsschutzgebühr MDN 4,00

Inhaltsverzeichnis

		Seite
5.	Schaltsysteme	1
5.1.	Kontaktsteuerungen	1
5.1.1.	Wesen der Kontaktsteuerungen	1
5.1.2.	Beispiele	2
5.2.	Grundzüge der Schaltalgebra	8
5.2.1.	Grundsätzliche Bemerkungen	8
5.2.2.	Logische Verknüpfungen	10
5.2.3.	Gesetze	15
5.2.4.	Rechenregeln	22
5.2.5.	Begriffe	30
5.2.6.	Kürzungsverfahren	34
5.3.	Bauglieder für kontaktlose Steuerungen	43
5.3.1.	Bauglieder mit Halbleiterbauelementen	43
5.3.1.1.	Allgemeines	43
5.3.1.2.	Logische Funktionsglieder	48
5.3.1.3.	Zusammenschaltung mehrerer logischer Verknüpfungsglieder	55
5.3.1.4.	Speicherglieder	65
5.3.1.5.	Zeitglied	69
5.3.2.	Bauglieder mit pneumatischen Elementen	71
5.3.2.1.	Allgemeines	71
5.3.2.2.	Logische Verknüpfungsglieder	75
5.3.2.3.	Zusammenschaltung von mehreren logischen Verknüpfungsgliedern	77
5.3.2.4.	Speicherglied	78
5.3.2.5.	Zeitglied	80
5.4.	Entwurf von Steueranlagen	81
5.4.1.	Einteilung der Steuerungen	81
5.4.2.	Beispiel Steuerung eines Filters	84
5.4.2.1.	Aufgabenstellung	84
5.4.2.2.	Anlagenskizze	86
5.4.2.3.	Wirkungsschema	87
5.4.2.4.	Schaltfolgediagramm	89
5.4.2.5.	Stromlaufplan	91

		Seite
5.4.2.6.	Wirkschaltplan	93
5.4.3.	Beispiel Steuerung in einer Transportanlage	95
5.4.3.1.	Schaltbelegungstabelle	95
5.4.3.2.	Signalflußplan	96
5.4.4.	Beispiel Steuerung einer Drehmaschine	98
	Übungen	111
	Antworten und Lösungen	112
	Literaturnachweis	117

5. Schaltsysteme

Schaltsysteme sind Wirkungswege, in denen, eventuell bis auf die Eingangsgrößen, nur binäre Signale übertragen werden. Die in diesem Abschnitt behandelten Steuerungen werden deshalb entweder aus Gliedern aufgebaut, die nur zwei Schaltzustände einnehmen können, oder aus solchen, die diese Bedingung durch geeignete Ansteuerung erfüllen.

Der klassische Vertreter zum Aufbau von binären Steuerungen ist der allgemein bekannte elektrische Schaltkontakt in der Form von Schaltern, Relais, Schützen u.a. Neuerdings werden aber auch kontaktlose Steuerungen gebaut, deren Glieder teilweise ein stetiges Verhalten haben. Diese sind zum Aufbau von Schaltsystemen ebenfalls geeignet, da sie bei Ansteuerung mit binären Signalen nur binäre Signale abgeben können. Für den funktionellen Aufbau und die Berechnung einer Steuereinrichtung ist es deshalb vorerst belanglos, welche Art von Glieder verwendet wird. Wichtig ist nur, daß die besonderen Eigenarten der gewählten Glieder bei der Anwendung und Berechnung beachtet werden.

5.1. Kontaktsteuerungen

5.1.1. Wesen der Kontaktsteuerungen

Bei der Automatisierung von Produktionsprozessen spielen Kontaktsteuerungen eine bedeutende Rolle. Das Hauptglied derartiger Steuerungen ist das Relais. Wird dieses nur von der Funktion her betrachtet, hat es exakt zwei Schaltstellungen, die eingeschaltete und die ausgeschaltete. Diese beiden Stellungen lösen einander in unendlich kurzer Zeit ab, wenn das Eingangssignal einen kritischen Wert über- oder unterschreitet. Der Schaltkontakt hat nur zwei diskrete Stellungen und liefert demzufolge binäre Signale. Ist ein Schaltkontakt geöffnet, ist der Ausgang desselben spannungslos und es fließt kein Strom. Das ist das eine Binärsignal. Wird der Schaltkontakt geschlos-

sen, erreicht sein Ausgangssignal den vollen Wert der Betriebsspannung und es fließt ein Strom, dessen Größe durch den angeschlossenen Verbraucher bestimmt wird. Das ist das zweite Binärsignal. Es gilt also die in Abb. 5.1 dargestellte Schaltcharakteristik. Das Ausgangssignal eines Relais ist danach immer unstetig, ganz gleich, ob ein stetiges oder ein unstetiges Eingangssignal vorhanden ist. Daraus ergibt sich die Tatsache, daß mit Relais immer nur unstetige und niemals stetige Steuerungen aufgebaut werden können. Da dieses Verhalten durch die Eigenschaft des Schaltkontaktes bedingt ist, gilt es ganz allgemein für alle kontaktbehafteten Bauelemente.

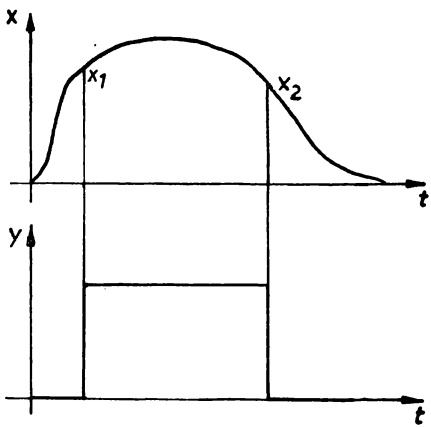


Abb. 5.1
Schaltcharakteristik eines Relais
(x: Eingangsgröße, y: Ausgangsgröße, x_1: Ansprechwert, x_2: Abfallwert)

5.1.2. Beispiele

Zur Veranschaulichung der Wirkungsweise von Kontaktschaltungen werden nachfolgend einige Beispiele für die prinzipiellen Schaltungsarten gegeben, wobei alle Geräte die für die Starkstromtechnik verbindlichen Bezeichnungen erhalten.

Reihenschaltung von Kontakten
Jede Steuereinrichtung wird gemäß einer Aufgabenstellung entworfen, in der die beabsichtigte Beeinflussung der zu steuernden Größe genau festgelegt ist. Zusätzlich zur aufgabengemäßen

Beeinflussung der Steuerstrecke müssen Verriegelungen zur Einhaltung bestimmter Sicherungs- und Arbeitsschutzforderungen in die Steuereinrichtung eingearbeitet werden. Beispielsweise muß dafür gesorgt werden, daß das Schnittwerkzeug einer Stanze nur dann in Bewegung gesetzt werden kann, wenn Sicherheit dafür besteht, daß die Bedienungsperson durch das herabgehende Werkzeug nicht verletzt werden kann. Zu diesem Zweck kann die Stanze vor dem Werkzeug ein Schutzgitter haben, welches beim Schließen den Schalter b2 in Abb. 5.2 betätigt. Die Einschaltung des Schaltschützes c1 für die Magnetkupplung der Maschine durch den Taster b1 ist nur möglich, wenn b2 geschlossen ist. Ist der Schutzkorb offen, wird die Einschaltung durch den Kontakt des Verriegelungsschalters b2 verhindert. Die Kontakte der Schalter b1 und b2 müssen in Reihe geschaltet werden, da die Einschaltung von c1 nur erfolgen darf, wenn beide Schalter betätigt sind.

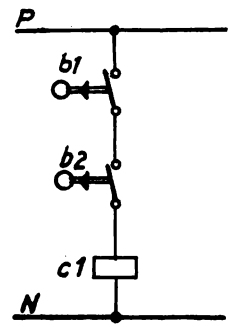


Abb. 5.2
Reihenschaltung von Kontakten

Parallelschaltung von Kontakten

Nicht immer muß die Steuereinrichtung zur Beeinflussung des Produktionsprozesses dienen. Sie kann beispielsweise auch zur Beeinflussung einer Meßeinrichtung benutzt werden. Es besteht die Aufgabe, mehrere in Form von elektrischen Spannungen zur Verfügung stehende Meßwerte mit einem einzigen Meßinstrument anzuzeigen. Da die einzelnen Meßwerte nur nacheinander an das Meßgerät angeschaltet werden können, ist eine besondere Steuereinrichtung erforderlich. Durch einen nicht dargestellten Programmgeber oder durch einen Umschalter werden die Meßwerte $x_0 \ldots x_n$ durch die Relais d1...dn nacheinander an das Meßgerät angeschaltet und stehen für die Ablesung bereit. (Abb. 5.3)

Da der Anzeigevorgang von jedem einzelnen Meßwert ausgelöst werden muß, sind alle Meßwerte über parallelgeschaltete Kontakte zu leiten.

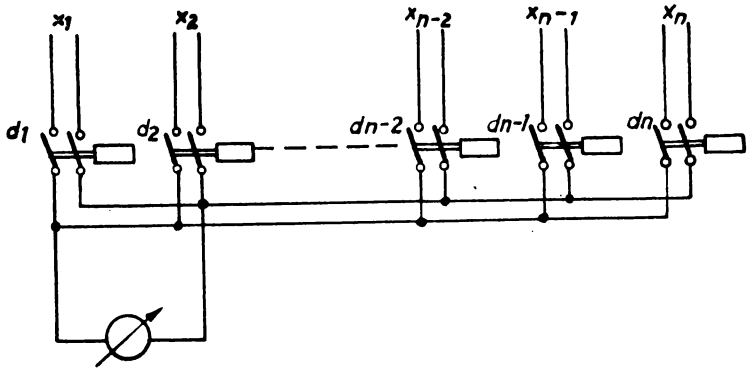


Abb. 5.3 Parallelschaltung von Kontakten

Signalumkehr durch Kontakte

Des öfteren besteht die Aufgabe, ein Signal umzukehren. Das heißt, in einem von zwei miteinander durch ein Relais verbundenen Stromkreisen soll dann ein Strom fließen, wenn der andere stromlos ist. Das wird durch ein Relais mit einem Ruhekontakt erreicht. Als Beispiel dient die Einbruchsicherung nach Abb. 5.4 Solange der im sogenannten Überwachungsstromkreis angeordnete Sicherungsdraht die Verbindung der Klemmen a und herstellt, ist das Relais erregt und sein Kontakt geöffnet. Die Hupe zur Anzeige des Alarms wird nicht in Betrieb gesetzt. Sobald der Überwachungsstromkreis durch Bruch des Sicherungsdrahtes oder eine andere Leitungsunterbrechung stromlos wird, fällt das Relais ab und schließt den Hupenstromkreis zur Signalgabe. Der Hupenstromkreis wird also dann geschlossen, wenn der Überwachungsstromkreis nicht geschlossen ist.

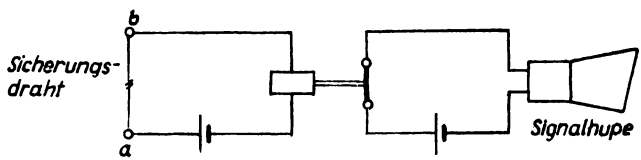


Abb. 5.4 Schaltung mit Ruhekontakt

Diese drei Grundfälle, die Reihenschaltung, die Parallelschaltung und die Umkehrung von Signalen, werden in den Steueranlagen in sinnvoller Kombination verwendet.

Reihen-, Parallelschaltung von Kontakten
Es soll ein Schaltschütz c1 dann ansprechen, wenn ein oder zwei beliebige der drei Relais d3, d2, d1 erregt sind. Wenn keines oder alle drei der vorhandenen Relais erregt sind, soll c1 ausgeschaltet sein.

Die Schaltung entsteht aus der aufgabengemäßen Kombination der Kontakte von Relais d3, d2 und d1. Aus der Aufgabenstellung geht hervor, daß für die Erregung von c1 mehrere Möglichkeiten bestehen, nämlich, daß nur irgendeins der Relais erregt ist und die jeweils zwei übrigen entregt sind, oder daß zwei beliebige Relais eingeschaltet sind und das dritte ausgeschaltet ist. Die Einschaltung von c1 muß mit jeder dieser Möglichkeiten erreicht werden, die deshalb alle parallel zu schalten sind. Jede Möglichkeit hat aber wiederum bestimmte Bedingungen. Als solche kann man die Stellungen der drei Relais untereinander auffassen. Eine Möglichkeit ist beispielsweise dann gegeben, wenn die Bedingung Relais d3 angezogen und Relais d2 und d1 abgefallen gegeben ist. Eine weitere Möglichkeit existiert mit den Bedingungen d2 angezogen und d3 sowie d1 abgefallen oder d1 angezogen und d2 und d3 abgefallen. Weitere Möglichkeiten sind d2 und d1 angezogen und d3 abgefallen, d3 und d2 angezogen und d1 abgefallen oder d3 und d1 angezogen und d2 abgefallen. Weitere Möglichkeiten bestehen nicht. In der Schaltung müssen für alle Bedingungen in Reihe geschaltete Kontakte verwendet werden, die für die bestehenden sechs Möglichkeiten untereinander parallel zu schalten sind. Für alle angezogenen Relais sind selbstverständlich Arbeitskontakte und für alle abgefallenen Ruhekontakte zu verwenden. Es entsteht so die in Abb. 5.5a gezeigte Schaltung. Bei etwas Erfahrung ist es möglich, diese durch Zusammenfassung von Kontakten zu vereinfachen. Es entsteht Abb. 5.5b und nach weiterer Zusammenfassung Abb. 5.5c.

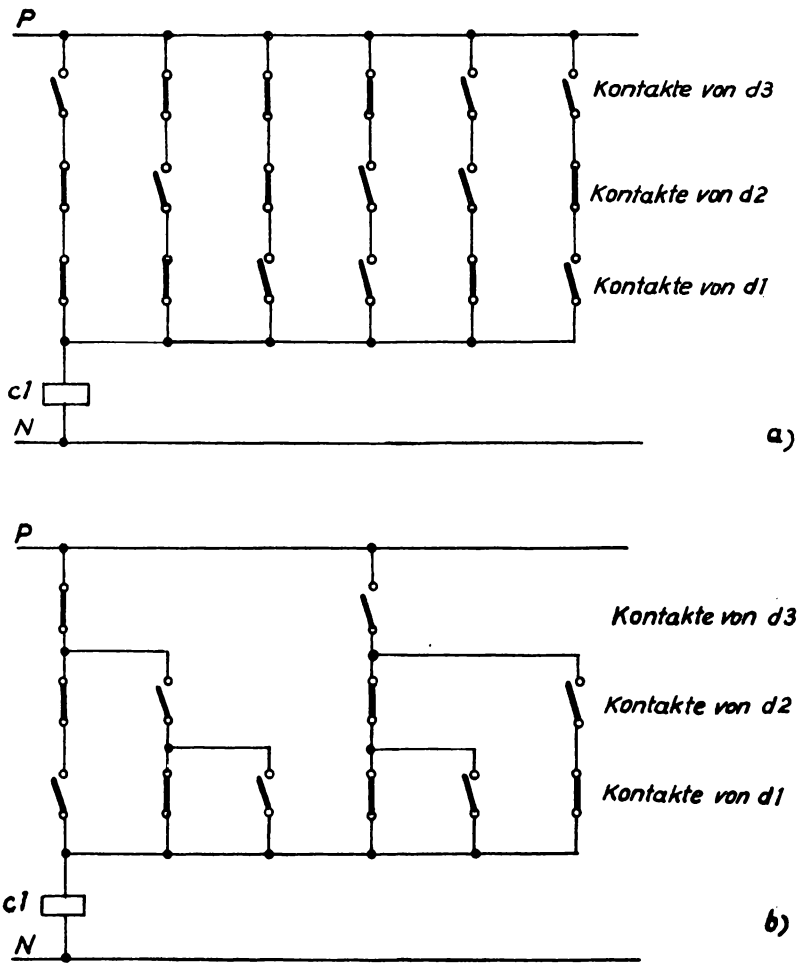


Abb. 5.5a-b Reihenparallelschaltung von Kontakten

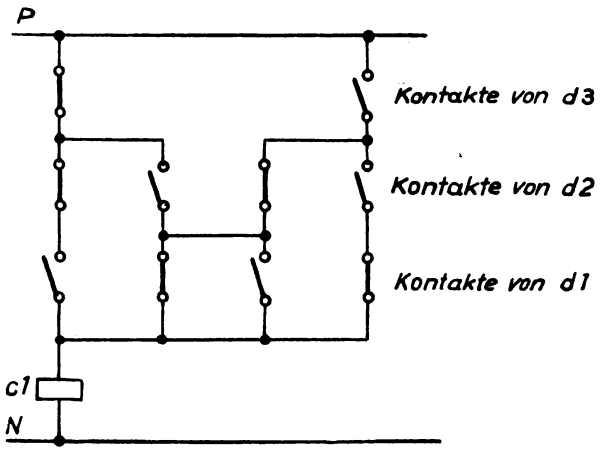


Abb. 5.5c Reihenparallelschaltung von Kontakten

Selbsthalteschaltung

Nicht immer steht ein Eingangssignal solange zur Verfügung, wie es für einen Steuervorgang benötigt wird. Es besteht darum die Aufgabe, das Signal zu speichern. Das geschieht mit der sogenannten Selbsthalteschaltung nach Abb. 5.6. Wird der mit "Ein" bezeichnete Taster betätigt, wird das Relais d1 erregt. Dadurch schließt sich der zum Eintaster parallel geschaltete Kontakt von d1 sodaß der Steuerstrom für das Relais weiter fließen kann, wenn der Taster geöffnet wird. Das Relais hält sich solange selbst, bis der Steuerstrom durch Betätigung der Austaste unterbrochen wird.

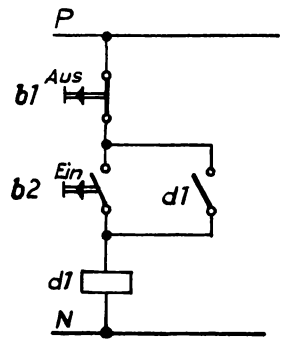


Abb. 5.6
Selbsthalteschaltung

Verzögerungsschaltung

Zum Schluß dieser allgemeinen Betrachtungen von Kontaktschaltungen soll noch kurz auf die Bedeutung der Verzögerungsglieder eingegangen werden. Sie werden überall dort benötigt, wo

zwischen der Eingabe eines Kommandos und dessen Ausführung eine bestimmte Zeit vergehen muß. Beispielsweise können verschiedene Pumpen und Verdichter nur gegen geschlossene Ventile anlaufen. Es besteht also die Aufgabe, das Ventil erst dann zu öffnen, wenn der Antriebsmotor seine Nenndrehzahl erreicht hat. Dieses wird durch den Einbau eines Magnetventils realisiert, welches durch ein Zeitrelais gesteuert wird. Abb. 5.7 zeigt das Schaltbild.

Bei Betätigung des Eintasters b2 zieht das Schütz c1 für den Pumpenmotor an und hält sich wie im vorangegangenen Beispiel selbst. Gleichzeitig wird das Zeitrelais d1 erregt. Seine Verzögerungszeit ist so eingestellt, daß es das Schütz c2 für das Magnetventil erst dann eingeschaltet, wenn der Antriebsmotor seine Nenndrehzahl erreicht hat. Nachdem c2 eingeschaltet ist, erhält auch die Meldelampe h1 Spannung und zeigt den vorliegenden Betriebszustand an. Bei Betätigung des Austasters b1 oder des Manometerkontaktes b3 fallen beide Schütze ab und das Aggregat steht für eine neue Einschaltung bereit.

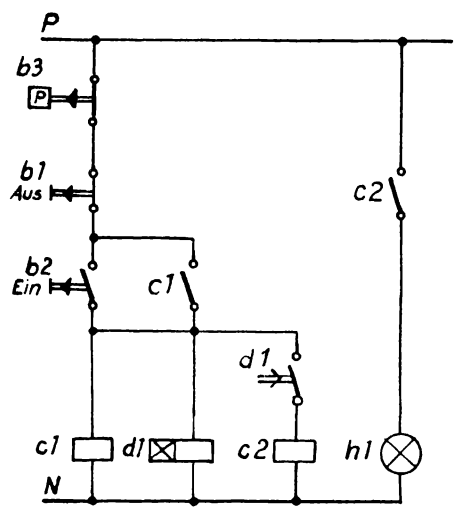


Abb. 5.7 Verzögerungsschaltung

5.2. Grundzüge der Schaltalgebra

5.2.1. Grundsätzliche Bemerkungen

Mit steigender Anzahl komplizierter Verriegelungsbedingungen zur Ableitung der Ausgangssignale aus den vorhandenen Eingangssignalen gestaltet sich der intuitive Entwurf von Steuer-

schaltungen zu einem immer schwierigerem Problem. Das umsomehr, da alle Anlagen möglichst mit einem minimalen Geräteaufwand erstellt werden sollen.

Es machte sich deshalb erforderlich, Verfahren zu entwickeln, die statt dem intuitiven Suchen nach einer geeigneten Schaltung eine systematische Behandlung der zu lösenden Probleme erlauben. Dieses ist mit Hilfe der Schaltalgebra möglich. Die Schaltalgebra ist ein Zweig der mathematischen Logik und bedient sich der Aussagen "wahr und "falsch". Diese beiden Aussagen stehen in voller Übereinstimmung mit den binären Schaltzuständen "Kontakt geschlossen" und "Kontakt offen" bzw. "Spannung vorhanden" und "Spannung nicht vorhanden", wie sie in den Steueranlagen vorkommen. Bei den folgenden Betrachtungen werden diese Zustände durch "L" und "O" gekennzeichnet und zwar gilt "L" für die Aussage "wahr", "Kontakt geschlossen" bzw. "Spannung vorhanden" und "O" für die Aussage "falsch", "Kontakt offen", "Spannung nicht vorhanden".

Alle Eingangs- und Ausgangssignale werden ebenfalls durch Symbole dargestellt. Bei Kontaktschaltungen erhalten Schütz- und Relaisspulen große Buchstaben wie X_n, X_{n-1}, ...X_1, X_o. Die dazugehörigen Arbeitskontakte werden durch kleine Buchstaben x_n, x_{n-1}, ... x_1, x_o und die Ruhekontakte durch $\bar{x}_n$, $\bar{x}_{n-1}$, ... $\bar{x}_1$, $\bar{x}_o$ bezeichnet, Schaltfunktionen, die eine Aussage von mehreren Variablen (Kontakten) bilden, erhalten die Bezeichnungen y_n, y_{n-1}, ... y_1, y_o.

Die schaltalgebraische Behandlung einer Aufgabe stellt die Verknüpfung mehrerer physikalischer Größen dar, die als binäre Variable vorliegen. Hat die physikalische Größe nur zwei Zustände, kann sie durch eine Variable dargestellt werden; hat sie jedoch mehr mögliche Zustände, müssen für ihre Darstellung Kombinationen von mehreren binären Variablen verwendet werden. Dazu wird das binäre (duale) Zahlensystem benutzt, welches auf die Potenzen der Zahl 2 aufbaut.

Bekanntlich gilt: $2^0 = 1$
$2^1 = 2$
$2^2 = 4$
$2^3 = 8$
$2^4 = 16$
$2^5 = 32$ usw.

Hat die dazustellende physikalische Größe beispielsweise acht unterschiedliche Zustände, werden zur Beschreibung die Zahlen 2^0, 2^1, 2^2 entsprechend miteinander kombiniert. Wird jeder Zahl eine Schaltvariable zugeordnet, ergibt sich für die acht Zustände die in Abb. 5.8 dargestellte Belegungstabelle.

Zustand (Dezimal-zahl)	x_2 $2^2 = 4$	x_1 $2^1 = 2$	x_0 $2^0 = 1$
0	0	0	0
1	0	0	L
2	0	L	0
3	0	L	L
4	L	0	0
5	L	0	L
6	L	L	0
7	L	L	L

Abb. 5.8

Danach kann die Dezimalzahl 5 durch die Binärzahl LOL ausgedrückt werden. Für die Dezimalzahl 105 lautet die Binärzahl LLOLOOL.

5.2.2. Logische Verknüpfungen

Und - Funktion (Konjunktion)

Entsprechend Abb. 5.9a soll ein Stellglied Y, dargestellt durch eine Relaisspule, dann erregt sein, wenn die beiden Variablen x_1 und x_0 "Ja - Entscheidung" haben, d.h. die Kontakte x_1 und x_0 geschlossen sind. Diese logische Aussage wird als Konjunktion bezeichnet. Sie ist nur dann wahr, wenn beide Eingangsvariablen wahr sind und wird erreicht durch die Reihenschaltung der Kontakte x_1 und x_0 vor die Relais-

spule Y.

Die schaltalgebraische Darstellung der Konjunktion lautet:

$$Y = x_1 \wedge x_0 = x_1 x_0 \qquad (5.1)$$

und wird gelesen Y ist gleich x_1 und x_0. Die Leseweise x_1 als auch x_0 ist ebenfalls üblich. Das Rechenzeichen wird meist, wenn keine Verwechslung möglich ist, weggelassen. Abb. 5.9a zeigt auch die Wahrheitstabelle für die konjunktive Verknüpfung der Variablen x_1 und x_0. Man erkennt auch hier, daß das Resultat der Verknüpfung nur dann wahr ist, wenn beide Eingänge gleichzeitig wahr sind, d.h. beide Kontakte geschlossen sind. Da die Wahrheitstabelle die Schaltungsbelegung angibt, bezeichnet man sie auch als Schaltbelegungstabelle.

Oder - Funktion (Disjunktion)

Nach Abb. 5.9b soll ein Stellglied Y dann erregt werden, wenn eine der beiden Variablen x_1 oder x_0 "Ja - Entscheidung" liefert, d.h. entweder der Kontakt x_1 oder der Kontakt x_0 oder beide Kontakte gemeinsam geschlossen sind. Diese logische Aussage wird als Disjunktion bezeichnet. Sie ist wahr, wenn entweder x_1 oder x_0 oder beide gemeinsam wahr sind und ist falsch, wenn beide Variablen falsch, d.h. beide Kontakte x_1 und x_0 geöffnet sind. Dieses entspricht einer Oder - Verknüpfung im nicht ausschließenden Sinn. Die logische Verknüpfung wird dargestellt durch die schaltalgebraische Gleichung

$$Y = x_1 \vee x_0 \qquad (5.2)$$

und wird gelesen Y ist gleich x_1 oder x_0. Die Wahrheitstabelle für die disjunktive Verknüpfung der Variablen x_1 und x_0 ist in Abb. 5.9b ebenfalls angegeben. Man erkennt, wie schon gesagt wurde, daß das Resultat der Verknüpfung dann wahr ist, wenn entweder x_1 oder x_0 oder beide wahr sind. Sind mehr als zwei Eingangsvariable vorhanden, kann jede einzeln oder auch beliebige Kombinationen die "Ja - Entscheidung" herbeiführen.

Nicht - Funktion (Negation, Inversion, Umkehrung, Verneinung)

Das Stellglied Y soll erregt werden, wenn die Variable x falsch ist. Das entspricht der Steuerung des Stellgliedes mit einem in der Ruhestellung geschlossenem Kontakt, wie es in Abb. 5.9c dargestellt ist.

Die schaltalgebraische Darstellung der Negation lautet

$$Y = \bar{x} \tag{5.3}$$

und wird gelesen Y ist gleich x quer.
Die Gleichung bringt zum Ausdruck, daß Y dann wahr ist, wenn x falsch ist und umgekehrt, daß Y falsch ist, wenn x wahr ist. Das zeigt auch die Schaltbelegungstabelle.

Für die Negation gilt auch

$$x \neq \bar{x} \tag{5.4}$$

was man leicht beim Betrachten von Arbeits- und Ruhekontakten eines Relais oder Schalters erkennen kann.

Wird eine Variable doppelt negiert, wird die erste Negation durch die zweite aufgehoben und es gilt

$$x = \bar{\bar{x}} \tag{5.5}$$

Zu den sogenannten erweiterten logischen Verknüpfungen gehören Antivalenz, Äquivalenz und Implikation. Sie lassen sich durch Konjunktion, Disjunktion und Negation ausdrücken.

Antivalenz

Die Antivalenz ist eine Oder - Funktion im ausschließenden Sinn. Sie ist nur dann wahr, wenn beide Variablen voneinander verschiedene Werte haben.

Das Stellglied Y in Abb. 5.9d wird nur dann erregt, wenn z.B. die Variable x_1 eine "Nein - Entscheidung" und die Variable x_0 eine "Ja - Entscheidung" hat oder wenn x_1 eine "Ja - Entscheidung" und x_0 eine "Nein - Entscheidung" liefert. Das zeigt auch die Schaltbelegungstabelle.

Die schaltalgebraische Darstellung der Antivalenz lautet:

$$Y = x_1 \not\equiv x_0 = \bar{x}_1 x_0 \vee x_1 \bar{x}_0 \qquad (5.6)$$

Äquivalenz

Die Äquivalenz ist nur dann wahr, wenn beide Variablen gleiche Werte haben.

Das Stellglied Y in Abb. 5.9e wird nur dann erregt, wenn die Variablen x_1 und x_0 gemeinsam "Ja-Entscheidung" oder gemeinsam "Nein-Entscheidung" haben.

Die schaltalgebraische Darstellung der Äquivalenz ist

$$Y = x_1 \equiv x_0 = x_1 x_0 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_0 \qquad (5.7)$$

Implikation

Die Implikation ist nur dann falsch, wenn die erste Variable wahr und die zweite Variable falsch ist. Das Stellglied in Abb. 5.9f ist demzufolge nur dann nicht erregt, wenn $\bar{x}_1$ eine "Ja-Entscheidung" und x_0 eine "Nein-Entscheidung" hat.

Die schaltalgebraische Darstellung der Implikation ist

$$Y = x_1 \rightarrow x_0 = \bar{x}_1 \vee x_0 \qquad (5.8)$$

Aus den bisher erläuterten Regeln geht hervor, daß Konjunktion und Disjunktion völlig gleichberechtigte Rechenarten sind. Man gibt jedoch ganz willkürlich der Konjunktion den Vorzug. Dadurch lassen sich bei der Aufstellung von Schaltfunktionen oftmals Klammern einsparen, sodaß eine größere Übersichtlichkeit erreicht wird.

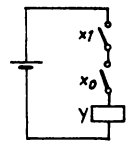
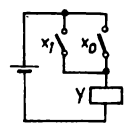
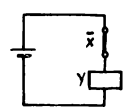
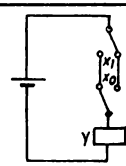
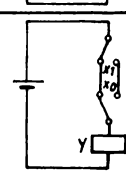
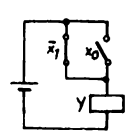
Bild Nr.	Gleichung	Kontakt-schaltung	Schaltbelegungs-tabelle	Funktions-bezeichnung
5.9a	(5.1) $y = x_1 x_0$		x_1 x_0 | y 0 0 | 0 0 L | 0 L 0 | 0 L L | L	Konjunktion
5.9b	(5.2) $y = x_1 \vee x_0$		x_1 x_0 | y 0 0 | 0 0 L | L L 0 | L L L | L	Disjunktion
5.9c	(5.3) $y = \bar{x}$		$\bar{x}$ | y 0 | L L | 0	Negation
5.9d	(5.6) $y = \bar{x}_1 x_0 \vee x_1 \bar{x}_0$		x_1 x_0 | y 0 0 | 0 0 L | L L 0 | L L L | 0	Antivalenz
5.9e	(5.7) $y = x_1 x_0 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_0$		x_1 x_0 | y 0 0 | L 0 L | 0 L 0 | 0 L L | L	Äquivalenz
5.9f	(5.8) $y = \bar{x}_1 \vee x_0$		$\bar{x}_1$ x_0 | y 0 0 | L 0 L | L L 0 | 0 L L | L	Implikation

Abb. 5.9 Darstellung der logischen Grundverknüpfungen

5.2.3. Gesetze

Vertauschungsgesetz (Kommutatives Gesetz)

Das kommutative Gesetz besagt, daß in einer Schaltanordnung mit gleichen Verknüpfungen (nur Undverknüpfungen bzw. nur Oderverknüpfungen) alle Schaltvariablen untereinander ausgetauscht werden können.

Beispiele für das Vertauschungsgesetz bei Und- und Oderverknüpfungen zeigen die Gleichungen 5.9 und 5.10 sowie die Abb. 5.10a und 5.10b.

$$x_1 x_0 = x_0 x_1 \tag{5.9}$$

$$x_1 \vee x_0 = x_0 \vee x_1 \tag{5.10}$$

Verbindungsgesetz (Assoziatives Gesetz)

Das assoziative Gesetz besagt, daß es bei einer Schaltanordnung mit gleichen Verknüpfungen gleichgültig ist, an welcher Stelle eine Klammer gesetzt wird.

Beispiele zeigen die Gleichungen 5.11 und 5.12 sowie die Abb. 5.10c und 5.10d.

$$x_2 x_1 x_0 = x_2(x_1 x_0) = x_1(x_2 x_0) = x_0(x_2 x_1) \tag{5.11}$$

$$x_2 \vee x_1 \vee x_0 = x_2 \vee (x_1 \vee x_0) = x_1 \vee (x_2 \vee x_0) = x_0 \vee (x_2 \vee x_1) \tag{5.12}$$

Verteilungsgesetz (Distributives Gesetz)

Das distributive Gesetz der Schaltalgebra besagt, daß eine Anzahl von gleichen Schaltvariablen, die in einer Schaltanordnung zu anderen Schaltvariablen in Reihen- oder Parallelschaltung liegen, durch eine einzige Schaltvariable in Reihen- oder Parallelschaltung ersetzt werden kann.

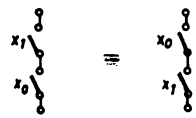
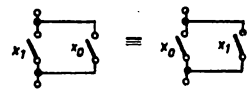
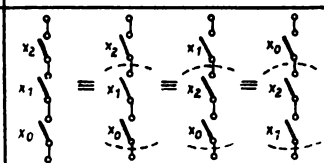
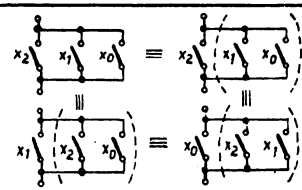
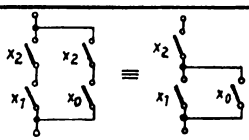
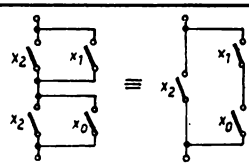
Bild Nr.	Gleichung	Kontaktschaltung
5.10 a	(5.9) $x_1 x_0 = x_0 x_1$	
5.10 b	(5.10) $x_1 \vee x_0 = x_0 \vee x_1$	
5.10 c	(5.11) $x_2 x_1 x_0 = x_2 (x_1 x_0) =$ $x_1 (x_2 x_0) = x_0 (x_2 x_1)$	
5.10 d	(5.12) $x_2 \vee x_1 \vee x_0 = x_2 \vee (x_1 \vee x_0) =$ $x_1 \vee (x_2 \vee x_0) = x_0 \vee (x_2 \vee x_1)$	
5.10 e	(5.13) $x_2 x_1 \vee x_2 x_0 = x_2 (x_1 \vee x_0)$	
5.10 f	(5.14) $(x_2 \vee x_1)(x_2 \vee x_0) =$ $x_2 \vee x_1 x_0$	

Abb. 5.10 Darstellung der Rechengesetze

Beispiele zeigen die Gleichungen 5.13 und 5.14 sowie die Abb. 5.10e und 5.10f.

$$x_2x_1 \vee x_2x_0 = x_2(x_1 \vee x_0) \tag{5.13}$$

$$(x_2 \vee x_1)(x_2 \vee x_0) = x_2 \vee x_1x_0 \tag{5.14}$$

Umkehrungsgesetz (Inversionsgesetz)

Unter Punkt 5.2.2. wurde bereits die Inversion einer Schaltvariablen behandelt. Genauso wie einzelne Schaltvariable in ihrer Inversion auftreten, können auch ganze logische Funktionen invertiert erscheinen.

Die Umkehrung einer logischen Funktion bildet man durch Verwandlung von Konkunktionen in Disjunktionen, Disjunktionen in Konjunktionen, unnegierten Variablen in negierte und negierten Variablen in unnegierte.

Wird dieses auf Kontaktschaltungen angewendet, werden aus Reihenschaltungen Parallelschaltungen, aus Parallelschaltungen Reihenschaltungen, aus Arbeitskontakten Ruhekontakte und aus Ruhekontakten Arbeitskontakte.

Die Kennzeichnung der Inversion einer logischen Funktion geschieht durch einen Querstrich über der gesamten invertierten Funktion.

Es gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

$$Y = x_1x_0$$

$$\bar{Y} = \overline{x_1x_0} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_0 \tag{5.15}$$

$$Y = x_1 \vee x_0$$

$$\bar{Y} = \overline{x_1 \vee x_0} = \bar{x}_1\bar{x}_0 \tag{5.16}$$

$$Y = \overline{x_1x_0}$$

$$\bar{Y} = \overline{\overline{x_1x_0}} = \overline{\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0} \tag{5.17}$$

$$Y = \overline{x_1 \vee x_0}$$

$$\bar{Y} = \overline{\overline{x_1 \vee x_0}} = \overline{x_1}\overline{x}_0 \qquad (5.18)$$

Neben dem rechnerischen Inversionsverfahren besteht auch noch ein sehr einfach zu handhabendes graphisches Verfahren. Dieses eignet sich sehr gut zur Aufstellung der Umkehrfunktion bei komplizierten Schaltungen. Ausgangspunkt für eine graphische Inversion ist die gezeichnete Schaltfunktion. Infolge der Umwandlung von Parallelschaltungen in Reihenschaltungen und umgekehrt kann man sich die inversen Strompfade senkrecht auf den gegebenen stehend denken. Alle ursprünglich durch waagerechte Linien verbundenen Kontakte werden durch senkrecht verlaufende gestrichelte Linien verbunden, ohne daß weitere Strompfade gekreuzt werden. Alle in eine geschlossene Stromschleife eintretenden Linien werden miteinander verbunden und man erhält die Struktur des invertierten Netzwerkes. Nachdem noch sämtliche Schaltvariablen negiert sind, ist die invertierte Schaltung gefunden.

In den folgenden Beispielen wird die Inversion erläutert.

Beispiel 1:

Die Schaltung nach Abb. 5.11 soll invertiert werden. Zur Vereinfachung wurden für die Variablen keine Kontakte gezeichnet, sondern nur die Bezeichnungen in die Strompfade eingeschrieben. Von dieser Schaltungsdarstellung wird im folgenden öfter Gebrauch gemacht.

Für die rechnerische Umkehrung wird aus Abb. 5.11 die Schaltfunktion abgelesen:

$$Y_{1/2} = x_3 x_2 x_0 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_0$$

Daraus ergibt sich die Umkehrfunktion zu:

$$\overline{Y_{1/2}} = Y_{3/4} = \overline{x_3 x_2 x_0 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_0}$$

Zuerst wird die Oder-Funktion nach 5.16 beseitigt

$$Y_{3/4} = (\overline{x_3 x_2 x_0})(\bar{\bar{x}}_1 \bar{\bar{x}}_0)$$

Die weitere Umformung der Klammerausdrücke erfolgt nach 5.15 bzw. nach 5.18

$$Y_{3/4} = (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_0)\overline{\overline{(x_1 \vee x_0)}}$$

Die doppelte Negation der zweiten Klammer kann nach 5.5 entfallen und es ergibt sich als Ergebnis:

$$Y_{3/4} = (\bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_0)(x_1 \vee x_0)$$

Nun zur graphischen Umkehrung:

Abb. 5.12 zeigt noch einmal die Ausgangsschaltung, jedoch ergänzt mit den gestrichelten Linien des invertierten Netzwerkes. Diese stehen senkrecht auf den Linien des Ausgangsnetzwerkes. Es ist zu erkennen, daß die invertierten Strompfade dort enden, wo sie auf einen der ursprünglichen Strompfade aufstoßen, außerdem sie kreuzen einen Schaltkontakt. In Abb. 5.13 wurden die inversen Strompfade ausgezogen gezeichnet und die Kontakte in ihrer Negation eingetragen. Die so ermittelte Schaltung stimmt mit der berechneten genau überein. Die graphische Umformung ist jedoch bedeutend einfacher als die rechnerische.

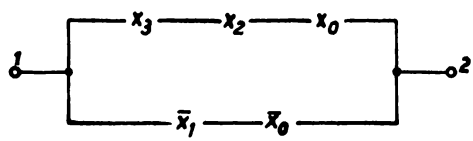


Abb. 5.11

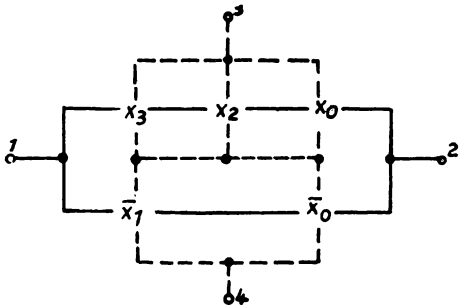


Abb. 5.12

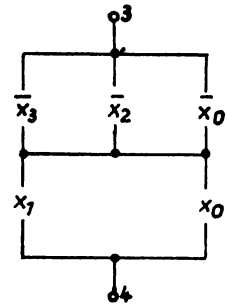


Abb. 5.13

Beispiel 2:

Es ist die in Abb. 5.14 dargestellte Schaltung zu invertieren. Für die rechnerische Invertierung wird die Schaltgleichung aus Abb. 5.14 abgelesen:

$$Y_{1/2} = x_4(x_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_1) \vee x_1(\bar{x}_4x_3 \vee x_2\bar{x}_0)$$

Die zugehörige Umkehrfunktion lautet:

$$\overline{Y_{1/2}} = Y_{3/4} = \overline{x_4(x_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_1) \vee x_1(\bar{x}_4x_3 \vee x_2\bar{x}_0)}$$

Zuerst wird wieder die Oder-Funktion nach 5.16 beseitigt

$$Y_{3/4} = \left[\overline{x_4(x_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_1)}\right] \left[\overline{x_1(\bar{x}_4x_3 \vee x_2\bar{x}_0)}\right]$$

Die Umformung der eckigen Klammern erfolgt nach 5.15

$$Y_{3/4} = \left[\bar{x}_4 \vee (\overline{x_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_1})\right]\left[\bar{x}_1 \vee (\overline{\bar{x}_4x_3 \vee x_2\bar{x}_0})\right]$$

Umformung der runden Klammern nach 5.16

$$Y_{3/4} = (\bar{x}_4 \vee \bar{x}_0\,\overline{\bar{x}_3\bar{x}_1})(x_1 \vee \overline{\bar{x}_4x_3}\;\overline{x_2\bar{x}_0})$$

Die Umformung der Und-Funktion liefert das Ergebnis:

$$Y_{3/4} = \bar{x}_4 \vee \bar{x}_0(x_3 \vee x_1)\;\; \bar{x}_1 \vee (x_4 \vee \bar{x}_3)(\bar{x}_2 \vee x_0)$$

Die Abb. 5.15 zeigt wiederum die Ausgangsschaltung ergänzt durch die gestrichelt gezeichneten Linien des invertierten

Netzwerkes. Die graphisch invertierte Schaltung ist in Abb. 5.16 gezeichnet. Der Vergleich zeigt wiederum die Übereinstimmung mit der errechneten Lösung.

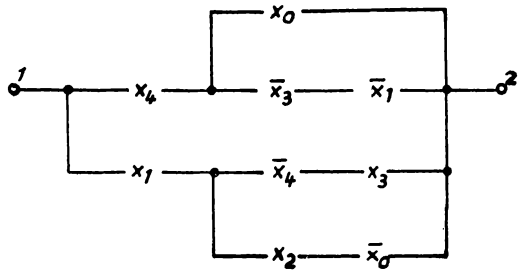


Abb. 5.14

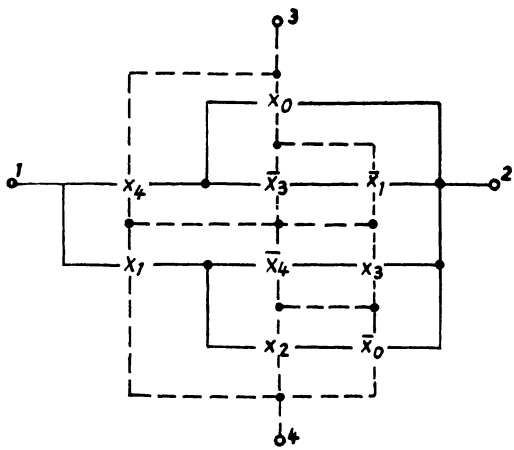


Abb. 5.15

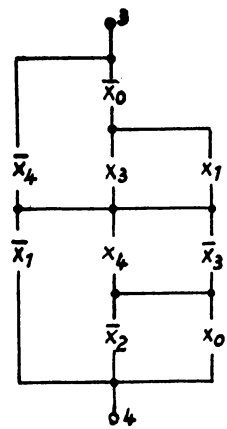


Abb. 5.16

Auch in diesem Beispiel erfolgte die graphische Umformung viel schneller und einfacher, als die rechnerische. Der Unterschied wird umso größer, je komplizierter die Schaltungen sind.

5.2.4. Rechenregeln

Eine Reihen- oder Parallelschaltung von beliebig vielen gleichen Variablen kann durch eine dieser Variablen ersetzt werden. (Gleichungen 5.19 und 5.20, Abb. 5.17a und 5.17b)

$$xx = x \tag{5.19}$$

$$x \vee x = x \tag{5.20}$$

Zwei in Reihe oder parallel geschaltete, dauernd unterbrochene Strompfade entsprechen einem dauernd geöffneten Strompfad. (Gleichungen 5.21 und 5.22, Abb. 5.17c und 5.17d)

$$00 = 0 \tag{5.21}$$

$$0 \vee 0 = 0 \tag{5.22}$$

Zwei in Reihe oder parallel geschaltete dauernd geschlossene Strompfade entsprechen einem dauernd geschlossenem Strompfad. (Gleichungen 5.23 und 5.24, Abb. 5.17e und 5.17f)

$$LL = L \tag{5.23}$$

$$L \vee L = L \tag{5.24}$$

Die Reihenschaltung einer Variablen mit einem dauernd geöffnetem Strompfad entspricht einem dauernd geöffneten Strompfad. (Gleichung 5.25, Abb. 5.17g)

$$x0 = 0 \tag{5.25}$$

Die Reihenschaltung einer Variablen mit einem dauernd geschlossenem Strompfad entspricht der Variablen allein. (Gleichung 5.26, Abb. 5.17h)

$$xL = x \tag{5.26}$$

Die Parallelschaltung einer Variablen mit einem dauernd geöffneten Strompfad entspricht der Variablen allein. (Gleichung 5.27, Abb. 5.17i)

$$x \vee 0 = x \tag{5.27}$$

Die Parallelschaltung einer Variablen mit einem dauernd geschlossenem Strompfad entspricht einem dauernd geschlossenem Strompfad.

(Gleichung 5.28, Abb. 5.17k)

$$x \vee L = L \tag{5.28}$$

Die Reihenschaltung einer Variablen mit der Negation dieser Variablen entspricht einem dauernd geöffnetem Stromkreis.
(Gleichung 5.29, Abb. 5.17l)

$$x\bar{x} = x \tag{5.29}$$

Die Parallelschaltung einer Variablen mit der Negation dieser Variablen entspricht einem dauernd geschlossenem Strompfad.
(Gleichung 5.30, Abb. 5.17m)

$$x \vee \bar{x} = x \tag{5.30}$$

Durch die Anwendung dieser einfachen Rechenregeln lassen sich wichtige Regeln für die Umformung von Schaltanordnungen ableiten. Einerseits können diese zur Vereinfachung von gegebenen Schaltungen benutzt werden, anderseits kann oftmals durch Zufügen von 0 oder L ergebenden Strompfasen eine günstige Ausgangsform für die Anwendung bestimmter Rechenregeln erreicht werden.

Die Parallelschaltung einer Variablen mit einer Reihenschaltung aus dieser Variablen und einer weiteren Variablen entspricht dieser Variablen allein.
(Gleichung 5.31, Abb. 5.17n)

$$x_1 \vee x_1 x_0 = x_1 \tag{5.31}$$

Beweis:

Gleichung 5.31 wird durch Einsetzen von 5.26 umgeformt zu

$$x_1 L \vee x_1 x_0 = x_1$$

Umformung nach 5.13 ergibt:

$$x_1(L \vee x_0) = x_1$$

Anwendung von 5.28

$$x_1 L = x_1$$

Nach 5.26 ergibt sich der gesuchte Beweis

$$x_1 = x_1$$
$$=======$$

Die Reihenschaltung einer Variablen mit einer Parallelschaltung aus dieser Variablen und einer anderen Variablen entspricht der Variablen allein.
(Gleichung 5.32, Abb. 5.17p)

$$x_1(x_1 \vee x_o) = x_1 \qquad (5.32)$$

Beweis:

Durch Anwendung von 5.13 geht Gleichung 5.32 über in:

$$x_1x_1 \vee x_1x_o = x_1$$

Nach 5.18 und 5.26 kann auch geschrieben werden

$$x_1L \vee x_1x_o = x_1$$

Die weitere Beweisführung ist analog der bereits durchgeführten:

$$x_1(L \vee x_o) = x_1$$
$$x_1L = x_1$$
$$x_1 = x_1$$
$$=========$$

Die Parallelschaltung einer Variablen mit einer Reihenschaltung aus der Negation dieser Variablen und einer anderen Variablen ist gleichwertig der Parallelschaltung der beiden Variablen.
(Gleichung 5.33, Abb. 5.17q)

$$x_1 \vee \bar{x}_1x_o = x_1 \vee x^o \qquad (5.33)$$

Beweis:

Nach 5.17 kann geschrieben werden:

$$(x_1 \vee \bar{x}_1)(x_1 \vee x_o) = x_1 \vee x_o$$

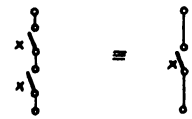
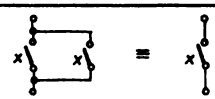
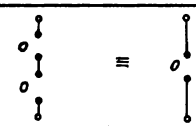
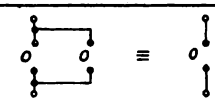
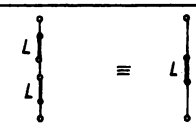
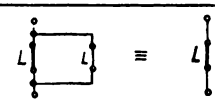
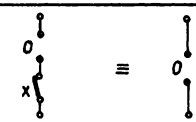
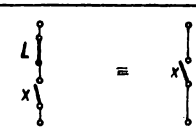
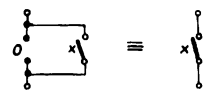
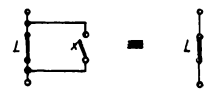
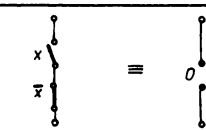
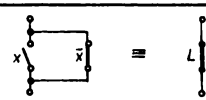
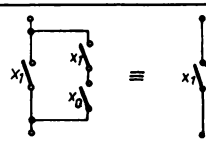
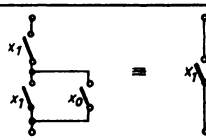
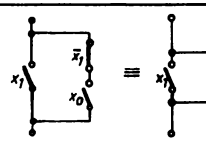
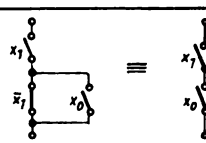
Bild Nr.	Gleichung	Kontaktschaltung
5.17a	(5.19) $x \; x = x$	
5.17b	(5.20) $x \vee x = x$	
5.17c	(5.21) $0 \; 0 = 0$	
5.17d	(5.22) $0 \vee 0 = 0$	
5.17e	(5.23) $L \; L = L$	
5.17f	(5.24) $L \vee L = L$	
5.17g	(5.25) $0 \; x = 0$	
5.17h	(5.26) $L \; x = x$	

Abb. 5.17 Darstellung der Rechenregeln

5.17i	(5.27) $0 \vee x = x$	
5.17k	(5.28) $L \vee x = L$	
5.17l	(5.29) $x \bar{x} = 0$	
5.17m	(5.30) $x \vee \bar{x} = x$	
5.17n	(5.31) $x_1 \vee x_1 x_0 = x_1$	
5.17p	(5.32) $x_1 (x_1 \vee x_0) = x_1$	
5.17q	(5.33) $x_1 \vee \bar{x}_1 x_0 = x_1 \vee x_0$	
5.17r	(5.34) $x_1 (\bar{x}_1 \vee x_0) = x_1 x_0$	

Umformung nach 5.30 ergibt:

$$L(x_1 \vee x_0) = x_1 \vee x_0$$

$$x_1 \vee x_0 = x_1 \vee x_0$$

Die Reihenschaltung einer Variablen mit einer Parallelschaltung aus der Negation dieser Variablen und einer anderen Variablen ist gleichwertig mit der Parallelschaltung der beiden Variablen. (Gleichung 5.34, Abb. 5.17r)

$$x_1(\bar{x}_1 \vee x_0) = x_1 x_0 \qquad (5.34)$$

Beweis:

Nach 5.13 gilt:

$$x_1\bar{x}_1 \vee x_1 x_0 = x_1 x_0$$

Der erste Ausdruck ergibt nach 5.29 0 und kann nach 5.27 entfallen.

$$x_1 x_0 = x_1 x_0$$

Beispiel 3

Für die in Abb. 5.18 dargestellte Kontaktschaltung sind zu bestimmen:

1. Schaltfunktion
2. vereinfachte Schaltfunktion
3. vereinfachte Kontaktschaltung

zu 1. Die Schaltung in Abb. 5.18 besteht aus drei parallelen Zweigen mit je zwei in Reihe geschalteten Kontakten. Die Schaltfunktion muß demzufolge aus einer dreifachen Oder-Funktion bestehen wobei jedes Funktionsteil eine Und-Funktion von zwei Variablen darstellt. Die Schaltfunktion lautet:

$$Y = x_2 x_1 \vee x_2\bar{x}_0 \vee x_1 x_0$$

zu 2. Zuerst wird der Ausdruck x_2x_1 mit $x_0 \vee \bar{x}_0$ konjunktiv verknüpft zu $x_2x_1(x_0 \vee \bar{x}_0)$. Dadurch ändert sich die Schaltfunktion nicht, da nach 5.30 $x_0 \vee \bar{x}_0 = L$ und nach 5.26 $x_2x_1L = x_2x_1$ ist. Die Beseitigung der Klammer ergibt $x_2x_1x_0 \vee x_2x_1x_0$, sodaß für die gesamte zu vereinfachende Schaltfunktion geschrieben werden kann:

$Y = x_2x_1x_0 \vee x_2x_1\bar{x}_0 \vee x_2\bar{x}_0 \vee x_1x_0$ Zusammenfassung nach 5.13

$Y = x_0(x_2x_1 \vee x_1) \vee \bar{x}_0(x_2x_1 \vee x_2)$ Nochmals Anwendung von 5.13

$Y = x_0\left[x_1(x_2 \vee L)\right] \vee \bar{x}_0\left[x_2(x_1 \vee L)\right]$ Nach 5.28 ergeben die runden Klammern L

$Y = x_0x_1L \vee \bar{x}_0x_2L$ Anwendung von 5.26 ergibt die Lösung

$Y = x_1x_0 \vee x_2\bar{x}_0$

==========

zu 3. Die vereinfachte Kontaktschaltung zeigt Abb. 5.19. Sie muß entsprechend der gefundenen Schaltfunktion aus einer Parallelschaltung von je zwei in Reihe geschalteten Variablen (Kontakten) bestehen.

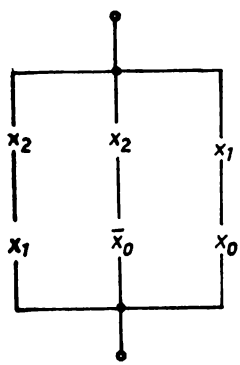


Abb. 5.18

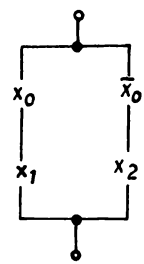


Abb. 5.19

Beispiel 4:

Für die Schaltung in Abb. 5.20 ist zu bestimmen:

1. Schaltfunktion
2. vereinfachte Schaltfunktion
3. vereinfachte Kontaktschaltung

zu 1. Die Schaltfunktion lautet:

$$Y = (x_2 \vee x_1)(x_2 \vee \bar{x}_0)(x_1 \vee x_0)$$

zu 2. Zuerst wird die zweite und die dritte Klammer zusammengefaßt zu: $x_2x_1 \vee x_1\bar{x}_0 \vee x_2x_0 \vee \bar{x}_0x_0$. Hierin ist nach 5.29 der letzte Ausdruck 0 und kann für die Zusammenfassung mit der ersten Klammer entfallen. Diese ergibt:

$$Y = x_2x_1 \vee x_2x_1\bar{x}_0 \vee x_2x_0 \vee x_2x_1 \vee x_1\bar{x}_0 \vee x_2x_1x_0$$

In dieser Gleichung kann nach 5.20 x_2x_1 einmal entfallen. Durch die Anwendung des Verteilungsgesetzes erhält man:

$Y = \bar{x}_0(x_1 \vee x_2x_1) \vee x_2(x_1x_0 \vee x_1 \vee x_0)$ Nun Anwendung von 5.13

$Y = \bar{x}_0 \left[x_1(L \vee x_2)\right] \vee x_2 \left[x_1 \vee x_0(L \vee x_1)\right]$ Die runden Klammern ergeben L

$Y = \bar{x}_0x_1L \vee x_2(x_1 \vee x_0L)$ Anwendung von 5.26

$Y = x_1\bar{x}_0 \vee x_2x_1 \vee x_2x_0$ Nach 5.29 kann $\bar{x}_0x_0$ zugefügt werden, ohne daß sich die Gleichung ändert.

$Y = x_1\bar{x}_0 \vee x_2x_1 \vee x_2x_0 \vee \bar{x}_0x_0$ Zusammenfassung nach 5.13

$Y = \bar{x}_0(x_1 \vee x_0) \vee x_2(x_1 \vee x_0)$ Nochmals Anwendung von 5.13 ergibt die Lösung

$$Y = (\bar{x}_0 \vee x_2)(x_1 \vee x_0)$$

zu 3. Die vereinfachte Kontaktschaltung zeigt Abb. 5.21

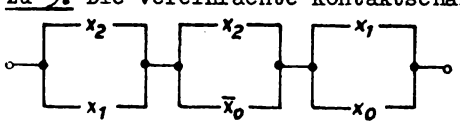


Abb. 5.20

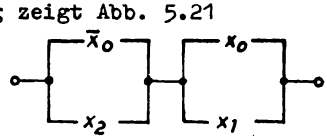


Abb. 5.21

5.2.5. Begriffe

Fundamentalterm

Als Fundamentalterme bezeichnet man elementare Ausdrücke, aus denen sich logische Schaltfunktionen zusammensetzen. Die Variablen in einem Fundamentalterm können beliebig miteinander verknüpft sein; es darf unter ihnen keine Möglichkeit zur Vereinfachung mehr bestehen.

Die Ausdrücke

$$x_0,\ \bar{x}_1,\ x_2,\ \bar{x}_2x_1,\ x_3 \vee x_2,\ x_4x_2x_0$$

sind z.B. Fundamentalterme.

Um die Fundamentalterme und die Schaltfunktionen gut übersehen zu können, werden ihre Variablen immer mit fallenden Indices aufgeschrieben. Es ergibt sich demnach die Reihenfolge:

$$x_n,\ x_{n-1},\ x_{n-2},\cdots\ x_2,\ x_1,\ x_0$$

Dazu ist noch zu ergänzen, daß, wenn in zwei Fundamentaltermen einer Schaltfunktion eine Variable in dem einen in negierter Form und in dem anderen in unnegierter Form auftritt, der Term mit der negierten Variablen zuerst geschrieben wird. Es steht

$$\bar{x}_2x_1 \text{ vor } x_2x_0 \text{ und } \bar{x}_4 \vee x_3 \vee \bar{x}_2 \text{ vor } x_4 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_1$$

Elementarkonjunktion

Sind in einem Fundamentalterm alle in der Schaltfunktion vorkommenden Variablen $x_n, x_{n-1},\cdots x_1, x_0$ konjunktiv verbunden, spricht man von einer Elementar- oder Vollkonjunktion. Es ist dabei gleichgültig, ob die Variablen in der negierten oder unnegierten Form auftreten; wichtig ist nur, daß sie vollständig vorhanden sind.

Besteht eine Schaltfunktion aus den Variablen x_3, x_2, x_1, x_0, kann die Elementarkonkunktion beispielsweise $x_3\bar{x}_2x_1x_0$ lauten.

Auch $\bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$ ist eine Elementarkonjunktion der genannten Schaltfunktion, da alle Variablen auftreten und es wie gesagt ohne Bedeutung ist, ob sie negiert oder unnegiert vorhanden sind.

Setzt man für die Variablen der Elementarkonjunktion die Werte O bzw. L ein, erhält man eine Dualzahl. Beim Einsetzen der Werte ist die festgelegte Ordnung streng einzuhalten, da sich sonst die Reihenfolge der O bzw. L Werte und damit auch der Gesamtwert der Elementarkonjunktion ändert. Wie allgemein üblich, ist für die negierten Variablen der Wert O und für die unnegierten Variablen der Wert L einzusetzen. Für die oben angegebene erste Elementarkonjunktion $x_3\bar{x}_2x_1x_0$ ergibt sich die Dualzahl LOLL, für die zweite Möglichkeit $\bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$ heißt die Dualzahl OOLL. Wie man sieht, entsteht für jede unterschiedliche Kombination negierter und unnegierter Variabler $x_3x_2x_1x_0$ eine andere Dualzahl. Die Dualzahl kann demzufolge zur Kennzeichnung der zugehörigen Elementarkonjunktion verwendet werden. Formt man die Dualzahl in eine entsprechende Dezimalzahl um, erhält man kürzere Zahlen zur Charakterisierung der Elementarkonjunktion. Es ist dann aber notwendig, die Anzahl der Variablen gesondert anzugeben. Dieses geschieht in der Form einer Hochzahl,

Es ergibt sich:

$$x_3\bar{x}_2x_1x_0 = \text{LOLL} = k_{11}^4 \qquad \text{bzw.}$$

$$\bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0 = \text{OOLL} = k_3^4$$

Elementardisjunktion

Von einer Elementardisjunktion spricht man analog zur Elementarkonjunktion, wenn in einem Fundamentalterm alle in der Schaltfunktion enthaltenen Variablen negiert oder unnegiert disjunktiv verknüpft vorkommen.

Die Elementardisjunktion wird auch als Volldisjunktion bezeichnet. Ihre Darstellung ist analog zu der der Elementarkonjunktion. Für die Schaltfunktion mit den Variablen x_3, x_2, x_1, x_0

ergibt sich nun beispielsweise:

$$x_3 \vee \bar{x}_2 \vee x_1 \vee x_0 = \text{LOLL} = d_{11}^4$$

$$\bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \vee x_1 \vee x_0 = \text{OOLL} = d_3^4$$

Normalform

Jede schaltalgebraische Funktion kann auf zwei Normalformen gebracht werden, die konjunktive Normalform und die disjunktive Normalform. Die konjunktive Normalform besteht aus einer Konjunktion von disjunktiv verbundenen Variablenkombinationen. In den disjunktiv verbundenen Variablenkombinationen müssen hierbei nicht alle zur Schaltfunktion gehörenden Variablen enthalten sein.

Die disjunktive Normalform besteht analog zur konjunktiven aus einer Disjunktion von konjunktiv verbundenen Variablenkombinationen, wobei wiederum nicht alle zur Schaltfunktion gehörenden Variablen vorkommen müssen.

Eine Normalform besteht also nur aus Fundamentaltermen oder aus Fundamentaltemen und Elementarkonjunktionen und -disjunktionen. Ein Beispiel für eine konjunktive Normalform ist in Abb. 5.22 und ein Beispiel für eine disjunktive Normalform in Abb. 5.23 angegeben

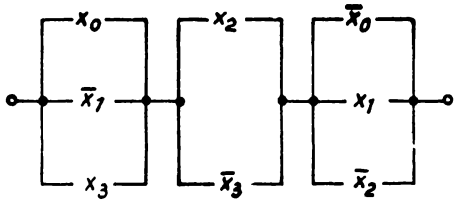


Abb. 5.22

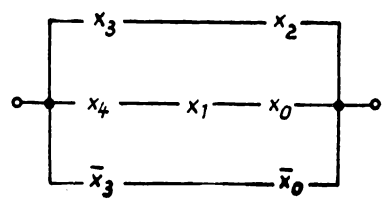


Abb. 5.23

Kanonische Normalform

Einen Grenzfall der Normalform bildet die kanonische Normalform. In ihr sind nicht nur Fundamentalterme, sondern immer Elementarkonjunktionen bzw. -disjunktionen vorhanden. Besteht

Eine disjunktive Normalform nur aus Elementarkonjunktionen, wird diese als kanonische disjunktive Normalform bezeichnet. Dementsprechend besteht eine kanonische konjunktive Normalform aus konjunktiv verknüpften Elementardisjunktionen.

Eine Schaltfunktion kann viele Normalformen, aber immer nur eine kanonische Normalform haben. Die kanonische Normalform kann durch Erweiterung der Normalform gebildet werden.

Gegeben sei die disjunktive Normalform

$$Y = \bar{x}_2 x_1 \bar{x}_0 \vee x_2 \bar{x}_1$$

die durch Erweiterung mit $x_0 \vee \bar{x}_0$ auf die kanonische disjunktive Normalform gebracht wird.

$$Y = \bar{x}_2 x_1 \bar{x}_0 \vee x_2 \bar{x}_1 (\bar{x}_0 \vee x_0)$$

$$Y = \bar{x}_2 x_1 \bar{x}_0 \vee x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_0 \vee x_2 \bar{x}_1 x_0$$

Genauso, wie man Elementarkonjunktionen und -disjunktionen durch Angabe von Dezimal- oder Dualzahlen beschreiben kann, ist das auch für ganze Schaltfunktionen möglich. Die Zahlen erscheinen für jede Elementarkonjunktion bzw. -disjunktion als Hochzahl zur Angabe der Variablenzahl und als Tiefzahl zur Charakterisierung der Funktion. Zur Ermittlung der Tiefzahl werden alle zur Schaltfunktion gehörenden Elementarkonjunktionen bzw. -disjunktionen nach fallenden Indices geordnet und vorhandene Variable mit L und nicht vorhandene mit O bezeichnet. Daraus entsteht die Dualzahl, die wiederum in eine gleichwertige Dezimalzahl umgewandelt werden kann.

Es wurde die bereits nach fallenden Indices geordnete Schaltfunktion

$$Y = \bar{x}_2 x_1 \bar{x}_0 \vee x_2 \bar{x}_1 \bar{x}_0 \vee x_2 \bar{x}_1 x_0$$

erhalten. Bei Einführung der Dualzahlen geht diese über in:

$$Y \mathrel{\hat{=}} \text{OLO} \vee \text{LOO} \vee \text{LOL}$$

Werden die Dualzahlen durch Dezimalzahlen ersetzt, muß auch die Hochzahl mit angegeben werden. Es ist nun zu schreiben:

$$Y \hat{=} k_2^3 \vee k_4^3 \vee k_5^3$$

Da die Schaltfunktion eine kaninische Normalform darstellt, muß jede Elementarkonjunktion die gleiche Anzahl Variable haben, sodaß die Angabe der Hochzahl auch nur einmal bei Y zur Kennzeichnung der Schaltfunktion ausreicht. Es ist zu schreiben:

$$Y^3 \hat{=} k_2 \vee k_4 \vee k_5$$

5.2.6. Kürzungsverfahren

Es sind eine Reihe Kürzungsverfahren bekanntgeworden, die sich zur Vereinfachung von Schaltfunktionen eignen. Dazu ist jedoch zu bemerken, daß die Kürzungsverfahren bei Anwendung auf Schaltfunktionen mit mehr als vier Variablen umfangreich und recht schwer übersehbar werden. Es wird deshalb im Rahmen dieses Buches nur auf das einfachste dieser Verfahren eingegangen.

Alle Kürzungsverfahren dienen im Prinzip dazu, eine gegebene Schaltfunktion soweit zu vereinfachen, daß sie mit dem geringsten Aufwand an Kontakten realisiert werden kann. Sie dienen also zur Minimierung d.h. zur Aussonderung von redundanten (überflüssigen) Kontakten.

Kürzungsverfahren nach Karnaugh

Für Funktionen mit bis zu vier Variablen entwickelte Karnaugh ein graphisches Verfahren, welches es gestattet, das gekürzte Ergebnis sehr schnell und übersichtlich aus einem Diagramm zu erhalten. Grundlage für das Verfahren ist die Beziehung:

$$\bar{x}_1 x_0 \vee x_1 x_0 = x_0(\bar{x}_1 \vee x_1) = x_0$$

Durch mehrmalige schematische Anwendung derselben können die Schaltfunktion bis auf eine Minimalform vereinfacht werden. Die für eine kanonische Normalform mit vier Variablen bestehenden 16 Elementarkonjunktionen werden in einer Tafel (Abb. 5.24)

so angeordnet, daß sich zwei benachbarte Elementarkonjunktionen immer nur durch die Änderung einer Variablen unterscheiden. Das gilt auch für die Ränder der Tafel, denn werden linke und rechte oder obere und untere Seite der Tafel zusammengezogen betrachtet, ist wiederum nur die Änderung einer Variablen vorhanden. Die sich ändernde Variable ist bei der Zusammenlegung der linken und der rechten Seite x_1 und bei Zusammenlegung der oberen und der unteren Seite x_3. Diese treten jeweils einmal in der negierten und einmal in der unnegierten Form auf.

	$\bar{x}_1\bar{x}_0$	$\bar{x}_1 x_0$	$x_1 x_0$	$x_1\bar{x}_0$
$x_3\bar{x}_2$	k_8	k_9	k_{11}	k_{10}
$x_3 x_2$	k_{12}	k_{13}	k_{15}	k_{14}
$\bar{x}_3 x_2$	k_4	k_5	k_7	k_6
$\bar{x}_3\bar{x}_2$	k_0	k_1	k_3	k_2

Abb. 5.24 Karnaugh-Plan zur Vereinfachung von Schaltfunktionen mit vier Variablen

Für alle in der Schaltfunktion vorhandenen Elementarkonjunktionen wird in der Tafel an der zugehörigen Stelle der Wert L eingetragen. Die in der Schaltfunktion nicht vorhandenen Elementarkonjunktionen werden mit O bezeichnet. Ist eine Elementarkonjunktion nicht eindeutig definiert, d.h. die zugehörige Schaltbelegung ist für die Schaltfunktion gleichgültig, wird sie mit "g" in die Tabelle eingeschrieben. Jenachdem, wie sich die beste Kürzungsmöglichkeit für die Schaltfunktion ergibt, wird sie als O oder als L verwendet.

Die Bildung der Schaltfunktion erfolgt durch Bildung von möglichst wenig aber großen Blöcken, die alle in der Tafel eingetragenen L-Werte erfassen. Am zweckmäßigsten ist die Bildung

von Achterblöcken. Wo sie nicht möglich ist, müssen Vierer- oder nur Zweierblöcke gebildet werden. Die Bildung von Sechser- oder Dreierblöcken ist unzweckmäßig.

Zum besseren Verständnis des graphischen Kürzungsverfahrens werden nachstehend die für die Bildung von Zweier-, Vierer- und Achterblöcken geltenden Kürzungen rechnerisch durchgeführt.

Der in Abb. 5.25 dargestellte Zweierblock kann wie folgt rechnerisch vereinfacht werden:

$$Y = x_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee x_3 x_2 x_1 x_0$$

$$Y = x_3 x_2 x_0 (\bar{x}_1 \vee x_1)$$

$$Y = x_3 x_2 x_0$$

==========

Abb. 5.26 zeigt einen Viererblock. Die rechnerische Vereinfachung liefert das Ergebnis:

$$Y = \bar{x}_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee \bar{x}_3 x_2 x_1 x_0 \vee x_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee x_3 x_2 x_1 x_0$$

$$Y = x_2 x_0 (\bar{x}_3 \bar{x}_1 \vee \bar{x}_3 x_1 \vee x_3 \bar{x}_1 \vee x_3 x_1)$$

$$Y = x_2 x_0 \left[\bar{x}_3 (\bar{x}_1 \vee x_1) \vee x_3 (\bar{x}_1 \vee x_1) \right]$$

$$Y = x_2 x_0 (\bar{x}_3 \vee x_3)$$

$$Y = x_2 x_0$$

========

Für den in Abb. 5.27 gezeigten Achterblock ergibt die rechnerische Vereinfachung:

$$Y = \bar{x}_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 x_0 \vee \bar{x}_3 \bar{x}_2 x_1 x_0 \vee \bar{x}_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee \bar{x}_3 x_2 x_1 x_0 \vee x_3 \bar{x}_2 \bar{x}_1 x_0 \vee$$
$$x_3 \bar{x}_2 x_1 x_0 \vee x_3 x_2 \bar{x}_1 x_0 \vee x_3 x_2 x_1 x_0$$

$$Y = x_0 \left[\bar{x}_3 (\bar{x}_2 \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 x_1 \vee x_2 \bar{x}_1 \vee x_2 x_1) \vee x_3 (\bar{x}_2 \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 x_1 \vee \right.$$
$$\left. x_2 \bar{x}_1 \vee x_2 x_1) \right]$$

$$Y = x_0 \left[(\bar{x}_3 \vee x_3)(\bar{x}_2 \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 x_1 \vee x_2 \bar{x}_1 \vee x_2 x_1) \right]$$

$$Y = x_o \left[\bar{x}_2(\bar{x}_1 \vee x_1) \vee x_2(\bar{x}_1 \vee x_1) \right]$$

$$Y = x_o(\bar{x}_2 \vee x_2)$$

$$Y = x_o$$

======

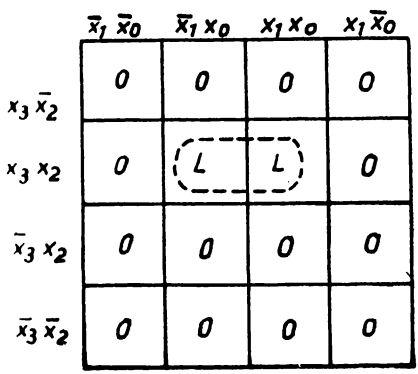


Abb. 5.25 Karnaugh-Plan mit Zweierblock

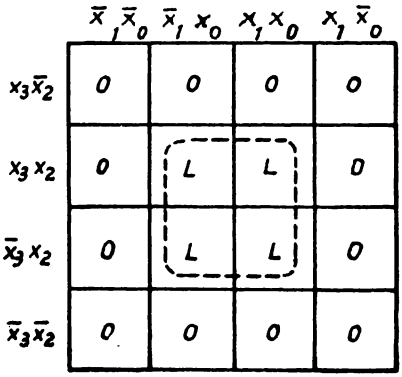


Abb. 5.26 Karnaugh-Plan mit Viererblock

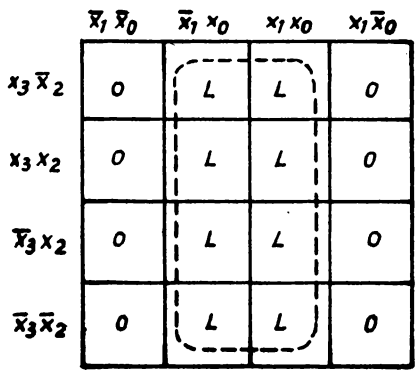


Abb. 5.27 Karnaugh-Plan mit Achterblock

Aus den drei durchgeführten Vereinfachungen ist zu erkennen, daß der Achterblock, wie schon vorausgesagt, die günstigste Kürzung ergibt. Es ist nur eine Variable übriggeblieben, während bei der Vereinfachung des Viererblockes zwei und beim Zweierblock drei Variable übrigbleiben.

Mit diesen Ergebnissen soll nun das Auslesen der gekürzten Elementarkonjunktionen aus dem Karnaugh-Plan veranschaulicht werden. Am oberen Rand des Planes in Abb. 5.25 stehen über dem Block die Terme $\bar{x}_1 x_0$ und $x_1 x_0$ als Teile der zu vereinfachenden Elementarkonjunktionen $x_3 x_2 \bar{x}_1 x_0$ und $x_3 x_2 x_1 x_0$. Nach den bekannten Gesetzmäßigkeiten ergibt $\bar{x}_1 \vee x_1 = L$, sodaß x_1 für die weiteren Betrachtungen entfallen kann, und am oberen Rand des Karnaugh-Planes nur die Variable x_0 erhalten bleibt, da $x_0 \vee x_0 = x_0$ ist. Am linken Rand des Planes stehen die Variablen $x_3 x_2$. Da keine Kürzungsmöglichkeit besteht, bleiben sie gemeinsam erhalten. Das Ergebnis wird durch die konjunktive Verknüpfung der am linken und oberen Rand verbliebenen Variablen gebildet. Es lautet:

$$Y = x_3 x_2 x_0$$

Bei der Betrachtung der Kürzung des Viererblockes nach Abb. 5.26 sind die Variablen x_1 am oberen und x_3 am linken Rand in negierter und unnegierter Form vorhanden und entfallen demzufolge für das gekürzte Ergebnis

$$Y = x_2 x_0$$

Beim Achterblock ergeben beide Variablen am linken Rand des Karnaugh-Planes L, sodaß für das Ergebnis nur übrigbleibt:

$$Y = x_0$$

Ein Vergleich mit den errechneten Ergebnissen zeigt die Übereinstimmung.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß sich die gekürzten Elementarkonjunktionen immer aus den Variablen zusammen-

setzen, die am linken und am oberen Rand des Karnaugh-Planes nicht gemeinsam in negierter und unnegierter Form vorkommen. Können in einem Karnaugh-Plan mehrere Blöcke gebildet werden, ergibt sich die Schaltfunktion als disjunktive Verknüpfung der gekürzten Elementarkonjunktionen, da in den Plan disjunktiv verbundene Elementarkonjunktionen eingetragen wurden.

Beispiel 5:

Gegeben ist die Schaltfunktion nach Abb. 5.28.

Es ist zu ermitteln:

1. Schaltfunktion
2. vereinfachte Schaltfunktion mittels
   2.1. Rechnung
   2.2. Anwendung des Kürzungsverfahrens nach Karnaugh
3. vereinfachte Kontaktschaltung

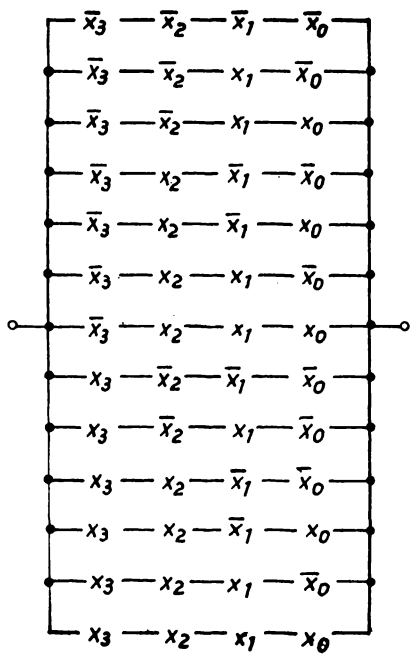


Abb. 5.28

zu 1. Die Schaltfunktion wird aus Abb. 5.28 abgelesen. Sie besteht aus 13 disjunktiv verbundenen Elementarkonjunktionen und ist in der ersten Zeile unter 2.1. aufgeführt.

zu 2.1.

$$Y = \bar{x}_3\bar{x}_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0 \vee \bar{x}_3x_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_2\bar{x}_1x_0 \vee$$
$$\bar{x}_3x_2x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_2x_1x_0 \vee x_3\bar{x}_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_3\bar{x}_2x_1\bar{x}_0 \vee x_3x_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee$$
$$x_3x_2\bar{x}_1x_0 \vee x_3x_2x_1\bar{x}_0 \vee x_3x_2x_1x_0$$

$$Y = x_2(\bar{x}_3\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_1x_0 \vee \bar{x}_3x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1x_0 \vee x_3\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_3\bar{x}_1x_0 \vee$$
$$x_3x_1\bar{x}_0 \vee x_3x_1x_0) \vee \bar{x}_2\bar{x}_0(\bar{x}_3\bar{x}_1 \vee \bar{x}_3x_1 \vee x_3\bar{x}_1 \vee x_3x_1) \vee$$
$$\bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$$

$$Y = x_2\left[\bar{x}_3(\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_1x_0 \vee x_1\bar{x}_0 \vee x_1x_0) \vee x_3(\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_1x_0 \vee\right.$$
$$\left.x_1\bar{x}_0 \vee x_1x_0)\right] \vee \bar{x}_2\bar{x}_0\left[\bar{x}_3(\bar{x}_1 \vee x_1) \vee x_3(\bar{x}_1 \vee x_1)\right] \vee$$
$$\bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$$

$$Y = x_2\left[(\bar{x}_3 \vee x_3)(\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_1x_0 \vee x_1\bar{x}_0 \vee x_1x_0)\right] \vee \bar{x}_2\bar{x}_0(\bar{x}_3 \vee x_3) \vee$$
$$\bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$$

$$Y = x_2\left[\bar{x}_1(\bar{x}_0 \vee x_0) \vee x_1(\bar{x}_0 \vee x_0)\right] \vee \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$$

$$Y = x_2(\bar{x}_1 \vee x_1) \vee \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$$

$$Y = x_2 \vee \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1x_0$$

$$Y = x_2 \vee \bar{x}_2(\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1x_0)$$

Durch zweimalige Anwendung von Gleichung 5.33 entsteht nacheinander:

$$Y = x_2 \vee \bar{x}_2(\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1)$$

$$Y = x_2 \vee (\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1)$$

$$Y = x_2 \vee \bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1$$

==========

Das Minimierungsproblem ist damit rechnerisch gelöst. Für die ursprünglich aus 52 Kontakten aufzubauende Schaltung werden nur noch 4 Kontakte benötigt.

Der Rechengang zeigt aber, daß zum Finden der Lösung sehr viel Übersicht erforderlich ist und ein beträchtlicher Rechenaufwand entsteht. Dagegen bringt die Anwendung des Kürzungsverfahrens nach Karnaugh die Lösung bei konsequenter Anwendung des Verfahrens viel schneller und sicherer.

zu 5.2. Die bereits ermittelte Schaltfunktion wird wie unter Punkt 5.2.5. beschrieben, umgeformt in:

$$Y' \hat{=} k_0 \vee k_2 \vee k_3 \vee k_4 \vee k_5 \vee k_6 \vee k_7 \vee k_8 \vee k_{10} \vee k_{12} \vee k_{13} \vee k_{14} \vee k_{15}$$

Die Elementarkonjunktionen dieser Schaltfunktion werden in die ihren Wertezahlen entsprechenden Felder des Karnaugh-Planes eingetragen.

Für die nicht vorhandenen Elementarkonjunktionen wird 0 eingeschrieben.

Zur Vereinfachung können die in Abb. 5.29 eingezeichneten Blöcke gebildet werden. Daraus ergibt sich die vereinfachte Schaltfunktion:

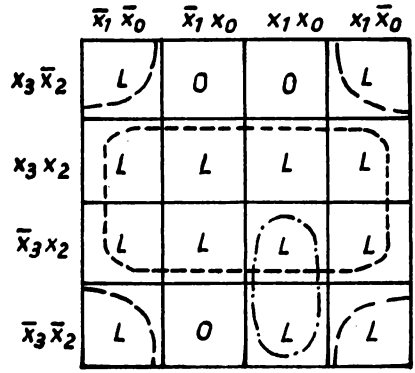


Abb. 5.29

Achterblock: $Y_1 = x_2$

Viererblock: $Y_2 = \bar{x}_2\bar{x}_0$

Zweierblock: $Y_3 = \bar{x}_3x_1x_0$

$$Y = Y_1 \vee Y_2 \vee Y_3 = x_2 \vee \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1x_0$$

Die vereinfachte Schaltfunktion lautet also:

$$Y = x_2 \vee \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_1x_0$$

Wie bereits rechnerisch nachgewiesen wurde, existiert noch eine bessere Lösung der Minimisierungsaufgabe. Bei der Erläuterung des Verfahrens nach Karnaugh wurde darauf hingewiesen, daß immer möglichst große Blöcke gebildet werden müssen, um die bestmögliche Lösung zu erhalten! Wird statt der Zusammenfassung in Abb. 5.29 die in Abb. 5.30 dargestellte gebildet, erhält man für die gekürzte Schaltfunktion:

1 . Achterblock: $Y_1 = x_2$

2 . Achterblock: $Y_2 = \bar{x}_0$

Viererblock: $Y_3 = \bar{x}_3 x_1$

$$Y = x_2 \vee \bar{x}_0 \vee \bar{x}_3 x_1$$

Dieses Ergebnis stimmt mit dem rechnerisch gewonnenen überein. Es wurde jedoch durch die konsequente Anwendung des Verfahrens nach Karnaugh bedeutend schneller und sicherer gefunden. Die Abb. 5.31 zeigt die Kontaktschaltung für die gefundene Lösung.

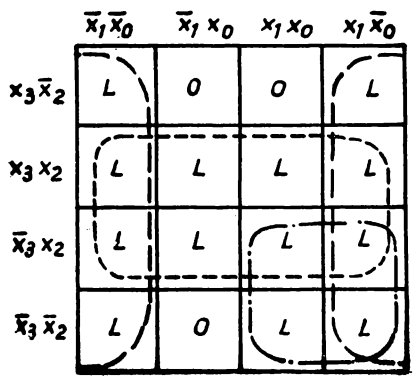


Abb. 5.30

Sollen Schaltfunktionen mit weniger als vier Variablen mit dem Verfahren nach Karnaugh vereinfacht werden, ist nur der untere Teil des in Abb. 5.24 angegebenen Planes zu verwenden. Die Vereinfachung von Schaltfunktionen mit fünf und sechs Variablen ist nach dem Prinzip des Karnaugh-Verfahrens ebenfalls möglich, jedoch müssen zur Lösung zwei bzw. vier Tafeln verwendet werden. Die Bildung der Blöcke ist dabei bedeutend schwieriger als bei der Verwendung von nur einer Tafel und wird hier nicht behandelt.

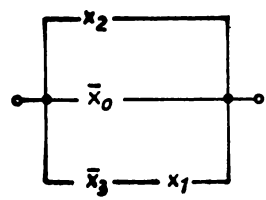


Abb. 5.31

5.3. Bauglieder für kontaktlose Steuerungen

Obwohl das Relais eine nahezu ideale Schaltcharakteristik hat, im Laufe der Zeit ständig verbessert wurde und infolge seines einfachen Aufbaues billig und für einen großen Teil der Steuerungen zuverlässig arbeitet, wird es dennoch seit einiger Zeit für bestimmte Anwendungsgebiete von kontaktlosen Schaltungen verdrängt. Die moderne Automatisierungstechnik erfordert z.B. große Schaltgeschwindigkeiten, hohe Schaltzahlen, geringen Raumbedarf u.a. Eigenschaften, denen bei Relais technische Grenzen gesetzt sind. Beispielsweise ist die Abnutzung der beweglichen Relaisteile unumgänglich; sie kann zwar eingeschränkt, aber nicht beseitigt werden. Weitere Nachteile der Kontaktschaltungen sind die relativ großen Ansprechzeiten, das Prellen der Kontakte und die Erschütterungsempfindlichkeit.

Einen Ausweg aus diesen Schwierigkeiten bilden die sogenannten kontaktlosen Steuerungen, die oft auch als logische Steuerungen bezeichnet werden.

Zum Aufbau von kontaktlosen Steuerungen eignen sich Elektronenröhren, Transistoren, Magnetverstärker, Rechteckferrite sowie pneumatische und hydraulische Bauelemente. Im Rahmen dieses Lehrbuches wird nur auf logische Schaltungen mit Transistoren und mit pneumatischen Bauelementen eingegangen. Vergleicht man mit diesen Bauelementen aufgebaute Steuerungen mit Relaissteuerungen, fällt sofort ein grundlegender Unterschied auf. Relais haben meist nur einen Eingang und entsprechend der Kontaktzahl mehrere Ausgänge, während logische Bauelemente mehrere Eingänge und nur einen Ausgang besitzen.

5.3.1. Bauglieder mit Halbleiterbauelementen

5.3.1.1. Allgemeines

Die hier zu besprechenden logischen Halbleiterschaltungen bauen sich alle auf der Verwendung von Halbleiterdioden und Transistoren als Schalter auf.

Ohne auf den Leitungsmechanismus der Halbleiterbauelemente näher einzugehen, müssen einige wichtige Vorbetrachtungen angestellt werden. Wie unter Punkt 5.1.1. beschrieben, hat ein Schaltkontakt von der Funktion her betrachtet exakt zwei Stellungen, die eingeschaltete und die ausgeschaltete. Beide Stellungen lösen sich in unendlich kurzer Zeit ab, wenn das Eingangssignal einen kritischen Wert über- oder unterschreitet. Das ist bei der Verwendung von Halbleiterbauelementen nicht so. Wird eine Diode in Durchlaßrichtung betrieben, kann aus der Kennlinie in Abb. 5.32 ein Widerstand $R_d \approx 20\Omega$ ermittelt werden. Beim Betrieb der Diode in Sperrichtung beträgt der Widerstand $R_{sp} \approx 250M\Omega$. Wird die Diode an eine veränderliche Spannung gelegt, ändert sich der Diodenwiderstand stetig mit dem Eingangssignal zwischen den beiden oben angegebenen Werten. Ein Sprung tritt nicht auf. Die Diode ist also kein unstetig, sondern ein stetig wirkendes Bauelement. Weiterhin ist zu bemerken, daß infolge des vorhandenen Diodenwiderstandes bei Stromdurchgang immer eine Spannung über der Diode abfällt. Das Ausgangssignal erreicht deshalb nie den Wert 0 Volt oder den der vollen Betriebsspannung.

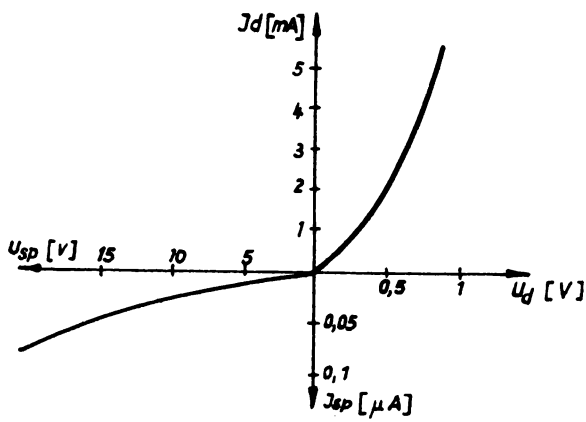


Abb. 5.32 Kennlinie einer Diode

Beim Transistor ergeben sich diesbezüglich ähnliche Verhältnisse. Das Kennlinienfeld eines Transistors in Emitterschaltung zeigt Abb. 5.33. Bei Steuerstrom $-I_B = 0$ liegt der Arbeitspunkt entsprechend der gezeichneten Widerstandsgeraden an der mit A_1 bezeichneten Stelle. Man sieht, daß die Ausgangsspannung des Transistors nicht gleich der angelegten Betriebsspannung ist, sondern eine Teilspannung über der Kollektor-Emitter-Strecke abfällt.

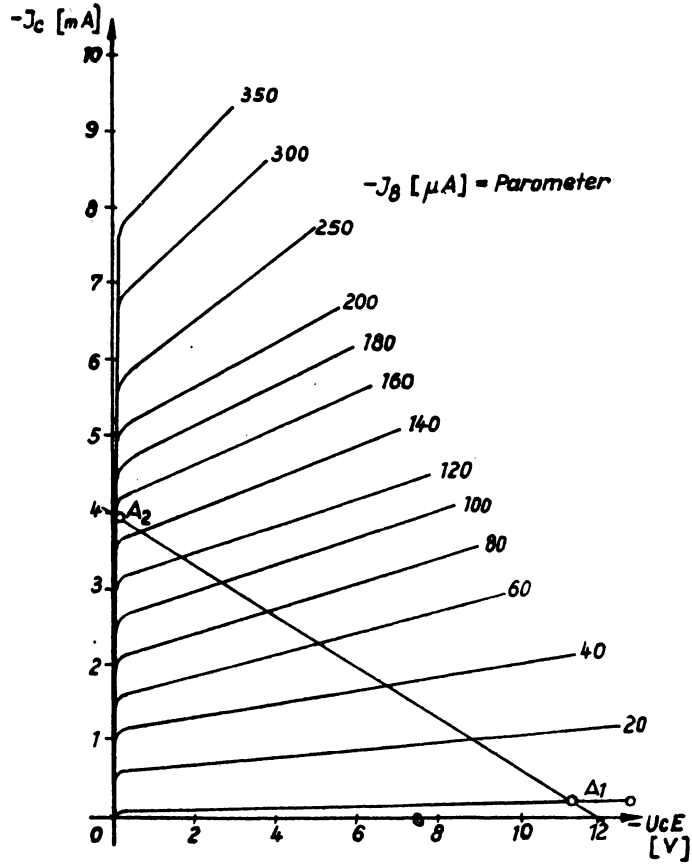


Abb. 5.33 Kennlinie eines pnp-Transistor in Emitterschaltung (A_1, A_2: Arbeitspunkte im Schalterbetrieb)

Erfolgt eine Ansteuerung des Transistors, wandert der Arbeitspunkt auf der Widerstandsgeraden bis zum Punkt A_2. Das ist der Schnittpunkt der Widerstandsgeraden mit dem zur Ansteuerung eingestellten Basisstrom. Man erkennt, daß das Ausgangssignal den Wert 0 Volt bei Belastung nicht erreichen kann, gleichgültig, ob der Basisstrom weiter erhöht wird oder nicht.

Außerdem ist ganz klar zu erkennen, daß sich das Ausgangssignal des Transistors stetig mit dem Eingangssignal ändert, da sein Arbeitspunkt in Abhängigkeit des Basisstromes auf der Widerstandsgeraden wandert. Der Transistor ist also ebenfalls ein stetig wirkendes Bauelement.

Aus dem bisher gesagten sind zwei wichtige Tatsachen zu erkennen. Erstens können Funktionsglieder mit Halbleiterbauelementen in binären Schaltungen nur dann einwandfrei arbeiten, wenn sie binäre Eingangssignale erhalten und zweitens muß für jedes Binärsignal ein Spannungsbereich festgelegt werden, in dem sich das Signal bewegen darf.

Wird eine Halbleitersteuerung in Verbindung mit kontaktbehafteten Eingangsgliedern betrieben, ist der erste Punkt erfüllt. Stehen jedoch als Eingangssignal stetige Größen zur Verfügung, müssen Schwellwertglieder eingesetzt werden. Diese haben die Aufgabe, eine stetige Eingangsgröße beim Über- bzw. Unterschreiten eines Schwellwertes in Binärsignale umzuwandeln. Bei den in Verbindung mit Halbleiterschaltungen arbeitenden Schwellwertgliedern sind deren Ausgangsgrößen stets im 0- bzw. L-Signalbereich liegende elektrische Spannungen, während als Eingangswerte prinzipiell alle physikalischen Größen auftreten können.

Wie bereits erläutert wurde, treten in logischen Halbleiterschaltungen betriebsmäßig nicht nur Signale mit dem Wert 0 Volt und volle Betriebsspannung auf, sondern von diesen abweichende Spannungen. Wie sich in den folgenden Ausführungen zeigen wird, hängen diese Abweichungen wesentlich von der gegenseitigen Belastung der Funktionsglieder ab und müssen für jedes logische Schaltsystem festgelegt werden. Ohne auf die Größe der zu den

	Bauglieder mit Kontakten	Bauglieder mit Halbleiterbauelementen	Bauglieder mit pneutischen Elementen
Vorteile	stark schwankende Betriebstemperatur zulässig galvanische Trennung zwisch. Eingangs- und Ausgangskreis stark überlastbar zwei Stromrichtungen im Eingangs- und Ausgangskreis möglich	höchste Schaltgeschwindigkeiten möglich hohe Ansprechempfindlichkeit lageunabhängig kein Verschleiß geringe Betriebsspannung keine Heizung notwendig kleines Volumen erschütterungsunempfindl.	geringe Herstellungskosten stark schwankende Betriebstemperatur zulässig Trennung von Eingangs- u. Ausgangskreis mögl. stark überlastbar lageunabhängig explosionssicher
Nachteile	Prellen der Kontakte Kontaktabnutzung geringe Schaltgeschwindigkeiten relativ große Ansprechleistung lageabhängig erschütterzngsempfindlich Explosionsgefahr durch Kontaktfunken relativ großes Volumen	Steuer- u. Arbeitskreis galvanisch verbunden nur eine Stromrichtung in Eingangs- u. Ausgangskreis endlicher Widerstand im ein- u. ausgeschalteten Zustand keine hohen und tiefen Umgebungstemperaturen zulässig Überlastungsempfindlichkeit	Verschmutzungsgefahr empfindlich gegen Ablagerung von Feuchtigkeit innerhalb der Glieder

Signalen gehörenden Spannungen einzugehen, wird festgelegt, daß das O-Signal einer niedrigen negativen Spannung und das L-Signal einer hohen negativen Spannung entspricht. Die Vorteile der Halbleiterbauelemente gegenüber Relais bestehen insbesondere in der hohen Grenzfrequenz und dadurch gegebenen geringen Schalteigenzeit, der geringen Steuerspannung, dem kleinen Volumen und der Unempfindlichkeit gegen Erschütterung und Verschmutzung. Diesen Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber, wie: Temperaturempfindlichkeit, keine galvanische Trennung des Eingangs- und des Ausgangskreises, Nichtereichen der Widerstände R = ∞ für den geöffneten und R = 0 für den gesperrten Zustand.

(Über Vor- und Nachteile von Schaltsystemen mit Kontakten und kontaktlosen Baugliedern siehe auch Tafel 5.1)

5.3.1.2. Logische Funktionsglieder

Undglied

Aus wirtschaftlichen Gründen wird das Undglied passiv ausgeführt. Es enthält keine Bauelemente mit Verstärkereigenschaften, sondern für jeden Eingang eine Diode und den zur Realisierung der Verknüpfungsbedingung notwendigen Arbeitswiderstand. Dieser wird an die negative Betriebsspannung von -12 V angeschlossen, welche auch das volle L-Signal darstellt. Abb. 5.34a zeigt das Schaltsymbol und Abb. 5.34b die Innenschaltung eines Undgliedes mit zwei Eingängen.

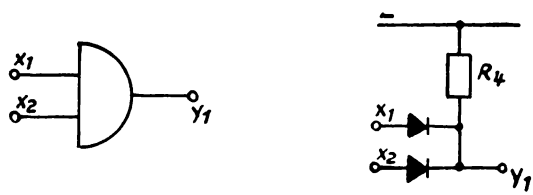


Abb. 5.34 Undglied (a: Schaltsymbol, b: Innenschaltung)

Gemäß Gleichung 5.1 im Abschnitt 5.2.2. muß sie die Schaltfunktion $Y_1 = x_2 x_1$ erfüllen. Am Ausgang Y_1 muß dann ein L-Signal erscheinen, wenn der Eingang x_2 und der Eingang x_1 gemeinsam L-Signal haben. Sobald ein Eingang 0-Signal erhält, muß auch der Ausgang auf 0-Signal gehen.

Zur Erläuterung der Wirkungsweise dienen die Abb. 5.35a...5.35e.

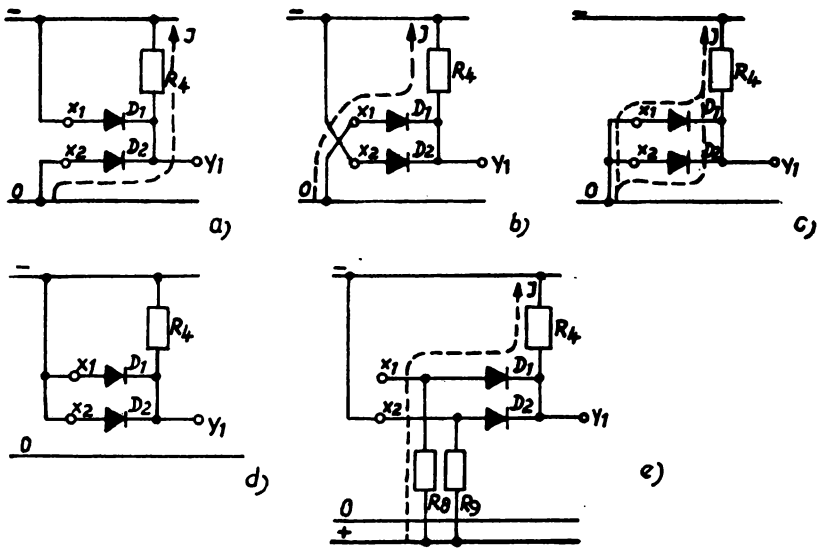


Abb. 5.35 Undglied mit verschiedenen Eingangsbelegungen

Zum besseren Verständnis ist für die Eintragung des Strompfeiles hier wie auch in allen anderen Abbildungen die technische Stromrichtung verwendet worden. Abb. 5.35a zeigt ein Undglied, bei dem der Eingang x_1 an L-Signal und der Eingang x_2 an 0-Signal angeschlossen sind. Das sich bei dieser Signalbelegung einstellende Ausgangssignal ist von der Betriebsspannung und von den im Stromkreis liegenden Widerständen abhängig. Der Widerstand der in Durchlaßrichtung gepolten Diode D_2 ist sehr gering im Verhältnis zum Arbeitswiderstand des Undgliedes. Am Ausgang Y_1 stellt sich eine Spannung ein, die nur wenig über

0 Volt liegt. Die Diode D_1 ist dadurch in Sperrichtung gepolt und beeinflußt das Glied nicht.

Wird nach Abb. 5.35b der Eingang x_1 an 0-Signal und der Eingang x_2 an L-Signal gelegt, ergeben sich die gleichen Verhältnisse wie oben beschrieben. Der Strom fließt nun über die in Durchlaßrichtung gepolte Diode D_1 und den Arbeitswiderstand R_4, sodaß sich wieder ein 0-Signal am Ausgang Y_1 einstellt. Das ist auch der Fall, wenn beide Eingänge x_1 und x_2 gemäß Abb. 5.35c an 0-Signal angeschlossen sind. Die Dioden D_1 und D_2 sind beide in Durchlaßrichtung gepolt und liegen parallelgeschaltet vor dem Arbeitswiderstand R_4. Auf Grund des Spannungsteilerverhältnisses von Arbeitswiderstand R_4 und Dioden D_1 und D_2 hat der Ausgang Y_1 wieder 0- Signal. In Abb. 5.35d haben beide Eingänge x_1 und x_2 L-Signal. Der beim Anlegen eines 0-Signals in einem Eingang auftretende Strom und die Bildung eines Spannungsteilers zwischen der Betriebsspannung 0 V und -12 V kann nicht mehr erfolgen. Von den Eingängen her fließt durch Arbeitswiderstand kein Strommehr. Es entsteht demzufolge kein Spannungsabfall mehr an R_4 und der Ausgang Y_1 erhält L-Signal.

Ein L-Signal am Ausgang Y_1 tritt aber auch dann auf, wenn die Eingänge x_1 und x_2 kein Signal haben. Dieser Zustand tritt z.B. ein, wenn die Zuführungsleitungen der Eingänge infolge Leiterbruch kein Signal führen, wenn ein einspeisendes Glied aus der Schaltung kurzzeitig entfernt wurde oder wenn die Ansteuerung des Undgliedes durch einen an die negative Betriebsspannung angeschlossenen Kontakt erfolgt, der gerade geöffnet ist. Um in solchen Fällen eine Fehlentscheidung des Undgliedes zu verhindern, können die Eingänge durch die Widerstände R_8 und R_9 in Abb. 5.35e so vorgespannt werden, daß bei unbeschaltetem Eingang der Ausgang Y_1 trotzdem 0-Signal erhält. Der eingezeichnete Pfeil zeigt den Strom durch das Undglied bei unbeschaltetem Eingang x_1. Ist das Undglied unbelastet, entspricht das Ausgangssignal der vollen negativen Betriebsspannung von -12 V. Bei Belastung des Gliedes verringert sich das Signal.

Wichtig zum Verständnis der Wirkungsweise eines Undgliedes ist die Erkenntnis, daß das Ausgangssignal immer von einem Spannungs-

teilerverhältnis abhängig ist. Der Arbeitswiderstand des Gliedes wirkt als konstanter Spannungsteilerwiderstand, während der variable durch die Dioden und andere gegen 0 Volt geschaltete Widerstände gebildet wird. Darauf wird noch näher bei der Behandlung der Zusammenschaltung von logischen Gliedern eingegangen.

Oderglied

Das Oderglied ist ebenfalls nur mit passiven Bauelementen aufgebaut. Es hat für jeden Eingang eine Diode und einen Arbeitswiderstand gegen 0 Volt der Betriebsspannung. Wie später noch gezeigt wird, ist dieser Widerstand für die einwandfreie Funktion des Gliedes nicht in jedem Fall erforderlich, bringt aber Vorteile bei der Zusammenschaltung mehrerer Glieder. Abb. 5.36a zeigt das Schaltsymbol und Abb. 5.36b die Innenschaltung eines Odergliedes mit zwei Eingängen. Nach Gleichung 5.2 im Abschnitt 5.2.2. muß das Oderglied die Schaltfunktion $Y_2 = x_4 \vee x_3$ erfüllen. Der Ausgang Y_2 muß dann ein L-Signal haben, wenn der Eingang x_3 oder der Eingang x_4 oder beide Eingänge gemeinsam L-Signal haben.

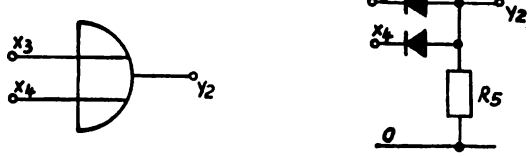


Abb. 5.36 Oderglied (a: Schaltsymbol, b: Innenschaltung)

Die Wirkungsweise des Odergliedes wird an den Abb. 5.37a...5.37d erläutert. Bei dem in Abb. 5.37a gezeichneten Oderglied ist der Eingang x_3 mit L-Signal und der Eingang x_4 mit 0-Signal belegt. In diesem Schaltzustand fließt der eingezeichnete Strom durch den Arbeitswiderstand des Gliedes und die Diode D_3 von 0 nach -12 V. Das Signal am Ausgang Y_2 stellt sich wieder in Abhängigkeit des Spannungsteilerverhältnisses von Arbeitswiderstand R_5 und Durchlaßwiderstand der Diode D_3 ein. Der Widerstand der in

Durchlaßrichtung gepolten Diode ist klein im Verhältnis zum Arbeitswiderstand R_5. Am Ausgang Y_2 stellt sich demzufolge ein Signal ein, welches nur wenig von der vollen negativen Betriebsspannung abweicht. Die Diode D_4 ist in Sperrichtung gepolt und hat keinen Einfluß auf die Schaltung.

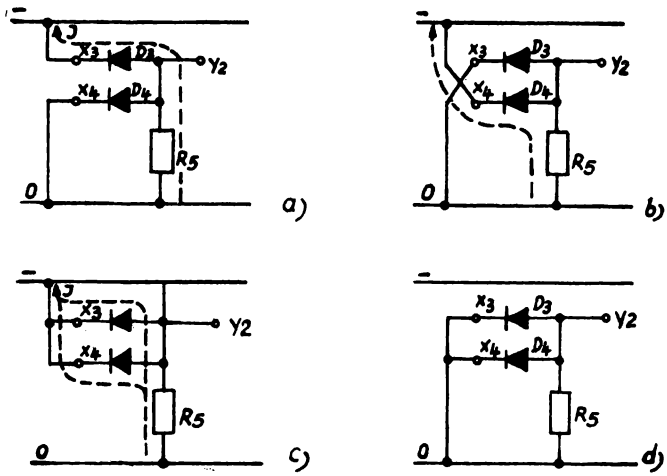


Abb. 5.37 Oderglied mit verschiedenen Eingangsbelegungen

Hat das Oderglied die in Abb. 5.37b angegebenen Eingangssignale, treten die gleichen Verhältnisse auf, wie in Abb. 5.37a, nur daß jetzt die Diode D_4 in den Spannungsteiler für das Ausgangssignal einwirkt. Am Ausgang Y_2 steht wiederum ein L-Signal.

Werden gemäß Abb. 5.37c beide Eingänge x_3 und x_4 an L-Signal gelegt, wirken beide Dioden parallelgeschaltet im Spannungsteiler mit dem Arbeitswiderstand des Gliedes und am Ausgang Y_2 stellt sich wieder L-Signal ein.

Erhalten nach Abb. 5.37d beide Eingänge x_3 und x_4 O-Signal, geht auch der Ausgang Y_2 auf O-Signal. Ein Strom über einen im Verhältnis zum Arbeitswiderstand des Gliedes niederohmigen Widerstand zur Betriebsspannung -12 V ist nicht mehr möglich. Der Ausgang erhält deshalb sein Signal über den Arbeitswiderstand R_5. Dieses entspricht im unbelasteten Zustand des Gliedes genau der Spannung 0 Volt.

Nichtglied (Negator)

Das Nichtglied muß mit einem aktiven Bauelement aufgebaut werden. Es enthält als wichtigstes Bestandteil einen pnp-Transistor in Emitterschaltung. Abb. 5.38a zeigt das Schaltsymbol und Abb. 5.38b die Innenschaltung eines Negators.

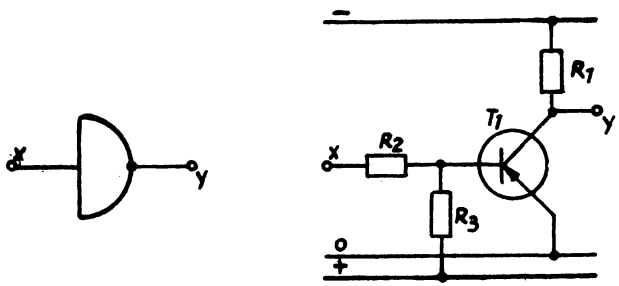


Abb. 5.38 Negator (a: Schaltsymbol, b: Innenschaltung)

Das Eingangssignal x gelangt über den Widerstand R_2 an die Basis des Transistors T_1. Das Ausgangssignal Y wird zwischen dem Kollektoranschluß des Transistors und dem Arbeitswiderstand R_1 abgenommen. Die Erläuterung der Wirkungsweise des Negators erfolgt unter Zuhilfenahme des in Abb. 5.39 angegebenen Kennlinienfeldes für einen Transistor in Emitterschaltung.

Auf Grund der Dimensionierung des Arbeitswiderstandes R_1 und der vorhandenen Betriebsspannung gilt die in Abb. 5.39 mit "A" bezeichnete Widerstandsgerade. Erhält die Basis des Transistors T_1 kein Eingangssignal, d.h. fließt kein Basisstrom, gilt die Kennlinie für $-I_B = 0$. Der Arbeitspunkt des Transistors befindet sich demzufolge an der mit "1" bezeichneten Stelle. Der Widerstand der Kollektor-Emitter-Strecke ist sehr groß und es stellt sich ein hohes negatives Ausgangssignal an Y ein. Auf der Abszisse des Kennlinienfeldes kann die Ausgangsspannung $U_{y1} = -11{,}3$ V abgelesen werden. Wird dem Transistor über R_2 ein Eingangssignal zugeführt, steigt der Basisstrom an. Der sich entsprechend der Ansteuerung einstellende Arbeitspunkt wandert auf der Widerstandsgeraden entlang, wodurch das negative Ausgangssignal immer kleiner wird.

Ist der Basisstrom groß genug, kommt der Transistor bis in die Sättigung und erreicht als Ausgangssignal $U_{y0} = -0{,}1$ V. (Punkt 2 in Abb. 5.39)

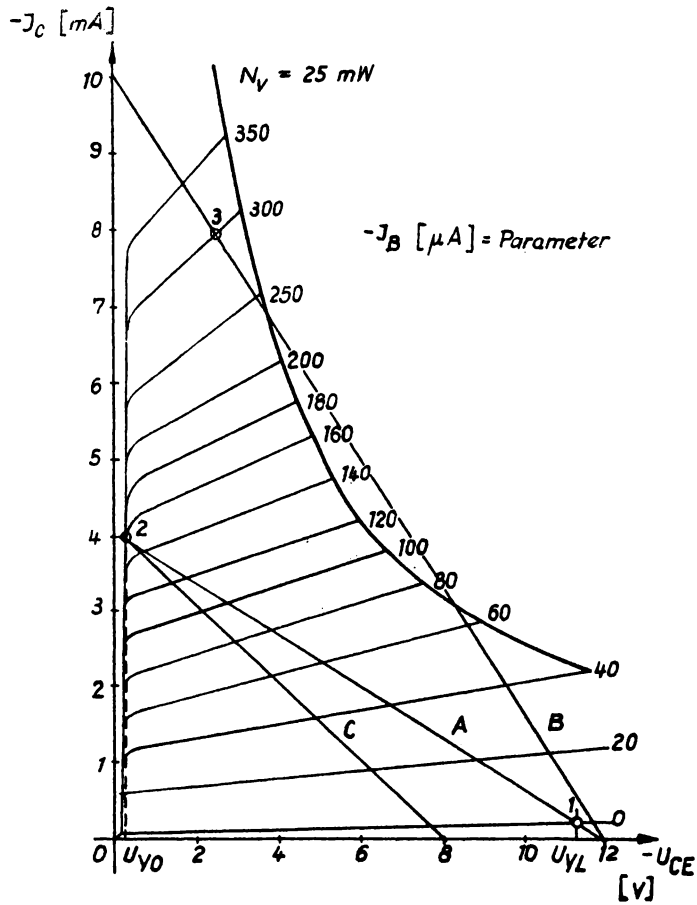


Abb. 5.39 Kennlinie eines pnp-Transistors mit Widerstandsgeraden für verschiedene Belastungsfälle

Aus dieser einfachen Erklärung ist folgendes Wichtige zu erkennen:

Führt der Eingang des Negators kein Steuersignal, ist also x = 0, ergibt sich am Ausgang Y = L. Hat der Eingang x = L, erhält Y = 0. Dabei ist zu beachten, daß die Größe der Ausgangssignale von der Ansteuerung und von der Belastung abhängig ist.

Der Widerstand R_2 darf nicht so klein dimensioniert werden, daß der Transistor bei Ansteuerung mit der vollen negativen Betriebsspannung so stark übersteuert wird, daß der Schaden nimmt. Andererseits darf R_2 nur so groß sein, daß bei geringster Ansteuerung infolge vorgeschalteter Glieder noch so viel Steuerstrom fließen kann, daß der Transistor bei höchster Belastung noch sicher in das Sättigungsgebiet gebracht wird. Das ist deshalb sehr wichtig, weil ein Transistor nicht leistungslos gesteuert werden kann. Er benötigt immer einen Steuerstrom und nicht nur eine Steuerspannung wie z.B. eine Elektronenröhre.

Der Widerstand R_3 dient zur Unterdrückung eines hohen Kollektorreststromes, insbesondere bei erhöhter Temperatur.

5.3.1.3. Zusammenschaltung mehrerer logischer Verknüpfungsglieder

Zur Realisierung von irgendwelchen logischen Schaltungen müssen die bisher einzeln beschriebenen Glieder in einer durch die Schaltfunktion bedingten Art zusammengeschaltet werden. Dabei treten Belastungen und Potentialveränderungen an den Gliedern auf, die nun näher betrachtet werden. In diesem Zusammenhang sollen nicht etwa Dimensionierungsvorschriften abgeleitet werden, sondern es geht um das Erkennen der prinzipiellen Zusammenhänge.

Belastung eines Undgliedes durch einen Negator

Abb. 5.40 zeigt die Zusammenschaltung eines Undgliedes und eines Negators. Sind beide Undgliedeingänge x_1 und x_2 an die

negative Betriebsspannung angeschlossen, erhält der Negatortransistor seinen Steuerstrom über die Widerstände R_2 und R_4. Der Widerstandswert von R_2 wurde bereits erwähnt. In die dort angestellte Betrachtung ist nun noch R_4 mit einzubeziehen. Um dem Negatortransistor einen möglichst hohen Steuerstrom zur Verfügung stellen zu können, soll R_4 möglichst klein sein. Dabei wird aber das weiter vorgeschaltete Glied sehr stark belastet, sodaß eine willkürliche Verkleinerung nicht möglich ist.

Hat wenigstens ein Undgliedeingang 0-Signal, hat der Ausgang Y_1, wie unter Punkt 5.3.1.2. erläutert, ebenfalls 0-Signal und am Ausgang Y des Negators muß L-Signal erscheinen. Um das zu erreichen, darf der Transistor nur so wenig als möglich Steuerstrom erhalten, was vom Potential am Eingang x abhängig ist. Das sich an x bzw. Y_1 einstellende 0-Signal ist im wesentlichen von den Potentialen an x_1 und x_2 abhängig. Sie müssen so niedrig als möglich sein, um ein gutes L-Signal an Y zu garantieren. Daraus ist zu erkennen, daß für die Ansteuerung des Negatortransistors nicht nur das direkt vorgeschaltete Glied maßgebend ist, sondern auch die weiter davorliegenden.

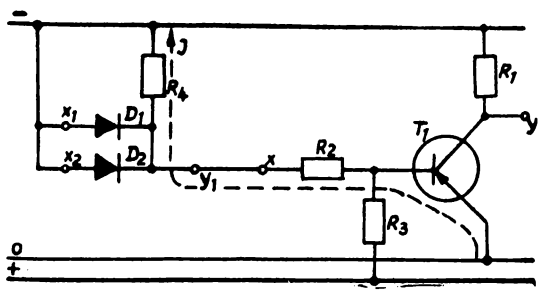


Abb. 5.40 Belastung eines Undgliedes durch einen Negator

Belastung eines Odergliedes durch einen Negator

Die Anschaltung eines Negators an ein Oderglied zeigt Abb. 5.41. Bei der gezeichneten Schaltbelegung erhält der Negatortransistor seinen Steuerstrom über R_2 und den Widerstand der in Durchlaßrichtung gepolten Diode D_3. Der Durchlaßwiderstand der Diode

ist sehr gering, sodaß ein starker Steuerstrom fließt und der Transistor weit im Sättigungsgebiet arbeitet. Im Zuge der Zusammenschaltung ist jedoch der Eingang x_3 des Odergliedes nicht unbedingt an die negative Betriebsspannung direkt angeschlossen, sondern meist über den Arbeitswiderstand des vorgeschalteten Gliedes. Dieser Widerstand ist dann für die Ansteuerung des Negatortransistors mit maßgebend. Es ist also auch hier nicht nur das direkt vorgeschaltete Glied für die Ansteuerung verantwortlich. Über den Widerstand R_5 des Odergliedes fließt parallel zur Emitter-Basis-Strecke des Transistors T_1 ein Strom durch die Diode D_3 zur negativen Betriebsspannung. Dieser Widerstand belastet das vorgeschaltete Glied. Er ist für den betrachteten Anwendungsfall für die Funktionsfähigkeit des Odergliedes nicht erforderlich, da die Aufgabe des Odergliedarbeitswiderstandes vom nachgeschaltetem Negator übernommen werden kann. Wird dem Oderglied jedoch kein Negator sondern ein Undglied nachgeschaltet, ist der Arbeitswiderstand R_5 unbedingt erforderlich.

Haben beide Odergliedeingänge 0-Signal, darf der Negatortransistor wieder nur möglichst wenig Steuerstrom erhalten. Dieses ist wiederum in der schon beschriebenen Weise von den Signalverhältnissen an den weiter vorgeschalteten Gliedern abhängig.

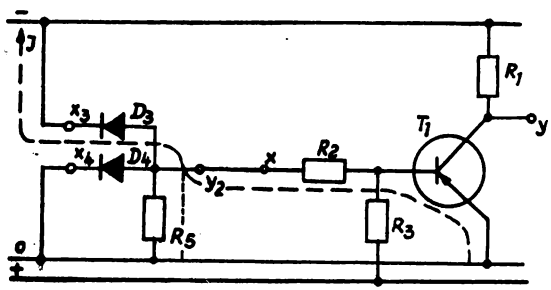


Abb. 5.41 Belastung eines Odergliedes durch einen Negator

Belastung eines Odergliedes durch ein Undglied

In Abb. 5.42 ist die Zusammenschaltung eines Odergliedes und eines Undgliedes nach der Schaltfunktion $Y_1 = x_1(x_4 \vee x_3)$ ange-

geben. Da beide Odereingänge an O-Signal angeschlossen sind, muß auch der Ausgang Y_1 O-Signal erhalten. In der Schaltung fließt der in Abb. 5.42 eingetragene Strom und an Y_1 stellt sich ein Signal ein, welches durch den aus R_5, D_2 und R_4 bestehenden Spannungsteiler gegeben ist. Der Arbeitswiderstand des Odergliedes ist jetzt unbedingt notwendig, da über die Oderglieddioden direkt auf das Undglied keine Steuermöglichkeit besteht. Nimmt man den Durchlaßwiderstand der Diode als unveränderlich an, wird das Potenzial an Y_1 umso näher an O Volt liegen, je größer R_4 und je kleiner R_5 ist. Daß für die Vergrößerung von R_4 eine obere Grenze besteht, wurde bereits festgestellt. Aber auch für R_5 besteht eine untere Grenze, wie sich bei den folgenden Betrachtungen herausstellen wird.

Erhält ein Odergliedeingang L-Signal, muß auch an Y_1 ein L-Signal erscheinen. (Abb. 5.43) Das ist umsobesser dann der Fall, je kleiner der Strom durch die Undglieddioden und den -arbeitswiderstand ist. Dieser Strom wird umso kleiner, je besser das L-Signal an Y_2 ist, da der Strom durch das Undglied infolge des Potentialunterschiedes über D_2 und R_5 fließt. Dieser Potentialunterschied wird klein, wenn R_6 klein gegenüber R_5 ist. R_6 ist der Widerstand des einspeisenden Gliedes. Aus dieser Tatsache ist die Schlußfolgerung zu ziehen, daß bei der Hintereinanderschaltung von mehreren passiven Gliedern deren Arbeitswiderstände von Glied zu Glied beträchtlich größer werden müssen. Da weder der Arbeitswiderstand des letzten passiven Gliedes beliebig groß noch der des ersten Gliedes beliebig klein sein darf, kann nur eine begrenzte Zahl passiver Glieder hintereinander geschaltet werden.

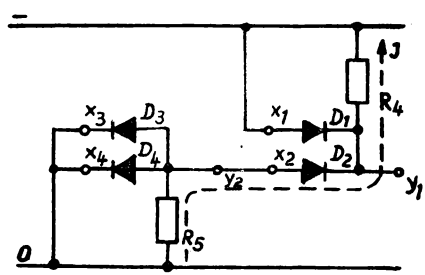


Abb. 5.42
Belastung eines Odergliedes durch ein Undglied
(Odergliedausgang hat O-Signal)

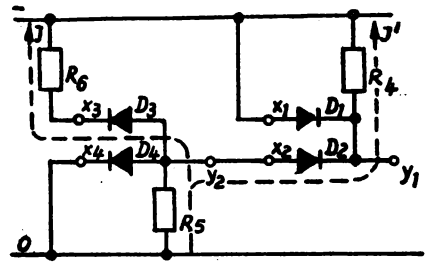


Abb. 5.43
Belastung eines Odergliedes
durch ein Undglied
(Odergliedausgang hat L-Signal)

Belastung eines Undgliedes durch ein Oderglied

Die in Abb. 5.44 gezeichnete Zusammenschaltung verwirklicht die Schaltfunktion $Y_2 = x_4 \vee x_2 x_1$. Da beide Undgliedeingänge an L-Signal angeschlossen sind, muß auch der Ausgang Y_2 ein L-Signal haben. Infolge des fließenden Stromes stellt sich das Ausgangssignal an Y_2 entsprechend der Spannungsteilerwiderstände R_5, D_3 und R_4 ein. Der Diodendurchlaßwiderstand kann wieder als unveränderlich angesehen werden. Das L-Signal an Y_2 wird dann umso besser, je kleiner R_4 und je größer R_5 dimensioniert ist.

Wird der Eingang x_2 an O-Signal gelegt, muß gemäß der angegebenen Schaltfunktion auch Y_2 ein O-Signal haben. (Abb. 5.45) Dieses wird umso besser, je kleiner R_7 ist. Wiederum erkennt man dadurch die Tatsache, daß die Arbeitswiderstände der hintereinanderfolgenden Glieder beträchtlich größer werden müssen.

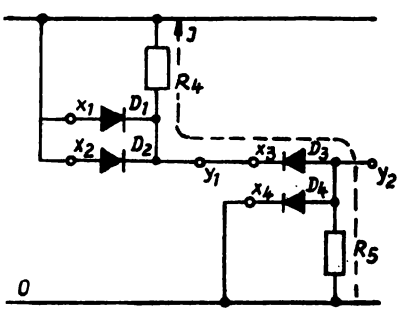


Abb. 5.44
Belastung eines Undgliedes
durch ein Oderglied
(Undgliedausgang hat L-Signal)

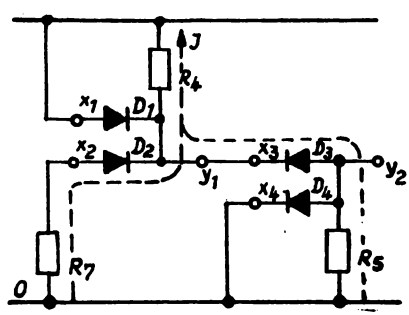


Abb. 5.45
Belastung eines Undgliedes
durch ein Undglied
(Undgliedausgang hat O-Signal)

Belastung eines Negators durch Undglieder

Wird ein Negator durch Undglieder belastet, erniedrigt sich der Negatorarbeitswiderstand R durch die parallel geschalteten Undgliedwiderstände R_4. (Abb. 5.46 und 5.47) Jenachdem, wieviel Undglieder angeschaltet sind, verändert sich die in Abb. 5.39 eingetragene Widerstandsgerade und erreicht beispielsweise die mit "B" bezeichnete Lage. Die Widerstandsgerade liegt nun nicht mehr wie im Fall "A" für alle Ansteuerungsströme unter der Hyperbel der maximalen Verlustleistung, sondern teilweise darüber. Um den Negatortransistor nicht zu zerstören, muß dafür gesorgt werden, daß im Dauerbetrieb kein Arbeitspunkt eingenommen wird, der über dieser Hyperbel liegt. Für den unstetigen Betrieb des Negators kann die angenommene Belastung verwendet werden, wenn dafür gesorgt wird, daß das Überlastgebiet so schnell durchfahren wird, daß keine unvertretbare Temperaturerhöhung eintritt.

Der in Abb. 5.46 angegebene Negator hat am Eingang L-Signal. Deshalb fließt in der Kollektor-Emitter-Strecke der eingezeichnete Strom. Betrachten wir dazu das Kennlinienfeld in Abb. 5.39. In den vorangegangenen Belastungsfällen wurde bereits nachgewiesen, daß dem Negatortransistor infolge der Dimensionierung der vorgeschalteten Glieder nur ein maximaler Steuerstrom zur Verfügung gestellt werden kann. Dieser sei 0,3 mA. Für diesen Ansteuerungsstrom stellt sich auf der Widerstandsgeraden der Arbeitspunkt "3" ein. Man sieht, daß das Ausgangssignal an Y durch die Belastung stark angestiegen ist und bei weitem nicht mehr dem vollen O-Signal von 0 Volt entspricht. Die Verbesserung des O-Signals ist einmal möglich durch eine stärkere Ansteuerung oder durch eine geringere Belastung. Beide Forderungen widersprechen sich aber, denn für eine stärkere Ansteuerung muß der Arbeitswiderstand des vorgeschalteten Gliedes kleiner gewählt werden. Diese Verkleinerung wirkt sich aber auch auf die Arbeitswiderstände der vorgeschalteten Glieder aus, sodaß sich eine höhere Belastung des einspeisenden Negators ergibt.

Nach Abb. 5.47 hat der Eingang des Negators O-Signal. Der Ausgang hat demzufolge das Signal L. Hat sich die Belastung nicht geändert, gilt weiterhin die Widerstandsgerade "B". Das L-Signal an Y hat sich durch die Belastung nur unwesentlich geändert. Es ist etwas besser geworden und bringt deshalb keine Schwierigkeiten.

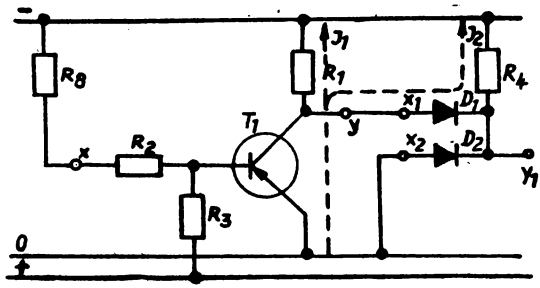


Abb. 5.46 Belastung eines Negators durch ein Undglied
(Negatorausgang hat O-Signal)

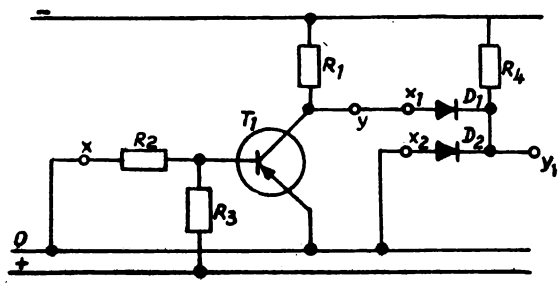


Abb. 5.47 Belastung eines Negators durch ein Undglied
(Negatorausgang hat L-Signal)

Belastung eines Negators durch Oderglieder

Wie die Abb. 5.48 und 5.49 zeigen, liegt der Negatortransistor jetzt an einem Spannungsteiler, der durch den Negatorarbeitswiderstand und den Widerstand der angeschlossenen Oderglieder gegeben ist. Es stellt sich dadurch eine Widerstandsgerade ein, die die mit "C" bezeichnete Steigung in Abb. 5.39 hat.

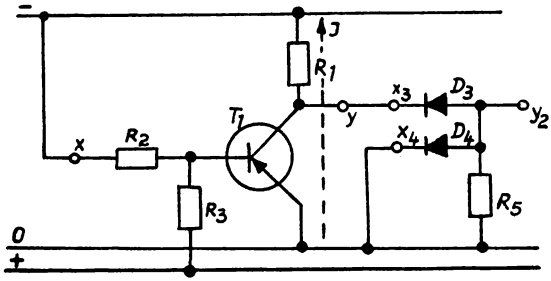


Abb. 5.48 Belastung eines Negators durch ein Oderglied (Negatorausgang hat 0-Signal)

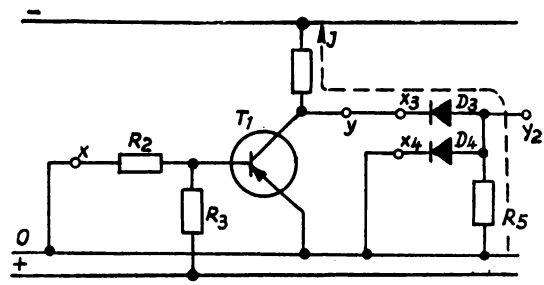


Abb. 5.49 Belastung eines Negators durch ein Oderglied (Negatorausgang hat L-Signal)

Liegt die in Abb. 5.48 gezeichnete Ansteuerung vor, hat der Ausgang Y ein 0-Signal. An der Lage der Kennlinie ist zu ersehen, daß das Ausgangssignal in der Nähe von 0 Volt liegt, also sehr gut ist.

Liegt die Ansteuerung nach Abb. 5.49 vor, sieht man, daß das L-Signal am Ausgang recht niedrig geworden ist. Es wird umso kleiner, je größer die Belastung durch die angeschlossenen Oderglieder ist, da die Widerstandsgerade, bedingt durch den schon erwähnten Spannungsteiler, immer steiler wird. Es kann nun eine sehr wichtige Schlußfolgerung gezogen werden: Wird ein Negator mit Undgliedern belastet, verschlechtert sich immer nur das 0-Signal, während das L-Signal gut bleibt. Bei der Belastung des Negators durch Oderglieder verschlechtert sich

dagegen immer nur das L-Signal und das O-Signal bleibt fast unverändert.

Da der Negator das einzige aktive Glied innerhalb der Zusammenschaltungen ist, und in allen passiven Gliedern Leistung verloren geht, kann nur eine begrenzte Anzahl passiver Glieder hintereinander geschaltet werden. Um festgelegte Signalgrenzen einzuhalten, kann nur eine begrenzte Anzahl Glieder an andere angeschaltet werden. In der Praxis sieht das dann so aus, daß für kontaktlose Schaltsysteme nur bestimmte Zusammenschaltungen freigegeben werden und der Hersteller für seine Systeme Belastungsvorschriften herausgibt.

So entstanden Schaltsysteme, bei denen Undglieder grundsätzlich nicht hintereinander geschaltet werden dürfen und ein Undglied nicht auf ein Oderglied folgen darf. Das Oderglied hat keinen Arbeitswiderstand, sodaß es für die Belastung nahezu vernachlässigt werden kann.

Bei anderen Schaltsystemen werden Und- und Oderglieder in hoch- und niederohmiger Ausführung hergestellt und zur Bedingung gemacht, daß nur ein Glied mit hochohmigen Arbeitswiderstand an ein solches mit niederohmigen Arbeitswiderstand angeschaltet werden darf. Die Oderglieder haben in diesem Fall selbstverständlich Arbeitswiderstände. Es ergeben sich bei diesem System Belastungen des O- und des L-Signals, die bei der Schaltungsauslegung zu beachten sind.

Näher soll auf die bestehenden Systeme nicht eingegangen werden. Ohne auf die genaue Dimensionierung einzugehen oder irgendwelche Potentiale zwischen den Gliedern zu berechnen, wurde das wichtigste gesagt, was zum Verständnis kontaktloser Bauglieder notwendig ist. In der Praxis treten noch viele zusätzliche Probleme auf, wie z.B. der Einfluß der Umgebungstemperatur.

Abschließend soll noch auf zwei Sonderfälle von Zusammenschaltungen eingegangen werden, nämlich auf die Norglieder Abb. 5.50 und auf die Shefferglieder Abb. 5.51. Bei beiden wird davon ausgegangen, daf die Anzahl der Zusammenschaltungsregeln mit

steigender Zahl unterschiedlicher Glieder sehr schnell ansteigt und dadurch die Übersichtlichkeit eines kontaktlosen Schaltsystems verschlechtert wird. Außerdem hat die Anwendung dieser Techniken den großen Vorteil einer leichten und ökonomischen Serienfertigung, da nur ein Grundglied besteht.

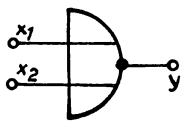


Abb. 5.50
Schaltsymbol eines Norgliedes

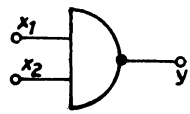


Abb. 5.51
Schaltsymbol eines Shefferg liedes

Norglied

Das Norglied besteht aus einem Oderglied mit nachgeschaltetem Negator. Es verwirklicht die Schaltfunktion $Y = \overline{x_1 \vee x_2}$. Nach den unter Punkt 5.2.3. behandelten Inversionsgesetzen ist es möglich, jede konjunktive Verknüpfung in eine disjunktive umzuformen. Demzufolge können alle auftretenden Verknüpfungen nur mit Norgliedern allein realisiert werden. Die einzelnen Glieder der Schaltfunktion müssen jedoch oftmals mehrfach invertiert werden, was einige Arbeit macht und Übersicht voraussetzt. Außerdem werden meist mehr Bauglieder benötigt, als das bei Verwendung von Undgliedern, Odergliedern und Negatoren der Fall ist.

Die Bedingungen für die Zusammenschaltung der Norglieder sind denkbar einfach, denn es braucht nur die Anzahl der an ein Glied anzuschaltenden Glieder begrenzt werden.

Shefferglied

Das Shefferglied baut auf den gleichen Prinzipien auf, wie das Norglied und hat auch die gleichen Vor- und Nachteile. Es besteht aus einem hinter ein Undglied geschalteten Negator und verwirklicht die Schaltfunktion $Y = \overline{x_2 x_1}$.

5.1.4. Speicherglieder

Für den Aufbau von Folgeschaltungen werden neben den Verknüpfungsgliedern auch binäre Glieder zur Signalspeicherung benötigt. Als kontaktloses Speicherglied auf Halbleiterbasis wird der mit Transistoren aufgebaute bistabile Multivibrator verwendet. Er besteht im Prinzip aus der Zusammenschaltung von zwei gleichen überkritisch mitgekoppelten Verstärkerstufen. Abb. 5.52a zeigt das Schaltsymbol und Abb. 5.52b die Innenschaltung eines bistabilen Multivibrators. Die Verstärkerstufe 1 enthält den Transistor T_1 mit Arbeitswiderstand R_1, Rückkoppelglied C_1/R_3, Vorspannwiderstand R_5 und Eingangswiderstand R_7. Zur Verstärkerstufe 2 gehören dementsprechend T_2, R_2, C_2/R_4, R_6, R_8.

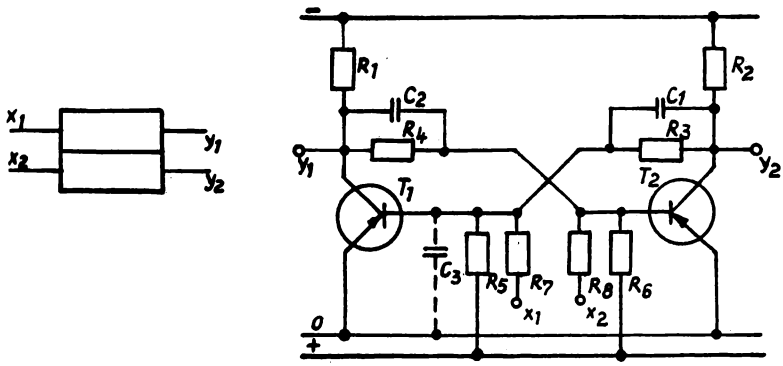


Abb. 5.52 Bistabile Kippstufe
(a: Schaltsymbol,
b: Innenschaltung)

Liegen an x_1 und an x_2 keine Eingangssignale und die Betriebsspannung wird zugeschaltet, versuchen zunächst beide Transistoren Strom zu ziehen und zwar T_1 mit R_1 über C_1/R_3, R_2 und T_2 mit R_2 über C_2/R_4, R_1. Dadurch verkleinern sich die negativen Potentiale an den Ausgängen Y_1 und Y_2. Diese Verkleinerung tritt aber an Y_1 und an Y_2 infolge unvermeidbarer innerer Unsymmetrie der Schaltung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf. Nimmt z.B. die negative Spannung an Y_2 schneller ab als

die an Y_1, steht T_1 eine geringere Rückkommlungsspannung zur Verfügung als T_2. Die Durchschltung von T_1 wird dadurch gebremst, was schließlich dazu führt, daß T_2 völlig in den leitenden und T_1 völlig in den gesperrten Zustand gerät. In diesem einen stabilen Zustand des bistabilen Multivibrators hat Y_1 ein L-Signal und Y_2 ein O-Signal. Der zweite stabile Zustand ist O-Signal an Y_1 und L-Signal an Y_2. Dieser hätte sich nach Anlegen der Betriebsspannung ebenfalls einstellen können.

Besteht die Notwendigkeit, daß der bistabile Multivibrator beim Anlegen der Betriebsspannung selbstständig eine vorweg festgelegte Ausgangsstellung einnimmt, muß die Zeitkonstante eines Multivibratorteils durch Einbau eines Kondensators (C_3 in Abb. 5.52b) erhöht werden. Die Basisspannung von T_1 wächst dadurch bedeutend langsamer als die von T_2, so daß sich als Ausgangszustand immer L-Signal an Y_1 und O-Signal an Y_2 einstellt.

Umschaltung des Multivibrators

Es wird angenommen, daß der Ausgang Y_1 ein L-Signal und Y_2 ein O-Signal hat. Legt man an x_1 ein L-Signal, erhält T_1 über R_7 Steuerstrom. Dadurch verringert sich das negative Potential an Y_1 und die Rückkopplung über C_2/R_4 nach T_2 wird kleiner, Durch die schwächere Ansteuerung von T_2 vergrößert sich sein negatives Ausgangssignal, welches über C_1/R_3 die Umschaltung von T_1 parallel zum Eingangssignal unterstützt. T_1 kommt mehr und mehr in den leitenden und T_2 in den gesperrten Zustand. Der Kippvorgang ist abgeschlossen, wenn T_1 am Ausgang O-Signal hat und T_2 ein L-Signal. Da sich beide Verstärkerstufen beim Umschaltvorgang unterstützen, werden sehr kleine Umschaltzeiten erreicht und die Flanken der Ausgangsspannung sehr steil. Ebenso wie das Umkippen des Multivibrators durch Anlegen eines L-Signals eingeleitet werden kann, ist das auch durch ein O-Signal möglich. Als Ausgangsstellung wird wieder L-Signal an Y_1 und O-Signal an Y_2 angenommen. Wird an den Eingang x_2 ein O-Signal gelegt, erhält T_2 einen verringerten Basisstrom, wodurch sein

Kollektorpotential angehoben wird. Dieses wird über C_1/R_3 an die Basis von T_1 gegeben, dessen Kollektorpotential abnimmt und die Ansteuerung von T_2 weiter verringert. Dadurch kommt T_1 in den leitenden und T_2 in den gesperrten Zustand und der Multivibrator kippt um.

Durch kurzzeitiges Anlegen eines Signals an den Eingang x_1 des bistabilen Multivibrators kann dieses solange gespeichert werden, bis durch Belegen des Einganges x_2 diese Information wieder gelöscht wird. Die gespeicherte Information kann an den Ausgängen Y_1 oder Y_2 abgenommen werden, jenachdem, ob sie negiert oder unnegiert benötigt wird.

Wichtig ist die Erkenntnis, daß der bistabile Multivibrator sowohl mit L-Signal als auch mit O-Signal umgeschaltet werden kann. Steht zum Umschalten ein L-Signal oder ein negativer Impuls zur Verfügung ist der Eingang des Transistors zu belegen, dessen Ausgang L-Signal hat. Soll mit einem O-Signal (positiver Impuls) geschaltet werden, ist der Eingang des Transistors zu belegen, dessen Ausgang O-Signal hat. Erhält dagegen der Transistor ein L-Signal, dessen Ausgang bereits O-Signal hat, bleibt das Eingangssignal wirkungslos, da der Transistor bereits durchgeschaltet hat. Die gleichen Verhältnisse treten auf, wenn ein O-Signal an den Eingang des Transistors kommt, dessen Ausgang L-Signal hat. Steht für die Umschaltung des bistabilen Multivibrators nur eine Signalleitung zur Verfügung, wie das z.B. bei seinem Einsatz in Zählschaltungen der Fall ist, wird von dieser Tatsache Gebrauch gemacht. Die Eingangssignale werden beiden Basen gleichzeitig zugeführt, so daß der Multivibrator bei jedem eintreffenden Impuls in den entgegengesetzten Zustand kippt.

Speicherglieder lassen sich auch aus zwei Norgliedern bzw. aus zwei Odergliedern und zwei Negatoren aufbauen. Abb. 5.53a zeigt eine solche Anordnung dargestellt mit Schaltsymbolen und Abb. 5.53b die Innenschaltung.

Liegen an den Eingängen x_1 und x_2 beim Anlegen der Betriebsspannung keine Eingangssignale, versuchen wieder beide Tran-

sistoren Strom zu ziehen und zwar T_1 mit R_1 über R_3, D_1, R_2 und T_2 mit R_2 über R_4, D_3, R_1. Dadurch vergrößern sich die Spannungsabfälle an R_1 und an R_2, so daß die Spannung zum Ansteuern der beiden Transistoren kleiner wird. Wie bereits beim bistabilen Multivibrator beschrieben, tritt dieses mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf, so daß die Schaltung einen stabilen Zustand erreicht. Ist der Transistor T_1 gesperrt und der Transistor T_2 geöffnet, hat Ausgang Y ein 0-Signal. Erhält der Speichereingang x_1 ein L-Signal, wird T_1 über D_2 und R_3 angesteuert und sein Ausgang geht auf 0-Signal. Dadurch bekommt T_2 über D_3 und R_4 keinen Steuerstrom mehr, so daß sein Ausgang und damit auch Y ein L-Signal erhält, welches über D_1 und R_3 auf T_1 zurückgeführt wird. Die Schaltung ist somit in den zweiten stabilen Zustand gekommen.

Der eingenommene Schaltzustand mit L-Signal am Ausgang Y wird solange aufrecht erhalten, bis auf den Löscheingang x_2 ein L-Signal gegeben wird. Dadurch wird T_2 über D_4 und R_4 angesteuert und sein Ausgang geht auf 0-Signal. Da die Ansteuerung für T_1 über D_1 und R_3 wegfällt, geht dessen Ausgang auf L-Signal. Dieses kommt über D_3 und R_4 parallel zum Eingangssignal auf die Basis von T_2. Dadurch ist wieder der erste stabile Zustand der Schaltung erreicht worden, welcher bestehen bleibt, bis der Eingang x_1 mit einem L-Signal belegt wird.

Die Löschung erfolgt auch, wenn am Eingang x_1 noch L-Signal ansteht. Man spricht deshalb von einem Speicher mit dominierender Löschung.

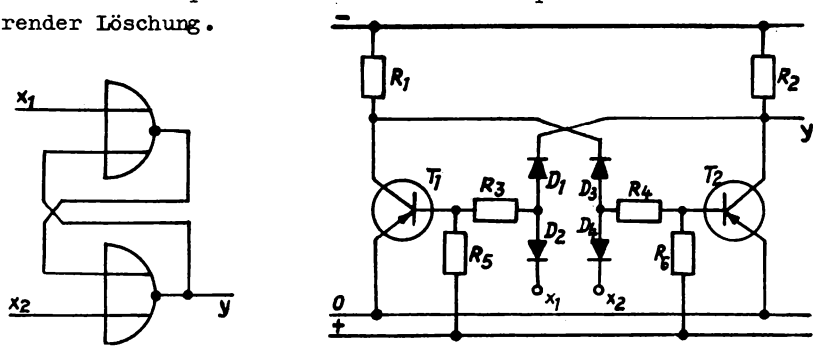


Abb. 5.53 Bistabile Kippstufe aus Norgliedern
(a: Darstellung mit Schaltsymbolen, b: Innenschaltung)

5.3.1.5. Zeitglied

Sollen irgendwelche Schaltvorgänge verzögert erfolgen, werden Zeitglieder benötigt. Diese bestehen aus einer RC-Kombination zur Bildung der Zeitverzögerung und einer nachgeschalteten Verstärkerstufe. Da diese Glieder nur eine stabile Lage haben, werden sie oft als monostabile Multivibratoren bezeichnet. Abb. 5.54a zeigt das Schaltsymbol und Abb. 5.54b die Innenschaltung einer monostabilen Kippstufe. Hat der Eingang x ein 0-Signal, ist Transistor T_1 gesperrt und an seinem Kollektor steht L-Signal. T_2 erhält über R_5 Steuerstrom, so daß der Ausgang Y ein 0-Signal erhält. Gelangt ein Eingangssignal an x, wird T_1 über R_2 angesteuert und sein Kollektorpotential geht auf 0. Das wird über C_1 an die Basis von T_2 übertragen, so daß der Ausgang Y ein L-Signal erhält. Über R_5 wird C_1 umgeladen. Dadurch wird die Basis von T_2 langsam negativ und der monostabile Multivibrator kippt zurück. Y hat wieder 0-Signal.

Steht als Eingangssignal nur ein Impuls zur Verfügung, ist der in Abb. 5.54b eingezeichnete Widerstand R_6 vorzusehen. Durch ihn wird das Ausgangssignal an den Eingang zurückgeführt, so daß T_1 bis zum Rückschalten von T_2 im leitenden Zustand gehalten wird. Infolge des relativ kleinen Eingangswiderstandes von Transistor T_2 ist es schwierig, monostabile Kippstufen für lange Verzögerungszeiten aufzubauen. Werden Verzögerungszeiten von über ca. 30 sek. benötigt, sind besondere Schaltungen erforderlich.

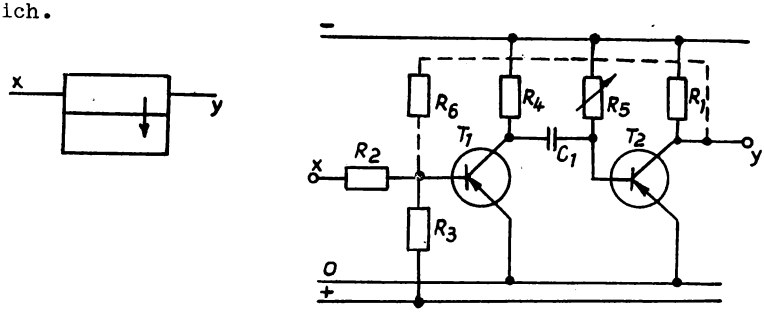


Abb. 5.54 Monostabile Kippstufe
(a: Schaltsymbol, b: Innenschaltung)

Zur Erzielung einer Ansprech- oder Abfallverzögerung wird die Kippstufe in Verbindung mit Logikgliedern betrieben. Abb. 5.55a zeigt die Schaltung zur Erreichung einer Ansprechverzögerung und Abb. 5.55b das zugehörige Zeitdiagramm.

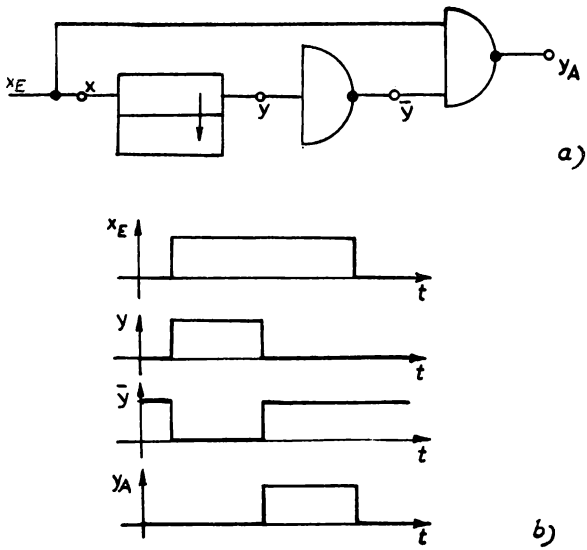


Abb. 5.55 Schaltung zur Erzielung einer Ansprechverzögerung
(a: Signalflußplan, b: Zeitdiagramm)

Erhält der Eingang x_E ein L-Signal, bekommt Y ein L-Signal, welches der nachgeschaltete Negator invertiert. Das Undglied hat demzufolge am Ausgang O-Signal. Nach Ablauf der eingestellten Verzögerungszeit erhält Y wieder O-Signal. Dieses wird negiert und beide Undgliedeingänge bekommen L-Signal. Damit hat auch Y_A ein L-Signal, welches solange bestehenbleibt, bis x_E wieder ein O-Signal erhält. Wird eine Abfallverzögerung benötigt, ist die Schaltung nach Abb. 5.56a zu verwenden. Das zugehörige Zeitdiagramm zeigt Abb. 5.56b.

Bei der Inbetriebnahme der Schaltung erhält die monostabile Kippstufe über den vorgeschalteten Negator ein L-Signal, ihre Verzögerungszeit läuft ab. Danach wird dauernd O-Signal an das

nachgeschaltete Oderglied gegeben. Sobald x_E L-Signal erhält, geht auch Y_A auf L. Gleichzeitig gibt der Negator O auf den Multivibrator, der dadurch zurückkippt. Sobald das L-Signal an x verschwindet, wird er wieder angesteuert, und gibt L-Signal an Y_A, welches nach Ablauf der eingestellten Verzögerungszeit wieder verschwindet.

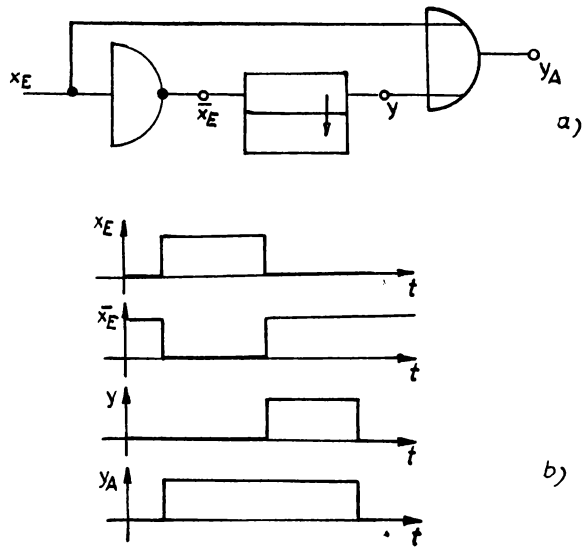


Abb. 5.56 Schaltung zur Erzielung einer Abfallverzögerung
(a: Signalflußplan, b: Zeitdiagramm)

5.3.2. Bauglieder mit pneumatischen Elementen

5.3.2.1. Allgemeines

Kontaktlose pneumatische Schaltsysteme können mit dem aus der Analogtechnik bekannten P-Glied aufgebaut werden, wenn dessen Verstärkung so hoch getrieben wird, daß sich annähernd eine Schaltcharakteristik ergibt. Diese Glieder haben aber relativ große Abmessungen und lassen nur geringe Schaltgeschwindigkeiten zu, so daß keine befriedigenden Lösungen erzielt werden

können. Es wurden deshalb pneumatische Elemente entwickelt, die speziell für den Einsatz in Schaltsystemen geeignet sind. Eines dieser pneumatischen Schaltsysteme verwendet zum Aufbau der kontaktlosen Steuerung ein "Doppelmembranrelais" und ein "Oderglied". Durch entsprechende Zusammenschaltung und Eingangsbelegung lassen sich mit diesen beiden Grundelementen alle logischen Verknüpfungen aufbauen.

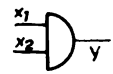
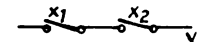
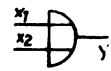
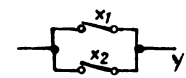
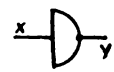
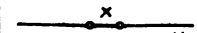
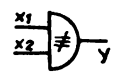
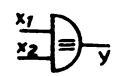
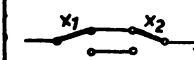
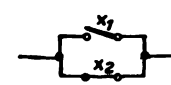
Der Vorteil eines derartigen pneumatischen Schaltsystems liegt insbesondere in der rationellen Fertigungsmöglichkeit, und damit verbundenen niedrigen Herstellungskosten, hohen Schaltgeschwindigkeit und Lebensdauer, Lageunabhängigkeit und Einsatzmöglichkeit in einem großen Temperaturbereich. Besonders wichtig ist die Einsetzbarkeit logischer pneumatischer Elemente in explosionsgefährdeten Anlagen.

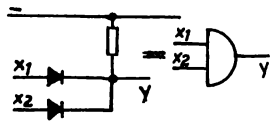
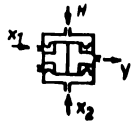
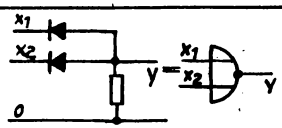
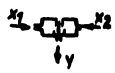
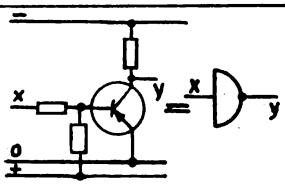
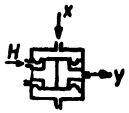
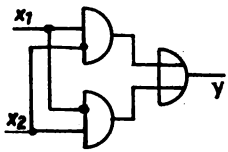
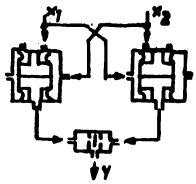
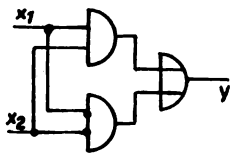
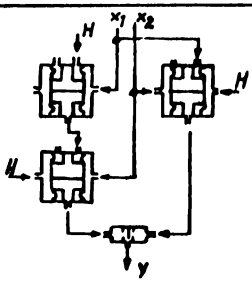
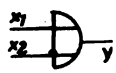
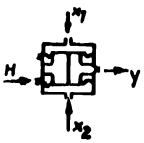
Als Nachteil ist lediglich die Verschmutzungsgefahr und die Ablagerung von Feuchtigkeit aus der Steuerluft zu erwarten. Die Elemente arbeiten mit einem Hilsdruck von 1 kp/cm^2 (Überdruck). Die logischen Signale 0 und L werden im pneumatischen Schaltsystem durch einen mehr oder minder hohen Druck dargestellt und zwar entspricht dem 0-Signal ein niedriger Druck und dem L-Signal ein entsprechend hoher Druck.

Die Signale werden zwischen den einzelnen Gliedern nicht wie bisher üblich mit Schläuchen übertragen, sondern über Schaltplatten aus denen die erforderlichen Verbindungswege ausgearbeitet sind.

Die logischen pneumatischen Glieder besitzen einen Ausgang und mehrere Eingänge. Für ihre Darstellung können deshalb die unter Punkt 5.3.1. für Undglied, Oderglied, Negator, Kippstufen und Zeitglied angegebenen Schaltsymbole verwendet werden.

In Tafel 5.2 sind die Schaltsymbole und Realisierungsmöglichkeiten der logischen Grundfunktionen mit Kontakten, elektrischen Logikgliedern und mit pneumatischen Logikgliedern zusammengefasst angegeben.

Bezeichnung der logischen Funktion	Schaltfunktion	Schaltsymbol	Realisierung durch Kontakte
Konjunktion	$y = x_2 \, x_1$		
Disjunktion	$y = x_2 \vee x_1$		
Negation	$y = \bar{x}$		
Antivalenz	$y = x_2 \not\equiv x_1$ $y = \bar{x}_2 x_1 \vee x_2 \bar{x}_1$		
Äquivalenz	$y = x_2 \equiv x_1$ $y = \bar{x}_2 \bar{x}_1 \vee x_2 x_1$		
Implikation	$y = x_2 \rightarrow x_1$ $y = \bar{x}_2 \vee x_1$	—	

Realisierung durch Dioden und Transistoren	Realisierung durch Doppelmembranrelais und Oderglieder
	
	
	
	
	
	

Doppelmembranrelais

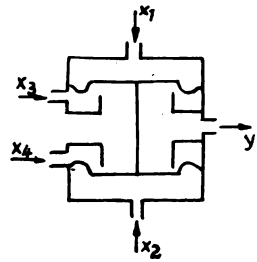


Abb. 5.57
Prinzipdarstellung eines Doppelmembranrelais

Das Doppelmembranrelais besteht gemäß Abb. 5.57 aus einem Gehäuse, welches durch die zwei miteinander verbundenen Membranen in insgesamt fünf Kammern geteilt wird. Die mittelste Kammer besitzt die Anschlußöffnung für den Ausgang Y, die daran angrenzenden solche für den Eingang x_3 bzw. x_4 und die äußersten für den Eingang x_2 bzw. x_1. Sind die von x_1 bzw. x_2 beaufschlagten Kammern drucklos, kann die von x_3 bzw. x_4 kommende Steuerluft die innere Kammer durchströmen und gelangt an den Ausgang, der damit L-Signal hat. Erhält die obere Kammer über x_1 Druck, wölbt sich die Membrane nach unten durch und schließt den Eingang x_3 von der Mittelkammer ab. x_3 hat dadurch keinen Einfluß mehr auf das Ausgangssignal, während x_4 weiterhin mit diesem in Verbindung steht. (Abb. 5.58a) Wird anstelle der oberen Kammer die untere über x_2 unter Druck gesetzt, wird der Eingang x_4 für die Bildung des Ausgangssignals unwirksam. Nur x_3 hat Verbindung mit Y. (Abb. 5.58b) Bei Druckbeaufschlagung der oberen und der unteren Kammer über x_1 und x_2 heben sich deren Membrankräfte auf. Durch den entweder an x_3 oder x_4 stehenden Eingangsdruck werden die Membranen in die in Abb. 5.58c bzw. 5.58d angegebenen Stellungen gebracht. Durch Anlegen bestimmter Eingangsdrücke x_1, x_2 ist es also möglich, den Durchgang der Eingangssignale x_3, x_4 freizugeben oder zu verhindern.

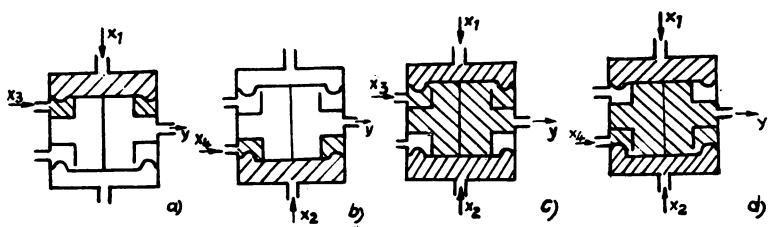


Abb. 5.58 Doppelmembranrelais mit verschiedenen Eingangsbelegungen

Die nutzbaren Schaltbelegungen des Doppelmembranrelais sind in Abb. 5.59 zusammengestellt.

x_4	x_3	x_2	x_1	Y
0	L	0	0	L
0	L	0	L	0
0	L	L	0	L
0	L	L	L	L
L	0	0	0	L
L	0	0	L	L
L	0	L	0	0
L	0	L	L	L

Abb. 5.59 Schaltbelegungstabelle für das Doppelmembranrelais

Im praktischen Einsatz des Doppelmembranrelais wird immer nur entweder x_3 oder x_4 als Eingang benutzt. Der zweite freiliegende Eingang dient zur Entlüftung der Mittelkammer beim Umschalten von L- auf O-Signal. Darauf wird speziell noch in Punkt 5.3.2.3. eingegangen.

5.3.2.2. Logische Verknüpfungsglieder

Oderglied

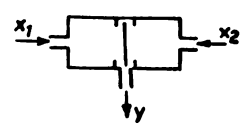


Abb. 5.60 Prinzipdarstellung des Oderg liedes

Das Oderglied besteht gemäß Abb. 5.60 aus einem Gehäuse mit einer verschiebbar angeordneten Dichtung. Beim Anlegen eines Eingangsdruckes an x_2 wird das Glied durchströmt und der Ausgang Y erhält L-Signal. Ist x_1 drucklos, bewegt sich die Dichtung nach links (Abb. 5.61a) und schließt nach x_1 ab. Dadurch kann in der an x_1 angeschlossenen Signalleitung kein Fehldruck entstehen. Abb. 5.61b zeigt den Fall, daß der Eingangsdruck nur über x_1 ansteht. Die Dichtung bewegt sich jetzt nach rechts und schließt x_2 ab. Haben x_1 und x_2 gemeinsam Eingangsdruck, bleibt die Dichtung in der Ausgangsstellung. (Abb. 5.61c) Das Glied erfüllt also die Schaltgleichung

$$Y = x_2 \vee x_1$$

Das Schaltverhalten des Odergliedes wird infolge seiner geringen Druckabhängigkeit von den angeschlossenen Doppelmembranrelais bestimmt.

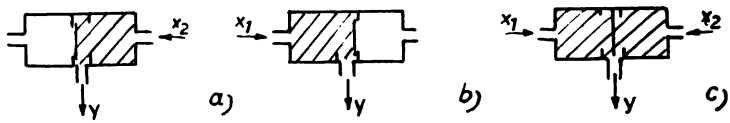


Abb. 5.61 Oderglied mit verschiedenen Eingangsbelegungen

Undglied

Abb. 5.62 zeigt ein als Undglied geschaltetes Doppelmembranrelais. Haben die Eingänge x_1 und x_2 O-Signal, werden die Membranen durch den anstehenden Hilfsdruck nach unten gedrückt. Die Mittelkammer wird dadurch mit der Außenluft At verbunden und der Ausgang Y hat O-Signal. Durch ein L-Signal am Eingang x_1 können die Membranen infolge der unterschiedlich großen Membranflächen nicht angehoben werden, und an Y bleibt weiterhin O-Signal. Erhält auch der Eingang x_2 L-Signal, überwiegen die nach oben gerichteten Kräfte. Die Mittelkammer wird dadurch mit dem Hilfsdruck verbunden und von der Außenluft getrennt. Der Ausgang Y erhält L-Signal. Sobald das Eingangssignal an x_2 wieder verschwindet, werden die Membranen vom Hilfsdruck wieder nach unten gedrückt. Die Mittelkammer wird vom Eingang x_1 getrennt und mit der Atmosphäre verbunden. Dadurch kann sie entlüften und der Ausgang Y erhält O-Signal. Das Glied erfüllt also die Schaltgleichung

$$Y = x_2 x_1$$

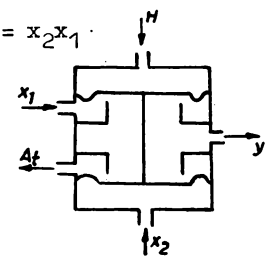


Abb. 5.62 Undglied (H: Hilfsdruck, At: Atmosphärendruck)

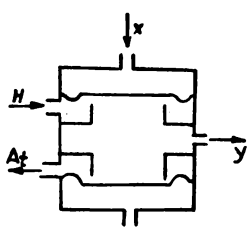


Abb. 5.63 Negator (H:Hilfsdruck, At: Atmoshärendruck)

Negator

Ein als Negator geschaltetes Doppelmembranrelais zeigt Abb. 5.63. Hat der Eingang x L-Signal, werden die beiden Membranen nach unten gedrückt, so daß die Mittelkammer vom Hilfsdruck getrennt und mit der Außenluft verbunden wird. Der Ausgang Y hat demzufolge O-Signal. Verschwindet das L-Signal am Eingang x, werden die Membranen vom Hilfsdruck hochgehoben. Infolge der vorhandenen Strömungswiderstände wirkt in allen Zwischenstellungen der Membranen bei gleichen wirksamen Flächen derselben, auf die obere ein höherer Druck.

Die Membranen erreichen dadurch die Endstellung, bei der die Mittelkammer von der Außenluft getrennt und mit dem Hilfsdruck verbunden ist.

In der Einstellung hat die obere Membrane eine größere wirksame Fläche als die untere. Dadurch entsteht bei gleichem Druck an den Membranen eine Kraft, die die einmal eingenommene Stellung aufrecht erhält. Der Ausgang Y hat L-Signal. Bekommt der Eingang wieder ein L-Signal, überwiegen die nach unten gerichteten Kräfte, so daß die Mittelkammer wieder vom Hilfsdruck getrennt und mit der Außenluft verbunden wird. Dadurch kann die Mittelkammer entlüften und der Ausgang Y erhält wieder O-Signal.

Das Doppelmembranenrelais verwirklicht also in dieser Schaltung eine Negatorfunktion.

$$Y = \bar{x}$$

5.3.2.3. Zusammenschaltung von mehreren logischen Verknüpfungsgliedern

Ein pneumatisches Schaltsystem kann nur dann einwandfrei arbeiten, wenn für eine gute Entlüftung der Glieder und der daran angeschlossenen Schaltverbindungen gesorgt wird. Ist die Entlüftung nicht möglich, kann sich der Druck in einer vom Eingangs- oder Hilfsdruck getrennten Kammer nicht abbauen und der Übergang zum O-Signal ist nicht möglich.

Zur Erläuterung der Wirkungsweise der Entlüftung wird nochmals das in Abb. 5.62 dargestellte Undglied betrachtet. Haben x_1 und x_2 L-Signal, sind die Membranen angehoben und der Ausgang hat L-Signal. Die Verbindung der Mittelkammer mit der atmosphärischen Außenluft ist durch die untere Membrane verschlossen. Erhält der Eingang x_2 O-Signal bewegt sich die Membrane nach unten. Bevor durch die obere Membrane der Eingang x_1 von der Mittelkammer getrennt wird, steht dieser auch kurzzeitig mit der Außenluft in Verbindung. Da der Umschaltvorgang jedoch schnell erfolgt, ist der Luftverlust nicht groß und der Druck des Eingangssignals x_1 bricht nicht zusammen. Sobald die Membranen die untere Endstellung erreicht haben, wird x_1 abgetrennt und das Glied kann entlüften. Aus dieser Wirkungsweise ist zu erkennen, daß die pneumatischen Logikglieder keinen dauernden Luftverbrauch haben. Es ergeben sich deshalb für die pneumatischen Bauglieder sehr einfache Zusammenschaltungsregeln.

Es soll lediglich keine zu große Anzahl passiver Glieder hintereinander geschaltet werden und die Ausgänge der Speicher dürfen nicht so stark belastet werden, daß der Ausgangsdruck beim Füllen der angeschlossenen Volumen die Selbsthaltung des Speichers nicht mehr ermöglicht. Es ist zweckmäßig, den Speicher gegen ein abgeschlossenes Volumen arbeiten zu lassen. Sind vom Ausgangssignal des Speichers große Volumen zu füllen, ist die Zwischenschaltung eines aktiven Trennngliedes zweckmäßig.

Die Eingangsbelegung des Doppelmembranrelais ist stets so zu wählen, daß in den Arbeitsstellungen des Gliedes immer einer der zwei an der Mittelkammer angebrachten Eingänge geschlossen ist.

5.3.2.4. Speicherglied

Der Speicher kann, wie Abb. 5.64 zeigt, leicht aus zwei Doppelmembranrelais zusammengeschaltet werden. Wird bei der Inbetriebsetzung der Steueranlage der Hilfsdruck auf die Doppelmembran-

relais gegeben, versuchen zunächst beide Ausgänge L-Signal zu erhalten, da der Hilfsdruck ungehindert an die Ausgänge gelangt. Infolgedessen erhalten die Membranen beider Relais Druck und versuchen zu schließen. Dieses geschieht aber mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, so daß die Sperrung eines Relais gebremst wird, und sich ein stabiler Zustand einstellt. Dieser möge sein: Y_1: O-Signal und Y_2: L-Signal. In diesem Schaltzustand ist durch die unter Druck stehende untere Membrane des Doppelmembranrelais R_1 der Durchlaß von Steuerluft zum Ausgang Y_1 gesperrt. Dagegen ist R2 geöffnet und Y_2 erhält Hilfsdruck zum Aufbau des L-Signals.

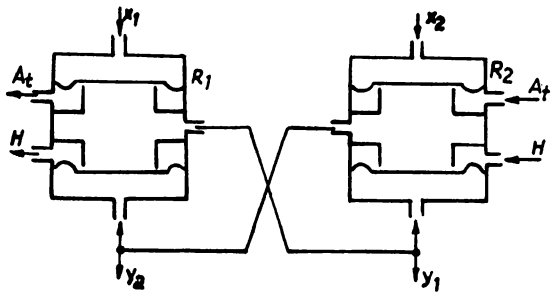


Abb. 5.64 Bistabile Kippstufe
(H: Hilfsdruck, At: Atmosphärendruck)

Wird an den Eingang x_1 L-Signal gegeben, öffnet R1 etwas und der Druck an Y_1 steigt. Dadurch wird die Membrane in R2 angehoben, der Luftdurchgang gedrosselt und das Signal an Y_2 verringert sich. Dieses bewirkt eine Erhöhung der Druckdifferenz an den Membranen von R1 wodurch dieses weiter öffnet und der Druck an Y_1 weiter steigt. Das geht solange fort, bis Y_1 L-Signal und Y_2 O-Signal hat. Infolge der gegenseitigen Unterstützung beider Doppelmembranrelais erfolgt der Umschaltvorgang sehr schnell und die Ausgangssignale haben steile Flanken. Der eingenommene Zustand ist stabil und bleibt solange bestehen, bis durch ein L-Signal am Löscheingang x_2 eine neue Umschaltung eingeleitet wird. Durch diese öffnet R2 und der Druck an Y_2 steigt an. Dieses leitet das Schließen von R1 ein, wodurch der Druck an Y_1 abnimmt, bis R2 vollständig geöffnet

und R1 geschlossen ist. Dieser Zustand ist ebenfalls stabil und dauert bis zur Eingabe eines neuen Speicherkommandos an.

5.3.2.5. Zeitglied

Zeitglieder für kurze Verzögerungszeiten können aus zwei Doppelmembranrelais mit zwischengeschaltetem Speichervolumen gemäß Abb. 5.65 aufgebaut werden. Hat der Eingang x 0-Signal, wird das Speichervolumen mit einer sehr kleinen Zeitkonstante gefüllt, da im Doppelmembranrelais nur geringe Strömungswiderstände auftreten. Die Membrane in R2 steht dadurch unter Druck und der Ausgang wird vom Hilfsdruck getrennt. Erhält der Eingang x L-Signal, wird der Hilfsdruck vom Speichervolumen getrennt. Über den an R1 angebrachten Strömungswiderstand gleicht sich der Druck des Speichers aus und unterschreitet nach einiger Zeit den Schaltdruck von R2. Dadurch wird der Ausgang mit der Hilfsdruckleitung verbunden und Y erhält L-Signal. Verschwindet das L-Signal an x wieder, wird das Speichervolumen mit kleiner Zeitkonstante gefüllt, R2 schließt wieder und Y geht auf 0.

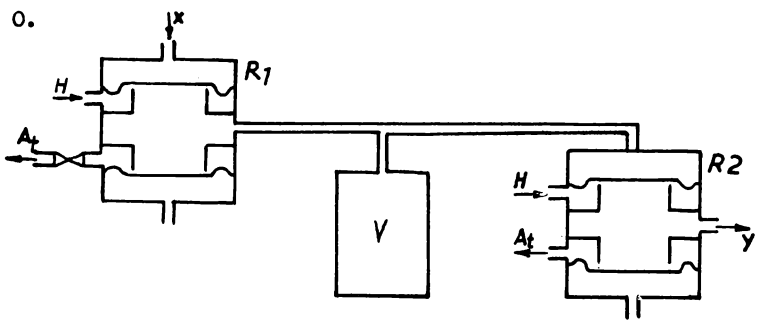


Abb. 5.65 Zeitglied mit Ansprechverzögerung
(H: Hilfsdruck, At: Atmosphärendruck)

Zur Erreichung von größeren Verzögerungszeiten müssen Impulsgeber mit nachgeschaltetem pneumatisch-mechanischem Schaltwerk aufgebaut werden.

5.4. Entwurf von Steueranlagen

5.4.1. Einteilung der Steuerungen

In jeder Steuerung können im Prinzip zwei Teile unterschieden werden, nämlich die Steuerstrecke und die Steuereinrichtung. Beide sind durch das Stellglied miteinander verbunden. Die Steuerstrecke verkörpert den Teil der Steueranlage, in dem sich die aufgabengemäß zu beeinflussenden Glieder befinden. Die Beeinflussung des Energie- oder Massenstromes der Steuerstrecke erfolgt durch das Stellglied, dessen Antrieb schon zur Steuereinrichtung gehört. In der Steuereinrichtung werden die zur Beeinflussung der Steuerstrecke erforderlichen Signale gebildet. Meßeinrichtungen und sonstige Eingangsglieder gehören ebenfalls zur Steuereinrichtung.

Die Einteilung der Steuerungen ist nach sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten möglich, wobei sich die einzelnen Möglichkeiten keinesfalls gegenseitig ausschließen.

Nach der Wirkungsweise kann in stetige und unstetige Steuerungen unterschieden werden. Stetige Steuerungen werden nur recht selten angewendet. Unstetige Steuerungen sind dagegen zu einer hohen Vollkommenheit entwickelt worden und sind zur Automatisierung vieler technischer Prozesse eingesetzt. Unstetige Steuerungen sind in der Mehrzahl Binärsteuerungen.

Eine weitere Einteilung ist möglich nach der Art der verwendeten Hilfsenergie in

mechanische Steuerungen
pneumatische Steuerungen
hydraulische Steuerungen
elektrische Steuerungen.

Auf Grund vieler Vorteile überwiegt die Anzahl der elektrischen Steuerungen stark gegenüber den übrigen. In besonderen Fällen lassen sich aber auch mit pneumatischen, hydraulischen und mechanischen Steuerungen einfache und zweckmäßige Lösungen schaffen, die elektrischen Steuerungen überlegen sind.

Beispielsweise ist der Einsatz von nichtelektrischen Steuerun-

gen für explosionsgefährdete Anlagen wie Treibstofftanks, Farbenlager u.a. sehr zu empfehlen.

Weiterhin ist eine Einteilung nach der Art der gesteuerten Größe möglich. Als Beispiele sind zu nennen:

Mengensteuerung
Drucksteuerung
Spannungssteuerung

Eine andere Einteilung erfolgt unter Bezugnahme auf die Steuerentfernung in:

vor Ort Steuerung
Nahsteuerung
Fernsteuerung

Die nächste Möglichkeit ist die Einteilung in:

nichtselbsttätige Steuerung (Handsteuerung)
selbsttätige (automatische) Steuerung

Bei der Handsteuerung wird mindestens ein Glied der Steuerkette durch den Menschen verkörpert. Eine Bedienungsperson erhält beispielsweise durch geeignete Meßgeräte Informationen über den Zustand der Steuerstrecke. Sie vergleicht die Informationen mit den ihr bekannten Parametern für eine einwandfreie Prozeßführung und wirkt gegebenenfalls durch Betätigung eines Stellgliedes auf die Steuerstrecke ein. Der Mensch übernimmt so die Aufgabe der Steuereinrichtung. Abb. 5.66 zeigt das Wirkungsschema einer Handsteuerung.

Bei der selbsttätigen Steuerung werden alle Vorgänge nur durch Geräte ausgeführt. Von einer selbsttätigen Steuerung spricht man auch dann, wenn sie durch ein von Hand eingegebenes Signal in Betrieb gesetzt wird und dann automatisch abläuft. Dieses ist z.B. bei Aufzugssteuerungen der Fall, wenn der Förderkorb nach Betätigung einer Stationstaste selbsttätig bis zur vorgewählten Etage bewegt wird.

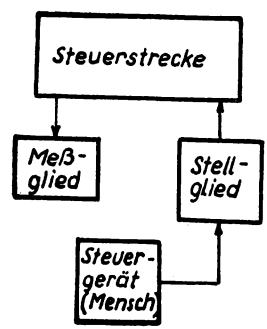


Abb. 5.66
Wirkungsschema einer Handsteuerung

Als weitere Möglichkeit kommt die Einteilung der Steuerungen nach ihrer Funktion in Betracht. Es werden unterschieden:

Führungssteuerungen (Folgesteuerungen)
Speichersteuerungen
Programmsteuerungen

Programmsteuerungen können weiter unterteilt werden in:

Zeitplansteuerungen
Wegplansteuerungen
Ablaufsteuerungen

Bei der Führungssteuerung erfolgt die Beeinflussung der Steuerstrecke nur durch die Führungsgröße. Dabei wird die Führungsgröße von der Strecke nicht beeinflußt, sondern entweder manuell eingestellt oder durch übergeordnete Einrichtungen vorgegeben. Als eine solche ist beispielsweise das Musterstück einer Kopierdrehmaschine anzusehen, dessen Form auf die Drehteile zu übertragen ist.

Das Wirkungsschema einer Führungssteuerung zeigt Abb. 5.67.

Speichersteuerungen sind eine Abart der Führungssteuerungen. Bei Speichersteuerungen bleibt nach Fortnahme der Führungsgröße der gerade erreichte Wert erhalten, bis durch Abgabe eines neuen Signals (von einer weiteren Führungsgröße) der Speicher im Steuergerät gelöscht wird. Die Ausgangsgröße kann dadurch entweder die Ausgangslage oder eine andere Speicherstellung einnehmen.

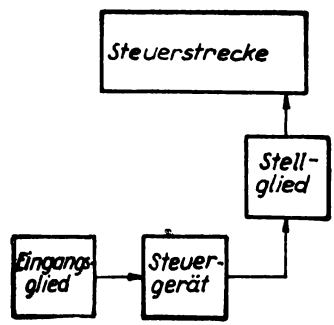


Abb. 5.67
Wirkungsschema einer Führungssteuerung

Bei der Programmsteuerung erfolgt die Veränderung der Stellgröße durch ein festgelegtes Programm, welches in einem übergeordneten Gerät gespeichert ist und für die Beeinflussung des Prozesses zur Verfügung steht.

Bei der Zeitplansteuerung erfolgt die Beeinflussung der Steuerstrecke durch einen Zeitplan. Dieser ist im Programmgeber in der

Form von mit konstanter Geschwindigkeit laufenden Kurvenscheiben, Magnetbändern, Lochstreifen o.ä. gespeichert. Der Ablauf des Programmes wird entweder durch ein Auslösesignal eingeleitet oder es läuft dauernd, wenn sich an das Ende des Programms dessen Anfang sofort wieder anschließt.

Bei der Wegplansteuerung ist zum Unterschied zur Zeitplansteuerung ein Wegprogramm für die Auslösung des Steuersignals verantwortlich.

Das Wirkungsschema einer Zeit- bzw. Wegplansteuerung zeigt Abb. 5.68.

Bei der Ablaufsteuerung ist die Durchführung des Steuerprogramms vom funktionellen Ablauf des Prozesses abhängig. Durch den Prozeß kann beispielsweise der Ablauf einer im Programmgeber gespeicherten Schaltfolge ausgelöst werden oder der Programmgeber dient zur Zuordnung bestimmter Größen der Steuerung. In Abb. 5.69 ist das Wirkungsschema einer Ablaufsteuerung dargestellt.

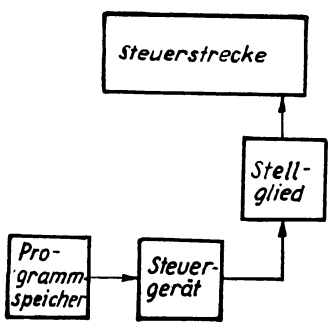


Abb. 5.68
Wirkungsschema einer Zeit- bzw. Wegplansteuerung

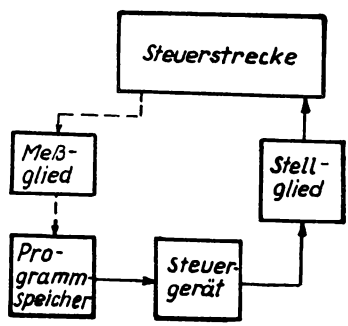


Abb. 5.69
Wirkungsschema einer Ablaufsteuerung

5.4.2. Beispiel Steuerung eines Filters

5.4.2.1. Aufgabenstellung

Für den Entwurf einer Steueranlage muß immer eine Aufgabenstellung vorhanden sein, in der die erforderliche Beeinflus-

sung der Steuerstrecke genau beschrieben ist. Zum besseren Verständnis ist der Textteil durch Skizzen, Bauzeichnungen und andere technische Unterlagen zu ergänzen. Als Aufgabenstellung soll gegeben sein:

Für den in Abb. 5.70 prinzipiell dargestellten Filter zur Aufbereitung von Wasser ist eine elektrische Steueranlage für das Öffnen und Schließen der bezeichneten Ventile zu entwerfen. Während der Aufbereitungszeit wird dem Filter durch Ventil V1 Wasser zugeführt, welches durch V2 in die Nutzwasserleitung gelangt. Bei diesem Vorgang wird die Filtersubstanz langsam verbraucht und muß von Zeit zu Zeit regeneriert werden. Die Verbrauchszeit ist vom Wasserdurchsatz während der Aufbereitungszeit abhängig und nicht konstant.

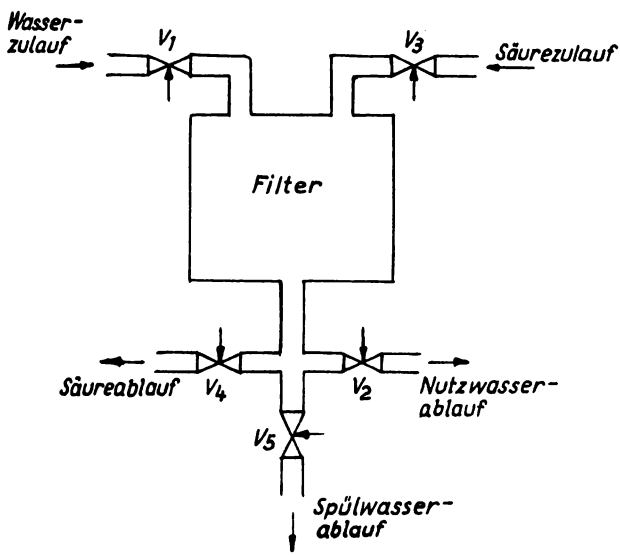


Abb. 5.70 Skizze zur Aufgabenstellung für Filtersteuerung

Die Regenerierung der Filtersubstanz geschieht durch eine Säure, welche nach Öffnen der Ventile V3 und V4 den Filter durchläuft. Vor dem Öffnen dieser Ventile müssen V1 und V2 geschlossen werden.

Die Regenerierung ist nach 80 Sekunden beendet und V3 und V4 können wieder geschlossen werden. Als nächstes ist der Filter zu spülen. Dazu werden die Ventile V1 und V5 geöffnet. Ventil V1 wird nach 20 Sekunden und V5 nach 30 Sekunden wieder geschlossen. Durch die verlängerte Öffnungszeit von V5 kann alles Spülwasser sicher ablaufen. Nach dem Schließen von V5 ist der Regenerierungsprozeß beendet und nach Öffnen von V1 und V2 kann wieder Wasser aufbereitet werden.

Alle Ventile benötigen zum Öffnen und zum Schließen eine Laufzeit von 10 Sekunden, und werden von Drehstrom-Kurzschlußläufermotoren angetrieben. Zur Veranschaulichung des Gesagten dient das Ventilstellungsdiagramm Abb. 5.71.

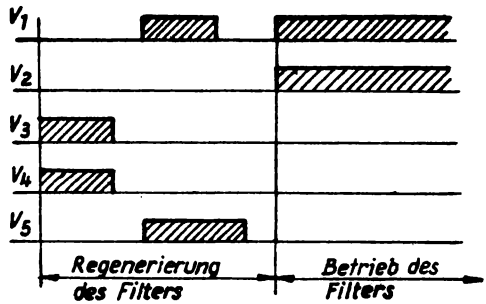


Abb. 5.71 Ventilstellungsdiagramm zur Aufgabenstellung der Filtersteuerung

5.4.2.2. Anlagenskizze

Die Bearbeitung einer Steuerungsaufgabe beginnt man zweckmäßig mit der Anfertigung einer Skizze der zu steuernden Anlage. Diese dient zur Veranschaulichung der technischen Ausführung von interessierenden Anlagen, Anlagenteilen, Maschinen oder Geräten und gibt Auskunft über das Zusammenwirken der einzelnen Funktionseinheiten bzw. über den technologischen Ablauf des Prozesses. Die beabsichtigte Beeinflussung des Prozesses muß in der Anlagenskizze bereits prinzipiell zum Ausdruck kommen.

In der Aufgabenstellung wurde gesagt, daß die Dauer der Nutzwasseraufbereitung nicht konstant ist, der Regenerierungsvorgang jedoch immer nach dem gleichen Programm mit festliegenden Zeiten abläuft.

Die Anlage kann demzufolge als Zeitplansteuerung aufgebaut werden. Für die Einleitung des Programmablaufes wird in die Nutzwasserleitung ein Meßglied eingebaut, welches z.B. den Restgehalt an Kieselsäure überwacht, und bei Erreichen eines eingestellten Wertes ein Signal abgibt. Durch dieses Signal wird der Programmgeber ausgelöst und die für einen Regenerierungsvorgang erforderlichen Kommandos gegeben.

Nach diesen Festlegungen kann die Anlagenskizze Abb. 5.72 gezeichnet werden.

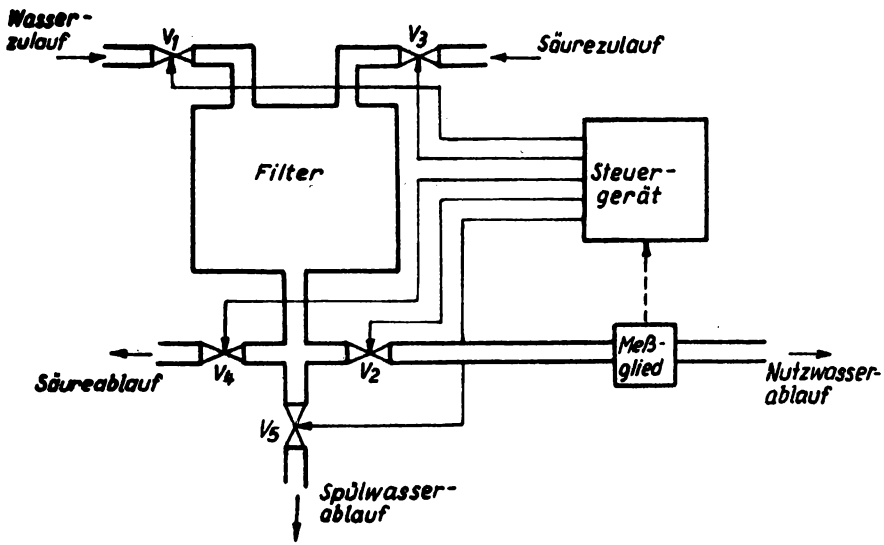


Abb. 5.72 Anlagenskizze für Filtersteuerung

5.4.2.3. Wirkungsschema

Als nächster Bearbeitungsschritt wird ein Wirkungsschema aufgestellt. Dieses zeigt den prinzipiellen Aufbau der Steuerkette,

indem einzelne Bauglieder, Teile oder Kombinationen derselben, zu Blöcken zusammengefaßt werden. Die Blöcke werden durch Wirkungslinien miteinander verbunden, an denen die Wirkungsrichtung der Steuerkette durch Pfeile angegeben wird. Diese Angabe ist möglich, da alle Signale gerichtete Größen sind.

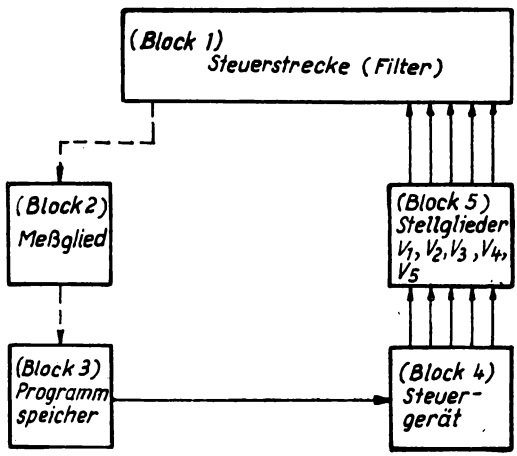


Abb. 5.73 Wirkungsschema für Filtersteuerung

In Abb. 5.73 verkörpert der Block 1 die Steuerstrecke. Steuerstrecke ist in diesem Beispiel der Filter, denn in ihm findet die aufgabengemäße Beeinflussung des Prozesses statt. Die Überwachung des Prozesses erfolgt durch das Meßglied im Block 2. Verändern sich die Prozeßdaten über die im Meßglied eingestellten Grenzen hinaus, wird ein Signal an den im Block 3 dargestellten Programmspeicher gegeben, der nun entsprechend seiner Programmierung Befehle an das Steuergerät gibt. Das Steuergerät im Block 4 beinhaltet alle Einrichtungen zur Weiterleitung der Programmspeichersignale an die Stellglieder. Zum Steuergerät gehören die Schaltschütze der Ventilantriebsmotoren, die Motoren selbst sowie die Endlagenschalter zur Anzeige der Ventilendstellungen. Die Ausgänge des Steuergerätes, die Drehbewegungen für die Ventile, werden auf die Stellglieder im Block 5 gegeben. Als Stellglieder sind die Ventile V1...V5 anzusehen. Die Aus-

gangssignale der Stellglieder sind die Eingangssignale der Steuerstrecke und greifen demzufolge im Block 1 an.

Die in Abb. 5.75 gestrichelt eingetragenen Wirkungslinien deuten an, daß die Wirkungswege an diesen Stellen nur kurzzeitig geschlossen sind.

5.4.2.4. Schaltfolgediagramm

Das Schaltfolgediagramm ist eine notwendige Ergänzung bei unstetigen Steuerungen und legt den funktionellen oder zeitlichen Ablauf des Steuervorganges fest.

Im Schaltfolgediagramm wird für Öffnen und Schließen jedes Ventils auf der Ordinate eine Zeile vorgesehen. Wird das Schaltfolgediagramm für den funktionellen Ablauf des Steuervorganges gezeichnet, erfolgt die Teilung der Abszisse in gleichgroße Spalten für die Schalttakte.

Grundlage für die Erstellung des Schaltfolgediagramms ist das Ventilstellungsdiagramm in Abb. 5.71.

Nachdem das Meßglied ein Signal zur Einleitung des Programmablaufes gegeben hat, ist zuerst die Wasseraufbereitung durch Schließen der Ventile V1 und V2 zu unterbrechen. Dieses wird im Takt 1 des Schaltfolgediagramms durch Striche in der Zeile von Ventil V1 schließen und V2 schließen dargestellt. Da das Schaltfolgediagramm für den funktionellen Steuerungsablauf und nicht für den zeitlichen gezeichnet wird, hat die Länge des eingezeichneten Striches keinen definierten Zeitinhalt, sondern sagt nur, daß ein Signal zum Schließen der Ventile V1 und V2 gegeben werden muß. Der anschließende Leertakt 2 muß deshalb auch keinesfalls so lange dauern, wie die anderen Takte.

Gemäß Aufgabenstellung und Ventilstellungsdiagramm sind nun die Ventile V3 und V4 zu öffnen. Dieses wird als Takt 3 in das Schaltfolgediagramm eingetragen.

Das Einzeichnen der nächsten Takte für Ventile V3 und V4 schließen und V1 und V5 öffnen erfolgt in gleicher Weise wie bisher. Beim Schließen der Ventile V1 und V5 ist zu beachten,

daß nach Aufgabenstellung Ventil V5 erst 10 Sekunden nach V1 schließen soll. Wenn auch der zeitliche Unterschied von 10 Sekunden nicht in das Schaltfolgediagramm eingeht, kann das Schließen von V1 und V5 nicht im gleichen Schalttakt eingezeichnet werden.

Das Öffnen von V1 und V2 erfolgt wieder zusammen und wird im gleichen Schalttakt eingetragen. Abb. 5.74 zeigt das Schaltfolgediagramm für den funktionellen Steuerungsablauf.

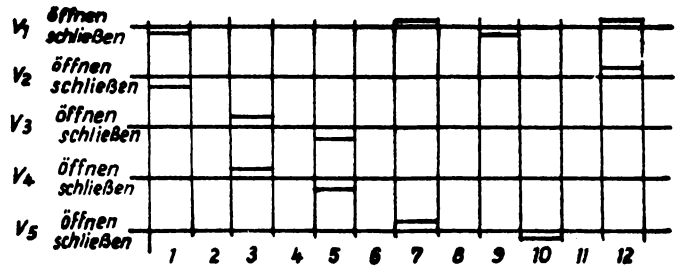


Abb. 5.74 Schaltfolgediagramm für funktionellen Ablauf des Steuervorganges

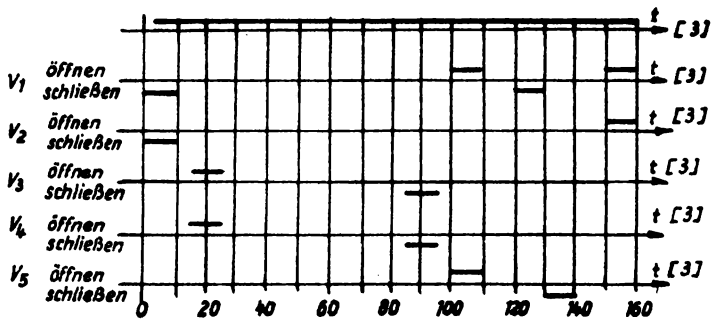


Abb. 5.75 Schaltfolgediagramm für zeitlichen Ablauf des Steuervorganges

Wird das Schaltfolgediagramm für den zeitlichen Ablauf des Steuervorganges gezeichnet, entsteht Abb. 5.75. Die Abszisse des Diagramms erhält jetzt einen geeigneten Zeitmaßstab. Die Einteilung der Ordinate bleibt unverändert. Der Aufbau des Diagramms erfolgt prinzipiell genauso, wie das für den funktio-

nellen Ablauf des Steuervorganges beschrieben wurde, jedoch unter Berücksichtigung der in der Aufgabenstellung genannten Zeiten. Auch hier werden Leerzeiten vorgesehen, um Laufüberschneidungen zu verhindern, wenn ein Ventil aus irgendwelchen Gründen einmal eine längere Verstellzeit benötigt.

Nach Aufstellung des Schaltfolgediagramms ist ein als Programmspeicher geeignetes Gerät auszuwählen. Eingesetzt werden können z.B. Magnetband, Lochkate, Kontaktwalze. Die Kontaktwalze ist das einfachste unter den aufgezählten Geräten und reicht zur Speicherung des benötigten Programms aus. Sie besteht im Prinzip aus einer, meist durch einen kleinen Synchronmotor angetriebenen, Walze mit isoliert aufgesetzten Kontakten oder einer Nockenwelle, welche in Abhängigkeit der Nockenstellung die Kontakte betätigt. Die Abwicklung der Walze wird meist so vorgenommen, daß das Programm entsprechend der in Abb. 5.75 eingetragenen Zeiten auf dem vollen Walzenumfang verteilt wird. Demnach muß die Walze in 160 s einmal umlaufen.

5.4.2.5. Stromlaufplan

Der Stromlaufplan ist eine nach Stromwegen aufgelöste Darstellung der Schaltung mit allen Einzelteilen und Leitungen. Zum vollständigen Stromlaufplan gehören demzufolge alle Geräteangaben. Ihre Eintragung wird jedoch hier nicht vorgenommen, da auf die Geräteauswahl und -dimensionierung in diesem Abschnitt nicht eingegangen wird.

Der Stromlaufplan wird immer entsprechend des funktionellen Steuerungsablaufes so dargestellt, daß alle konjunktiv zu verknüpfenden Variablen in einem Stromweg untereinander und alle disjunktiv zu verknüpfenden Variablen in Stromwegen nebeneinander angeordnet werden. Die zu betätigenden Antriebsorgane wie Schütz- und Relaisspulen, Antriebsmotoren von Zeitschaltwerken u.ä. werden am unteren Ende des Stromweges eingefügt. Für alle Antriebsorgane wird unter den jeweiligen Stromwegen angegeben, wo sich die zugehörigen Schaltkontakte befinden. Die Bezeichnung der Geräte sowie ihre Darstellung erfolgt nach

den einschlägigen Vorschriften und Standards.

Entsprechend dem bisher gesagten befindet sich der Kontakt des Meßgliedes e1 im ersten Stromweg. Er dient zur Einschaltung des Programmgebermotors. Da sich der Kontakt des Meßgliedes während des Programmablaufes wieder öffnet, muß durch eine zusätzliche Kontaktbahn des Programmgebers dessen ununterbrochene Stromversorgung garantiert werden. Diese Kontaktbahn ist in Abb. 5.75 oben eingezeichnet. Sie schließt sofort nach Ablauf des Programmgebers und öffnet erst wieder nach erfolgtem vollständigen Durchlauf.

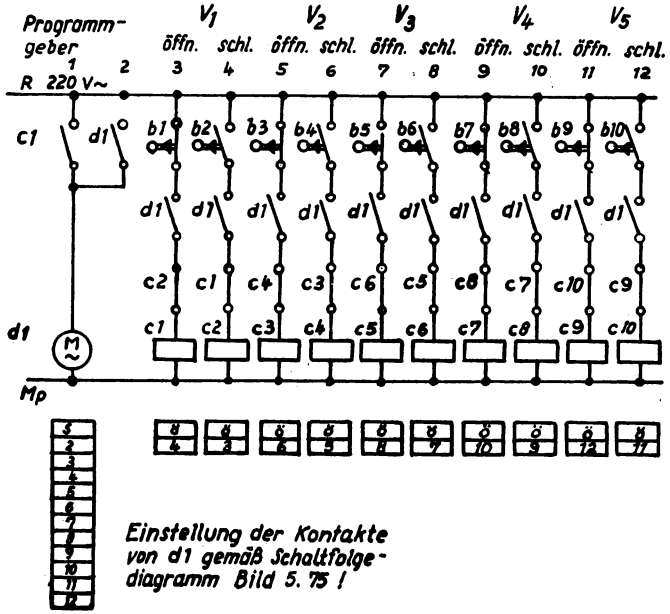


Abb. 5.76 Stromlaufplan für Filtersteuerung (d1: Programmgeber, e1: Meßglied, b1...b10: Endlagenschalter an den Ventilen, c1...c10: Schaltschütze für Antriebsmotoren der Ventile)

Die übrigen Kontakte des Programmgebers schalten in Abhängigkeit der Walzenstellung die Schaltschütze für die Ventilantriebsmotoren. Um die Ventile nicht über die jeweiligen End-

stellungen hinwegzufahren, unterbrechen die Endlagenschalter b1...b10 den Steuerstrom für das zugehörige Schaltschütz, sobald die Endstellung erreicht worden ist. Die Einstellung des Programmgebers wird dadurch unkritisch, da länger Kontakt gegeben werden kann als das für den Schließvorgang erforderlich ist und geringe Laufzeitunterschiede ausgeglichen werden. Mit den im Stromweg liegenden Schützkontakten wird eine Verriegelung mit der Gegendrehrichtung des Antriebes erreicht. Auf den Einbau weiterer Verriegelungen wie Überlastschutz, Sicherstellung zum Erreichen der Ventilendstellung u.ä. wurde der Einfachheit halber verzichtet.

5.4.2.6. Wirkschaltplan

Während der Stromlaufplan nur die unmittelbaren Schaltabhängigkeiten zeigt, wird im Wirkschaltplan die gesamte Schaltung der Haupt- und Steuerstromkreise mit allen Einzelteilen und Leitungen angegeben. Im Gegensatz zum Stromlaufplan wird jedes Gerät zusammenhängend dargestellt und die Unterbringungsorte der Geräte prinzipiell berücksichtigt.

Abb. 5.77 zeigt den Wirkschaltplan, jedoch nur dargestellt für einen Ventilantrieb und ohne Geräteangaben. Aus der Darstellungsweise geht hervor, daß sich Hauptschalter, Sicherungen, Schaltschütze und Programmgeber in einem Schaltschrank befinden, während die Ventilantriebe, Endlagenschalter und die Meßeinrichtung außerhalb des Schrankes angeordnet sind.

In der Praxis wird sehr oft kein Wirkschaltplan, sondern nur ein Stromlaufplan angefertigt. Dieser muß aber dann durch die Darstellung der Hauptstromkreise und Angabe der Geräteunterbringungsorte erweitert werden.

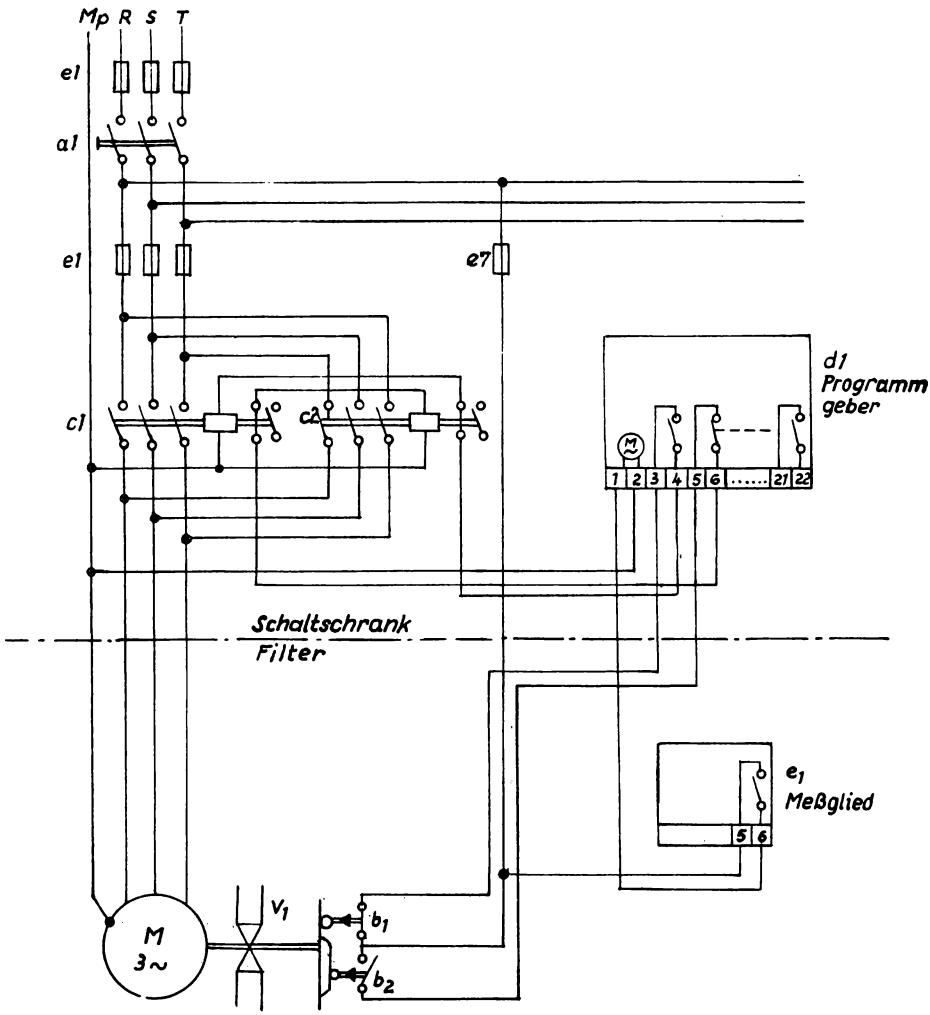


Abb. 5.77 Wirkschaltplan für Filtersteuerung

5.4.3. Beispiel Steuerung in einer Transportanlage

Die Aufgabenstellung lautet: In einer bereits in Betrieb befindlichen Transportanlage können vier Zuförderbänder X1, X2, X3, X4 ein Abförderband beschicken. Da dieses nur die doppelte Förderkapazität der Zubringerbänder hat, treten bei der Einschaltung von mehr als zwei Zuförderbändern Verstopfungen des Abförderbandes ein. Es ist eine geeignete Sperrschaltung zu entwerfen, durch die die Einschaltung eines dritten Bandes verhindert wird. Die Sperre soll durch Ansprechen eines Relais, welches die Leitungen von den Eintasten unterbricht, wirksam werden.

Die Bearbeitung beginnt genauso wie in 5.4.2., mit der Anfertigung einer Anlagenskizze und eines Wirkungsschemas auf dessen Darstellung jedoch aus Platzmangel verzichtet wird. Als nächstes wird aber kein Schaltfolgediagramm, sondern eine Schaltbelegungstabelle angefertigt. Dieser Unterschied ergibt sich, da die Filtersteuerung eine Folgeschaltung war, während wir jetzt eine Kombinationsschaltung vorliegen haben.

5.4.3.1. Schaltbelegungstabelle

In der Schaltbelegungstabelle werden alle möglichen Kombinationen der vorhandenen Eingangsgrößen eingetragen und angegeben für welche Kombination die Ausgangsgröße gemäß Aufgabenstellung 0-Signal bzw. L-Signal hat.

x_4	x_3	x_2	x_1	Y
0	0	0	0	0
0	0	0	L	0
C	0	L	L	L
0	0	L	L	L
0	L	0	0	0
0	L	0	L	L
0	L	L	0	L
0	L	L	L	L
L	0	0	0	0
L	0	0	L	L
L	0	L	0	L
L	0	L	L	L
L	L	0	0	L
L	L	0	L	L
L	L	L	0	L
L	L	L	L	L

Abb. 5.78
Schaltbelegungstabelle für Transportbandverriegelung

Entsprechend den vorhandenen vier Zuförderbändern ergeben sich $2^4 = 16$ Betriebsvarianten, die in der Schaltbelegungstabelle Abb. 5.78 dargestellt sind. In der Spalte Y sind die Varianten mit L angegeben, für die das Sperrelais aufgabengemäß ansprechen muß. Durch die disjunktive Verknüpfung dieser Betriebsvarianten entsteht die Schaltgleichung

$$Y = \bar{x}_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee \bar{x}_4x_3\bar{x}_2x_1 \vee \bar{x}_4x_3x_2\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4x_3x_2x_1 \vee x_4\bar{x}_3\bar{x}_2x_1 \vee$$
$$x_4\bar{x}_3x_2\bar{x}_1 \vee x_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2x_1 \vee x_4x_3x_2\bar{x}_1 \vee$$
$$x_4x_3x_2x_1$$

die nach den unter 5.2 angegebenen Verfahren zu

$$Y = x_4x_3 \vee x_2x_1 \vee (x_4 \vee x_3)(x_2 \vee x_1)$$

vereinfacht werden kann.

Nach Ermittlung dieser vereinfachten Gleichung kann der Stromlaufplan für das Sperrelais gezeichnet werden. (Abb. 5.79)

Danach kann ähnlich wie für die Filtersteuerung auch ein Wirkschaltplan gezeichnet werden.

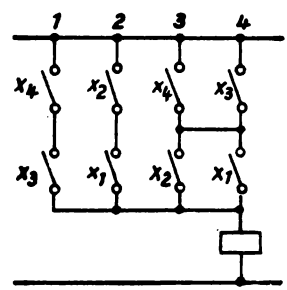


Abb. 5.79
Stromlaufplan für Transportbandverriegelung

5.4.3.2. Signalflußplan

Ist die Bandanlage als kontaktlose Steuerung aufgebaut, wird nach der Schaltungsvereinfachung kein Stromlaufplan, sondern ein Signalflußplan gezeichnet. Die Darstellung des Signalflußplanes erfolgt mit den unter Punkt 5.3.1.2. genannten Schaltkurzzeichen.

Zum schrittweisen Aufbau des Signalflußplanes für die Schaltgleichung

$Y = x_4x_3 \vee x_2x_1 \vee (x_4 \vee x_3)(x_2 \vee x_1)$ wird gesetzt

$x_4x_3 = y_4$

$x_2x_1 = y_3$

$x_4 \vee x_3 = y_2$

$x_2 \vee x_1 = y_1$ und

$y_2y_1 = y_0$

Damit gilt die Schaltgleichung

$Y = y_4 \vee y_3 \vee y_0$

Diese wird durch das Oderglied in Abb. 5.80 realisiert

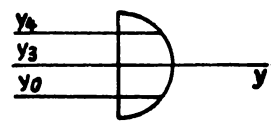


Abb. 5.80

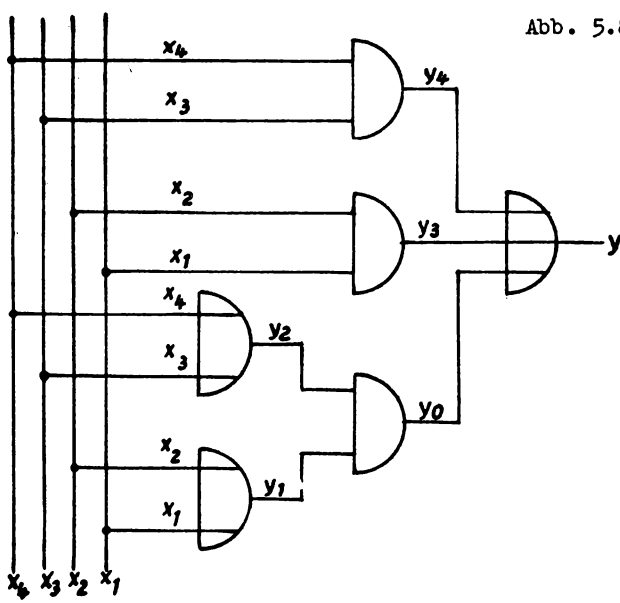


Abb. 5.81 Signalflußplan für Transportband-verriegelung

Die eingeführte Hilfsvariable y_4 ist die Konjunktion von x_4, x_3 und ergibt demzufolge ein Undglied mit den Eingängen x_4, x_3 vor dem Oderglied. Das gleiche gilt für y_3. Es ergibt ein Undglied mit den Eingängen x_2, x_1 vor dem Oderglied. $y_0 = y_2 y_1$ ergibt wiederum ein Undglied vor dem dritten Odergliedeingang. Hier sind aber y_2 und y_1 immer noch Hilfsvariable, die durch vorzuschaltende Oderglieder für $y_2 = x_4 \vee x_3$ und für $y_1 = x_2 \vee x_1$ zu realisieren sind. Werden die Glieder entsprechend dieser Erläuterung der Reihe nach ergänzt, ergibt sich der in Abb. 5.81 dargestellte Signalflußplan.

Das Ausgangssignal Y stellt jetzt das Verriegelungssignal dar. Wenn Y L-Signal hat, wird die Einschaltung weiterer Zuführbänder verhindert.

Auf die Darstellung der Steueranlage für die gesamte Bandanlage wird aus Raummangel verzichtet.

5.4.4. Beispiel Steuerung einer Drehmaschine

Zum Vordrehen verschiedener Werkstücke soll eine vorhandene Drehmaschine soweit automatisiert werden, daß alle auszuführenden Bearbeitungsphasen nach Abgabe eines Startkommandos selbsttätig ablaufen und nur noch das Ein- und das Ausspannen der Werkstücke von Hand vorgenommen werden muß.

Die Maschine besitzt einen Antriebsmotor, welcher über Getriebe mit der Hauptspindel verbunden ist. Sechs Hauptspindeldrehzahlen können durch gleichzeitige Erregung von je zwei der insgesamt vier im Getriebe vorhandenen Magnetkupplungen elektrisch geschaltet werden. Es ergibt sich die Drehzahl

n_1 bei Einschaltung der Kupplungen K_1 und K_2
n_2 bei Einschaltung der Kupplungen K_1 und K_3
n_3 bei Einschaltung der Kupplungen K_2 und K_3
n_4 bei Einschaltung der Kupplungen K_1 und K_4
n_5 bei Einschaltung der Kupplungen K_2 und K_4
n_6 bei Einschaltung der Kupplungen K_3 und K_4

Wird infolge eines Fehlers keine oder nur eine der Magnetkupplungen betätigt, wird die Hauptspindel nicht angetrieben, wäh-

rend das Getriebe beim Einschalten von drei oder vier Kupplungen sperrt, so daß sich die Hauptspindel der Maschine wiederum nicht dreht. Beim Eintreten eines solchen Fehlerfalles ist der Antriebsmotor stillzusetzen.

Zum Schalten der Vorschubbewegungen "längs nach links", "längs nach rechts", "plan nach innen" und "plan nach außen" ist ebenfalls je eine Magnetkupplung vorhanden. Alle Magnetkupplungen sind für eine Betriebsspannung von 220 V Gleichspannung ausgelegt. Der Antriebsmotor wird mit Drehstrom 380 V betrieben.

Der Antriebsmotor ist nicht mit in die Automatik einzubeziehen, sondern durch Drucktaster ein und auszuschalten.

Infolge des vorliegenden Produktionsprogrammes soll die Maschine zur Kleinserienfertigung eingesetzt werden. Die Steuerung ist deshalb so auszulegen, daß für die Bearbeitung andersgeformter Werkstücke eine einfache Umrüstung der Maschine möglich ist.

Als Beispiel für die zur Bearbeitung vorgesehenen Werkstücke dient Abb. 5.82. Das Teil ist vorgeschmiedet und gemäß der stark ausgezogenen Linien zur Aufnahme in der Maschine vorgedreht.

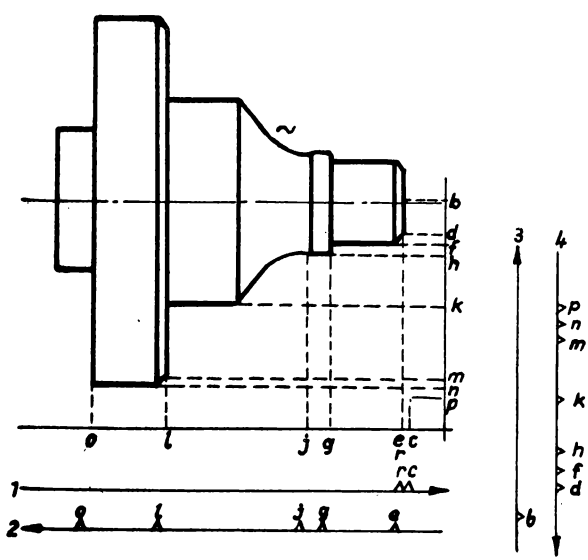


Abb. 5.82
Werkstück zur Bearbeitung in der automatisierten Drehmaschine
(1,2,3,4: Bahnen mit aufgesetzten Nocken zur Betätigung der Impulsgeber

Automatisierungstechnik

Bearbeitungs-takt	Funktion	Funktions-nummer
1	Hauptspindeldrehzahl n_2 Planbewegung nach innen	5+7 3
2	Hauptspindeldrehzahl n_2 Vorschubbewegung nach rechts	5+7 2
3	Hauptspindelbewegung n_2 Planbewegung nach außen	5+7 4
4	Hauptspindeldrehzahl n_2 Vorschubbewegung nach links	5+7 1
5	Hauptspindeldrehzahl n_2 Vorschubbewegung nach links Planbewegung nach außen	5+7 1 4
6	Hauptspindeldrehzahl n_2 Vorschubbewegung nach links	5+7 1
7	Hauptspindeldrehzahl n_2 Planbewegung nach außen	5+7 4
8	Hauptspindelbewegung n_2 Vorschubbewegung nach links	5+7 1
9	Hauptspindeldrehzahl n_2 Vorschubbewegung nach links Planbewegung nach außen	5+7 1 4
10	Hauptspindeldrehzahl n_4 Vorschubbewegung nach links	5+8 1
11	Hauptspindeldrehzahl n_5 Planbewegung nach außen	6+8 4
12	Hauptspindeldrehzahl n_5 Vorschubbewegung nach links Planbewegung nach außen	6+8 1 4
13	Hauptspindeldrehzahl n_6 Vorschubbewegung nach links	7+8 1
14	Hauptspindeldrehzahl n_6 Planbewegung nach außen	7+8 4
15	Hauptspindeldrehzahl n_6 Vorschubbewegung nach rechts	7+8 2

Bei der Bearbeitung des dargestellten Werkstückes sind die in Tafel 5.3 angegebenen Funktionen nacheinander auszuführen. Die Bearbeitung der Aufgabe beginnt wieder mit der Anfertigung einer Anlagenskizze.

In der Aufgabenstellung wurde gesagt, daß sechs Hauptspindeldrehzahlen durch Betätigung von zwei der vier Magnetkupplungen und vier Vorschubrichtungen durch Betätigung von je einer Magnetkupplung schaltbar sind. Diesen acht möglichen Funktionen wurden die Nummern zugeteilt welche in der rechten Spalte der Tafel 5.3 eingetragen sind. In den verschiedenen Bearbeitungstakten erscheinen gleiche Funktionsnummern immer wieder, jedoch in anderen Kombinationen. Bei der Bearbeitung andersgeformter Werkstücke treten diese Funktionsnummern ebenfalls auf, aber infolge des erforderlichen Bearbeitungszyklus in einer anderen Anzahl und Reihenfolge.

Für die Bearbeitung der infragekommenden Werkstücke stehen acht Funktionen zur Verfügung, die je nach Werkstückform und Bearbeitungsprogramm nacheinander in bestimmten Kombinationen einzuschalten sind. Mit der Steuereinrichtung muß es also möglich sein, die erforderlichen Arbeitstakte und die für jeden Arbeitstakt erforderliche Funktionskombination in Abhängigkeit des Bearbeitungsprozesses auszuführen. Dazu ist eine Programmsteuerung geeignet, bei der für jedes andersgeformte Werkstück ein neuer Funktionsablauf programmiert wird.

Verwendet man als Programmgeber ein Schrittschaltwerk, muß die Anzahl der ausführbaren Schritte mindestens der Zahl der bei der Bearbeitung nacheinander durchzuführenden Funktionen entsprechen.

Die Fortschaltung des Programmgebers kann durch Impulsgeber in Form von Endlagenschaltern geschehen, welche am Ende jeder durchgeführten Funktion ein Signal abgeben.

Es ist nun zu untersuchen, wie die Endschalter montiert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, je eine Schaltnocke am Schlitten für die Längs- und die Planbewegung anzubringen und für jede Richtung so viele Impulsgeber, wie Funktionsumschaltungen er-

forderlich sind. Diese Lösung ist aber ungünstig, da die Anzahl der benötigten Impulsgeber von der Anzahl der durchzuführenden Funktionsumschaltungen, d.h. von der Form der zu bearbeitenden Werkstücke abhängig ist. Besser ist, je einen Impulsgeber für die Längs- und die Planbewegung anzubringen und so viele Schaltnocken, wie Funktionsumschaltungen erforderlich sind. Das bringt auch beim Umrüsten der Maschine einen Vorteil, da die Nockenbahnen außerhalb derselben eingestellt und durch wenige Handgriffe an der Maschine befestigt werden können.

Es fehlt nun noch eine Einrichtung, in welcher die Zuordnung der Schrittschaltersignale zu den Schaltschützen der Magnetkupplungen gespeichert wird. Zur Erreichung der geforderten leichten Umrüstbarkeit muß dieser Programmspeicher einfach veränderbar sein. Sehr gut zu diesem Zweck eignen sich vielpolige Programmstecker, Lochkarten, Lochbänder u.a. Für den vorliegenden Fall soll eine Lochkartensteuerung angewendet werden.

Mit diesen grundsätzlichen Festlegungen kann die Anlagenskizze Abb. 5.83 und auch das Wirkungsschema Abb. 5.84 gezeichnet werden.

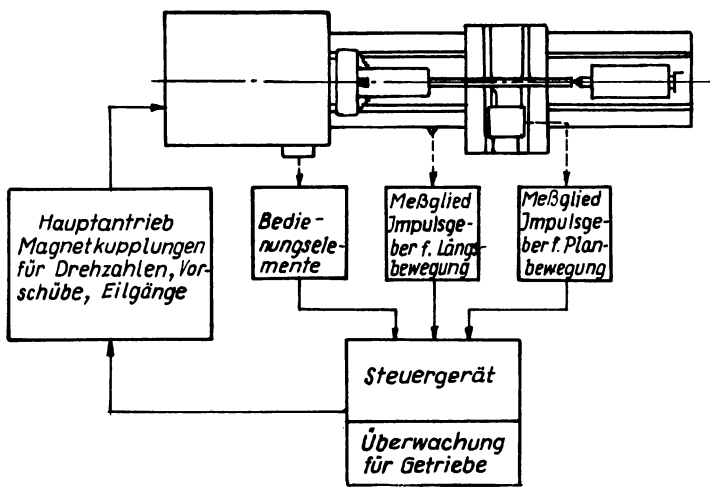


Abb. 5.83 Anlagenskizze der Drehmaschinensteuerung

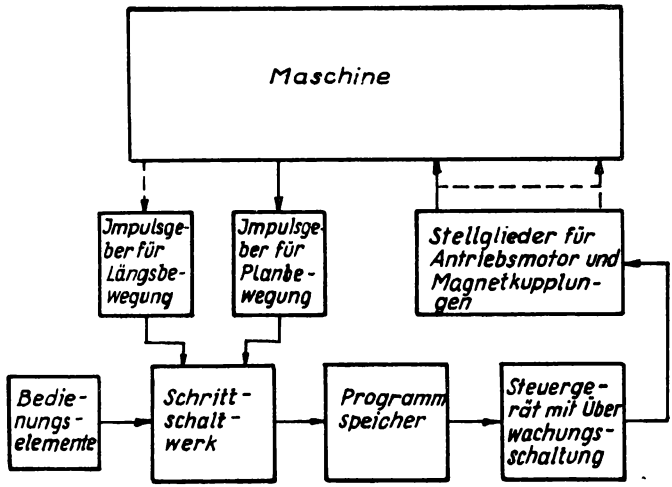


Abb. 5.84 Wirkungsschema der Drehmaschinensteuerung

Für die weitere Bearbeitung ist die Anfertigung eines Schaltfolgediagrammes sehr zweckmäßig. Entsprechend dem unter Punkt 5.4.2.4. gesagten wird auf der Ordinate für jede Funktion eine Zeile vorgesehen und die Abszisse in gleichgroße Spalten für die einzelnen Schalttakte geteilt.

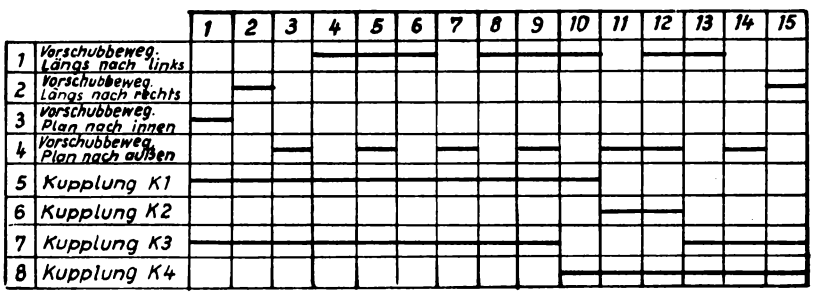


Abb. 5.85 Schaltfolgediagramm der Drehmaschinensteuerung

Das in Abb. 5.85 dargestellte Schaltfolgediagramm entsteht durch Eintragung der Funktionen aus Tafel 5.3, wobei jedoch nicht die Drehzahlen, sondern die zu ihrer Erreichung einzu-

schaltenden Kupplungen angegeben sind.

Der prinzipielle Aufbau des Programmspeichers läßt sich leicht aus dem Schaltfolgediagramm ableiten, wenn man sich vorstellt, daß entlang der einzelnen Spalten Leitungen mit den jeweiligen Ausgangssignalen des Schrittschalters und entlang der Zeilen Leitungen zu den Schaltgeräten der Kupplungen liegen. Überall dort, wo das Schrittschaltersignal an ein Schaltgerät weitergegeben werden sol', ist eine Verbindung einzulegen. Das ist nun überall dort der Fall, wo in den Schalttakten das Einschalten der einzelnen Kupplungen angegeben ist. Leider ist aber festzustellen, daß die Schaltung infolge Bildung von Rückstromkreisen und dadurch bedingte Vermaschung aller Leitungen zu den Kupplungen in dieser Form nicht funktionstüchtig ist. Da die Vermaschung über die Leitungen der nicht benutzten Schrittschalterstellungen erfolgt, müssen dort Trennungen durchgeführt werden. Das kann dadurch erreicht werden, daß jede Schrittschalterstellung für jede Kupplung mit einem gesondertem Kontakt geschaltet wird. Die Kontakte der nicht in Betrieb befindlichen Schrittschalterstellungen sind dann geöffnet und eine Vermaschung ist nicht möglich. Diese Lösung ist aber sehr aufwendig. Eine bedeutend einfachere ergibt sich durch Einschaltung von Gleichrichterdioden an allen Verbindungspunkten und Betrieb der Schaltung mit Gleichspannung. Die Dioden werden so eingebaut, daß sie von den Schrittschalterleitungen zu den Kupplungsleitungen in Durchlaßrichtung gepolt sind. Infolge ihrer Gleichrichterwirkung können die Schrittschaltersignale zu den Kupplungen gelangen. Es ist aber nicht möglich, daß die Signale der Kupplungsleitungen zurück zu den Schrittschalterleitungen kommen, da dafür alle Dioden in Sperrichtung gepolt sind.

Da sich für Werkstücke mit anderen geometrischen Formen andere Bearbeitungsprogramme und andere Schaltfolgediagramme ergeben, müssen auch die Dioden an anderen Stellen eingebaut werden. Um allen möglichen Funktionsabläufen gerecht zu werden, muß jeder Kreuzungspunkt eine Diode erhalten, welche durch einen Stöpsel, Schalter o.a. an die Eingangsleitung

angeschlossen wird.

Es wurde bereits festgelegt, daß die Fortschaltung des Schrittschaltwerkes durch Impulsgeber erfolgen soll, welche durch Schaltnocken betätigt werden. Diese sind in Abb. 5.82 mit angegeben. Im Gegensatz zu den durchgeführten Betrachtungen sind jedoch nicht nur zwei, sondern vier Nockenbahnen eingetragen. Das hat folgenden Grund: Beim Inbetriebnehmen der Maschine und Ausführung der erforderlichen Funktion "Vorschubbewegung nach innen" werden beim Vorhandensein von nur einer Nockenbahn in Planrichtung die Nocken n, m, k, h, f, d den Impulsgeber betätigen und den Schrittschalter dabei um sechs Schritte weiterschalten, ohne daß eine Funktionsänderung notwendig ist. Das wirkt sich sehr ungünstig auf die notwendige Schrittzahl des Schalters aus. Es ist deshalb zweckmäßig, je einen Impulsgeber für "Längsbewegung nach links", Längsbewegung nach rechts", "Planbewegung nach innen", "Planbewegung nach außen" zu verwenden. Es werden dann immer nur die Nocken den Impulsgeber betätigen, die Funktionsumschaltungen herbeiführen sollen und der Schrittschalter erhält keine "toten" Stellungen.

Da alle Impulsgeber die gleiche Funktion, das Weiterschalten des Schrittschaltwerkes, haben, können sie parallel geschaltet werden. Geben die verwendeten Schalter bei andauernder Betätigung nicht nur einen Impuls ab, sondern ein Dauersignal, sind ihnen Wischrelais nachzuschalten, welche das Dauersignal in einen Impuls umformen.

Die Einleitung des Programmablaufes soll in der Ausgangsstellung des Schrittschalters durch Betätigung einer Starttaste erfolgen. Danach läuft das Programm selbsttätig ab und nach vollständigem Durchlauf muß der Schrittschalter wieder die Ausgangsstellung einnehmen. Das erfordert das Überspringen der für die Ausführung des Bearbeitungsprogrammes nicht benutzten Schalttakte. Da deren Zahl bei unterschiedlich geformten Werkstücken verschieden ist, muß die Rückschaltung des Schrittschalters mit programmiert werden. Dieses erfolgt durch eine weitere Zeile des Programmspeichers, deren Ausgang mit der Spule des Schrittschalters verbunden ist und eine Weiterschaltung

immer dann veranlaßt, wenn der entsprechende Schalter im Programmspeicher eingeschaltet ist.

Um auch Werkstücke mit mehr Bearbeitungsfunktionen als bei dem Teil nach Abb. 5.82 bearbeiten zu können, wird die Anzahl der Schalttakte mit 20 festgelegt.

Damit kann der Stromlaufplan für die Programmsteuerung gezeichnet werden. Es ist nun noch der Entwurf der Überwachungsschaltung für die Kupplungen des Getriebes durchzuführen. Die höchste Betriebssicherheit einer solchen Schaltung wird selbstverständlich dann erreicht, wenn direkt der Schließvorgang der Kupplungen überwacht wird und nicht nur das Ansprechen des zugehörigen Schaltschützes. Die direkte Überwachung ist jedoch oftmals nicht einfach. Sie ist insbesondere von den zur Verfügung stehenden Bauelementen abhängig und soll hier nicht diskutiert werden. Für unser Beispiel soll es möglich sein, jeder Kupplung einen Schalter zuzuordnen, der im vollständig geschlossenem Zustand derselben umschaltet.

In der Aufgabenstellung wurde gesagt, daß das Getriebe vier Kupplungen besitzt, von denen immer zwei gleichzeitig eingeschaltet sein müssen. Sind keine, eine drei oder vier Kupplungen in Betrieb, ist der Antriebsmotor stillzusetzen.

Da in der Schaltung keine zeitabhängigen Variablen auftreten, handelt es sich um eine Kombinationsschaltung, deren Bearbeitung zweckmäßig mit der Aufstellung einer Schaltbelegungstabelle (Abb. 5.86) beginnt. Nach dieser kann die Verriegelungsschaltung nach zweierlei Gesichtspunkten aufgebaut werden. Entweder sie gibt ein L-Signal ab, wenn zwei Kupplungen eingeschaltet sind, oder sie gibt ein L-Signal in den möglichen Fehlerfällen. Beide Möglichkeiten sind zueinander invers. Welche Schaltung die zweckmäßigere ist, kann nicht generell festgelegt werden, sondern richtet sich nach den Bedingungen, mit denen sie zusammenarbeiten muß. Auf diese Bedingungen wird nun eingegangen.

Drehzahl	Kupplung K_4 K_3 K_2 K_1 Variable x_4 x_3 x_2 x_1				Y	$\bar{Y}$
0	0	0	0	0	L	0
0	0	0	0	L	L	0
0	0	0	L	0	L	0
n_1	0	0	L	L	0	L
0	0	L	0	0	L	0
n_2	0	L	0	L	0	L
n_3	0	L	L	0	0	L
0	0	L	L	L	L	0
0	L	0	0	0	L	0
n_4	L	0	0	L	0	L
n_5	L	0	L	0	0	L
0	L	0	L	L	L	0
n_6	L	L	0	0	0	L
0	L	L	0	L	L	0
0	L	L	L	0	L	0
0	L	L	L	L	L	0

Abb. 5.86 Schaltbelegungstabelle der Getriebekupplungen

Entsprechend der Aufgabenstellung soll für den Antriebsmotor eine Drucktastensteuerung mit Selbsthaltung vorgesehen werden. Das bedeutet, daß der Antriebsmotor immer läuft; also auch während des Spannens neuer Werkstücke. Zu dieser Zeit muß aber die Hauptspindel stillstehen und alle Kupplungen sind betriebsmäßig ausgeschaltet, ohne daß das als Fehlerfall angesehen werden kann. Die Überwachungsschaltung muß deshalb in Abhängigkeit der Programmsteuerung arbeiten. Das erreicht man sehr einfach dadurch, daß die Ausgangssignale für die Getriebekupplungen von Programmspeicher abgenommen werden und die Überwachungsschaltung einspeisen. Zur Vermeidung von Vermaschungen durch die Bildung von Rückstromkreisen sind wiederum Gleichrichterdioden einzuschalten. Der Eingang der Überwachungsschaltung erhält nun immer dann ein L-Signal, wenn eine Überwachung durchgeführt werden muß. Wird dabei ein Fehler festgestellt, ist das Signal als Ausschaltkommando an das Schaltschütz des Antriebsmotors zu geben. Dieses ist ein L-Signal, welches aus der disjunktiven Verknüpfung der in Abb. 5.86 aufgeführten Fehlerfälle entsteht. Folgende Schaltfunktion muß dafür aufgestellt und vereinfacht werden.

$$Y = \bar{x}_4\bar{x}_3\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4\bar{x}_3\bar{x}_2x_1 \vee \bar{x}_4\bar{x}_3x_2\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee \bar{x}_4x_3x_2x_1 \vee$$
$$x_4\bar{x}_3\bar{x}_2\bar{x}_1 \vee x_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2x_1 \vee x_4x_3x_2\bar{x}_1 \vee x_4x_3x_2x_1$$

Diese Gleichung hat 10 Glieder, während die Schaltfunktion für $\bar{Y}$ nur sechs Glieder hat und demzufolge leichter zu vereinfachen ist. Sie kann ebenfalls benutzt werden, jedoch muß das Ergebnis der Vereinfachung anschließend invertiert werden, da ja, wie festgestellt wurde, die Funktion $Y = f(x_4, x_3, x_2, x_1)$ und nicht $\bar{Y} = f(x_4, x_3, x_2, x_1)$ als Ausschaltbedingung benötigt wird. Die zu vereinfachende Schaltfunktion lautet nun:

$$\bar{Y} = \bar{x}_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee \bar{x}_4x_3\bar{x}_2x_1 \vee x_4\bar{x}_3\bar{x}_2x_1 \vee \bar{x}_4x_3x_2\bar{x}_1 \vee x_4\bar{x}_3x_2\bar{x}_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1$$

$$\bar{Y} = \bar{x}_4x_3(\bar{x}_2x_1 \vee x_2\bar{x}_1) \vee x_4\bar{x}_3(\bar{x}_2x_1 \vee x_2\bar{x}_1) \vee \bar{x}_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1$$

$$\bar{Y} = (\bar{x}_4x_3 \vee x_4\bar{x}_3)(\bar{x}_2x_1 \vee x_2\bar{x}_1) \vee \bar{x}_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1$$

Diese Schaltfunktion muß nun invertiert werden.

$$\bar{\bar{Y}} = Y = \overline{(\bar{x}_4x_3 \vee x_4\bar{x}_3)(\bar{x}_2x_1 \vee x_2\bar{x}_1) \vee \bar{x}_4\bar{x}_3x_2x_1 \vee x_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1}$$

$$Y = \overline{(\bar{x}_4x_3 \vee x_4\bar{x}_3)(\bar{x}_2x_1 \vee x_2\bar{x}_1)} \quad \bar{x}_4\bar{x}_3x_2x_1 \quad x_4x_3\bar{x}_2\bar{x}_1$$

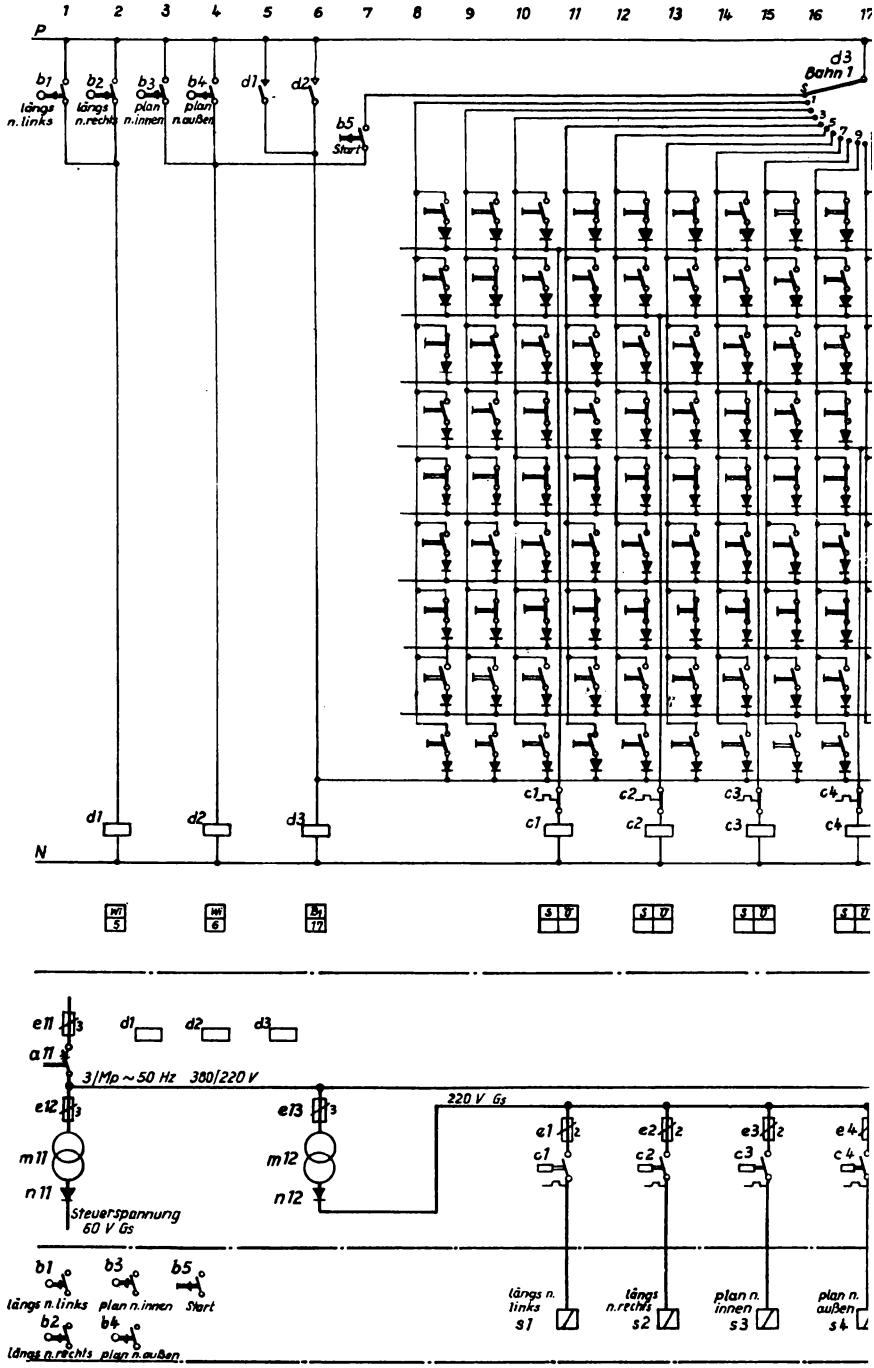
$$Y = \left[\overline{(\bar{x}_4x_3 \vee x_4\bar{x}_3)} \vee \overline{(\bar{x}_2x_1 \vee x_2\bar{x}_1)}\right] \bar{\bar{x}}_4 \vee \bar{\bar{x}}_3 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1$$
$$\bar{x}_4 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{\bar{x}}_2 \vee \bar{\bar{x}}_1$$

$$Y = (\overline{\bar{x}_4x_3}\ \overline{x_4\bar{x}_3} \vee \overline{\bar{x}_2x_1}\ \overline{x_2\bar{x}_1})(x_4 \vee x_3 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1)(\bar{x}_4 \vee \bar{x}_3 \vee x_2 \vee x_1)$$

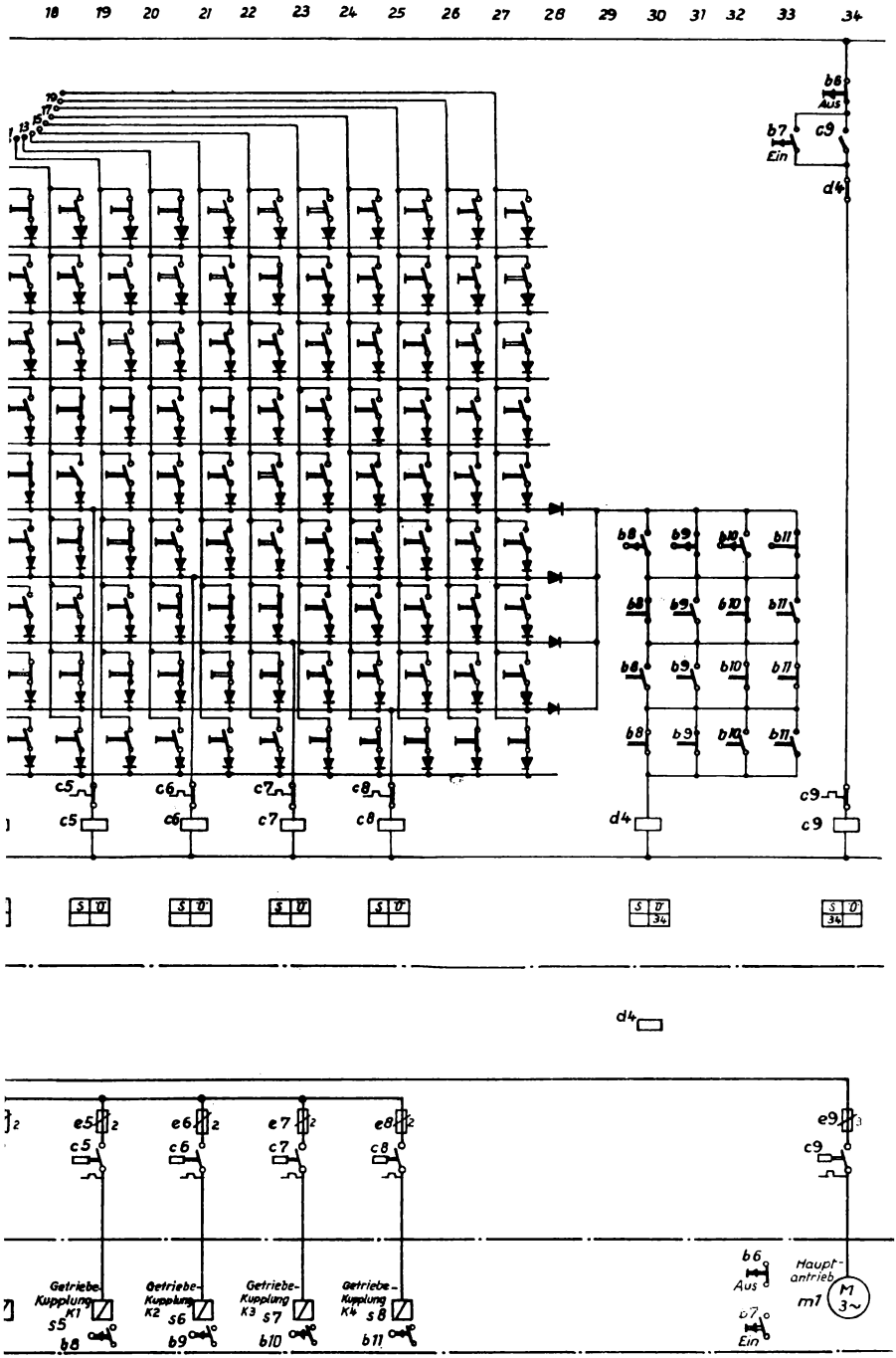
$$Y = \left[(x_4 \vee \bar{x}_3)(\bar{x}_4 \vee x_3) \vee (x_2 \vee \bar{x}_1)(\bar{x}_2 \vee x_1)\right](x_4 \vee x_3 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1)$$

$$(\bar{x}_4 \vee \bar{x}_3 \vee x_2 \vee x_1)$$

Die aus dieser Gleichung resultierende Schaltung ist von der Programmsteuerung zu speisen und gibt im Fehlerfalle ein Aus-


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
P
b1 längs n. links
b2 längs n. rechts
b3 plan n. innen
b4 plan n. außen
d1
d2
b5 Start
d3 Bahn 1
c1
c2
c3
c4
d1
d2
d3
N
e11
a11
3/Mp ~ 50 Hz 380/220 V
e12
m11
n11
Steuerspannung 60 V Gs
e13
m12
n12
220 V Gs
e1
e2
e3
e4
b1 längs n. links
b3 plan n. innen
b5 Start
b2 längs n. rechts
b4 plan n. außen
längs n. links s1
längs n. rechts s2
plan n. innen s3
plan n. außen s4

Ab



b. 5.87 Stromlaufplan und Übersichtsschaltplan der Drehmaschinensteuerung

lösekommando in Form eines L-Signals. Für die Abschaltung des Motorschützes ist jedoch ein O-Signal erforderlich, so daß die gesamte Schaltung nochmals invertiert werden muß. Dieses stößt jedoch für den Teil der Programmsteuerung auf große Schwierigkeiten. Deshalb ist es zweckmäßiger, die erforderliche Negation durch ein Hilfsrelais vorzunehmen, welches durch Öffnen eines Ruhekontaktes das Motorschütz abschaltet. Damit kann der Stromlaufplan für die gesamte Steuerung der Drehmaschine gezeichnet werden. (Abb. 5.87) Die Bezeichnung der Schalter im Stromlaufplan für die Überwachungsschaltung wird nicht mit den eingeführten Symbolen der Schaltvariablen durchgeführt, sondern mit den zur Bezeichnung von Schaltern genormten Kennbuchstaben. Es entsprechen: $x_4 \triangleq$ b8, $x_3 \triangleq$ b9, $x_2 \triangleq$ b10, $x_1 \triangleq$ b11. Da auf die Darstellung eines Wirkschaltplanes verzichtet wird, ist der Hauptstromteil der Steueranlage als Übersichtsschaltplan mit in Abb. 5.87 angegeben.

Zum vollständigen Stromlauf- und Übersichtsschaltplan gehört wiederum noch die Auswahl und die Dimensionierung der verwendeten Geräte, auf die jedoch unter Beachtung der Thematik dieses Beispieles nicht eingegangen wird. Nicht eingegangen wurde auch auf die schaltalgebraische Berechnung des Programmierfeldes. Dazu ist jedoch bedeutend mehr Wissen erforderlich, als bisher vermittelt wurde. Es mußte deshalb darauf verzichtet werden. Auch für die Schaltung der Überwachungseinrichtung besteht noch eine bessere Lösung, die man durch Umformung in eine Brückenschaltung erhält.

Zum Schluß noch einige Worte zum Umfang der Aufgabe. Bei den zur Ausführung kommenden Maschinen sind selbstverständlich nicht nur sechs Drehzahlen und vier Vorschubrichtungen vorhanden, sondern bedeutend mehr. Es werden Eilgänge, in Längs- und in Planrichtung, verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten sowie Kopierpinolenbewegungen u.a. in die Programmsteuerung einbezogen. Der Programmspeicher vergrößert sich dadurch sehr stark, so daß eine sinnvolle Aufteilung desselben in mehrere Programmierfelder zweckmäßig ist. Auch kontaktlose

Schaltungen wurden für derartige Maschinensteuerungen bereits ausgeführt. Dieses hätte aber die Verständlichkeit des Beispieles stark erschwert und wurde deshalb unterlassen.

Übungen

1. Können mit elektromagnetischen Relais stetige Steuerungen aufgebaut werden?
2. Die Dezimalzahlen 28 und 115,5 sind als Binärzahlen auszudrücken.
3. Es ist zu prüfen, ob die in Abb. 5.5c angegebene Kontaktschaltung mit Hilfe der Schaltalgebra weiter vereinfacht werden kann. Für das Ergebnis ist die Kontaktschaltung, die logische Schaltung mit Undgliedern, Odergliedern, Negatoren und die mit Norgliedern anzugeben.
4. Für die in Abb. 5.88 angegebene Schaltbelegungstabelle ist die vereinfachte Kontaktschaltung rechnerisch und mit dem Verfahren nach Karnaugh zu ermitteln.

x_2	x_1	x_0	Y
0	0	0	0
0	0	L	L
0	L	0	0
0	L	L	L
L	0	0	L
L	0	L	L
L	L	0	L
L	L	L	L

Abb. 5.88

5. Die Schaltfunktion

$$Y = \bar{x}_3\bar{x}_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_2x_1x_0 \vee x_3\bar{x}_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_3\bar{x}_2x_1\bar{x}_0$$
$$x_3x_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_3x_2\bar{x}_1x_0 \vee x_3x_2x_1\bar{x}_0 \vee x_3x_2x_1x_0$$

ist zu vereinfachen und mit Sheffergliedern sowie mit Norgliedern zu realisieren.

6. Wie muß ein mit Dioden aufgebautes Undglied geschaltet sein, wenn das L-Signal nicht durch eine negative, sondern durch eine positive Spannung gebildet wird?

Antworten und Lösungen

zu 1. Stetige Steuerungen können mit Relais grundsätzlich nicht aufgebaut werden. Gemäß Abb. 5.1 hat ein Relaiskontakt nur zwei Schaltstellungen; die eingeschaltete und die ausgeschaltete. Am Ausgang des Relais treten deshalb immer nur binäre Signale auf, die einander beim Überschreiten des Ansprechwertes bzw. beim Unterschreiten des Abfallwertes in unendlich kurzer Zeit ablösen.

zu 2. Die Dezimalzahl 28 kann geschrieben werden:

$$28 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \triangleq \text{LLL00}$$

Für die Dezimalzahl 115,5 heißt die Binärzahl:

$$115{,}5 = 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} \triangleq \text{LLL00LL,L}$$

zu 3. Die Ausgangsgleichung für die Vereinfachung wird von Abb. 5.5a abgeleitet, wobei jedoch die für die Schaltalgebra üblichen Bezeichnungen angewendet werden. Das Schütz c1 wird mit Y bezeichnet und den Relais d1, d2, d1 werden die Schaltvariablen x_2, x_1, x_0 zugeordnet. Damit lautet die Schaltfunktion:

$$Y = x_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_2x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_2\bar{x}_1x_0 \vee \bar{x}_2x_1x_0 \vee x_2\bar{x}_1x_0 \vee x_2\bar{x}_1x_0$$

$$Y = \bar{x}_2(\bar{x}_1x_0 \vee x_1\bar{x}_0 \vee x_1x_0) \vee x_2(\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_1x_0 \vee x_1\bar{x}_0)$$

$$Y = \bar{x}_2\left[\bar{x}_1x_0 \vee x_1(\bar{x}_0 \vee x_0)\right] \vee x_2\left[\bar{x}_1(\bar{x}_0 \vee x_0) \vee x_1\bar{x}_0\right]$$

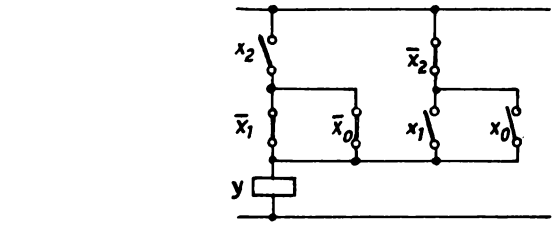
$$Y = \bar{x}_2(\bar{x}_1x_0 \vee x_1) \vee x_2(\bar{x}_1 \vee x_1\bar{x}_0)$$

$$Y = \bar{x}_2(x_1 \vee x_0) \vee x_2(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0)$$

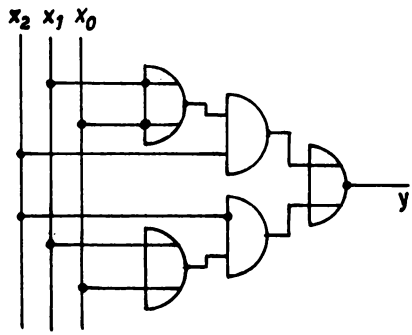
==========

Die Kontaktschaltung dieser Schaltfunktion zeigt Abb. 5.89a, die Logikschaltung mit Undgliedern, Odergliedern, Negatoren die Abb. 5.89b.

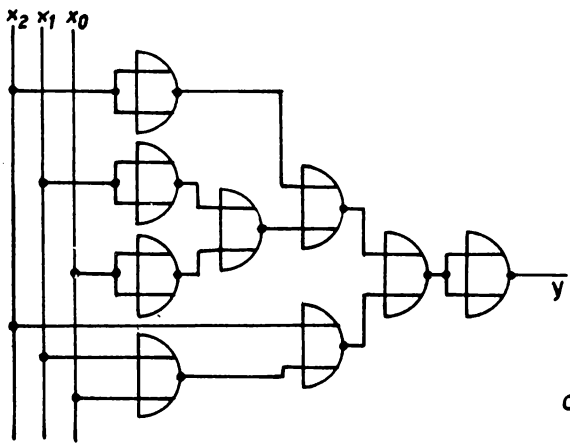
Für den ausschließlichen Einsatz von Norgliedern wird die vereinfachte Schaltfunktion umgeformt:



a)



b)



c)

Abb. 5.89

$$Y = \bar{x}_2(x_1 \vee x_0) \vee x_2(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0)$$

$$Y = \overline{\bar{x}_2 \vee \overline{x_1 \vee x_0}} \vee \overline{\bar{x}_2 \vee \overline{\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0}}$$

$$Y = \overline{x_2 \vee \overline{x_1 \vee x_0}} \vee \overline{\bar{x}_2 \vee \overline{\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0}}$$

==========

Die Logikschaltung mit Norgliedern zeigt Abb. 5.89c.

zu 4. Aus der Schaltbelegungstabelle wird abgelesen für die rechnerische Vereinfachung:

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_1x_0 \vee \bar{x}_2x_1x_0 \vee x_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_2\bar{x}_1x_0 \vee x_2x_1\bar{x}_0 \vee x_2x_1x_0$$

$$Y = \bar{x}_2x_0(\bar{x}_1 \vee x_1) \vee x_2\left[\bar{x}_1(\bar{x}_1 \vee x_0) \vee x_1(\bar{x}_0 \vee x_0)\right]$$

$$Y = \bar{x}_2x_0 \vee x_2$$

$$Y = x_2 \vee x_0$$

==========

Mit den in Abb. 5.90 eingezeichneten Blöcken ergibt sich nach Karnaugh ebenfalls die Lösung:

$$Y = x_2 \vee x_0$$

==========

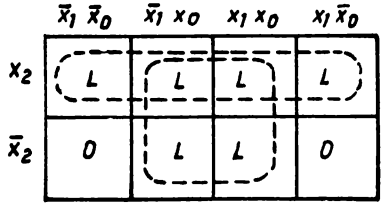


Abb. 5.90

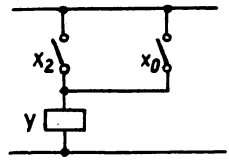


Abb. 5.91

zu 5. Die gegebene Schaltfunktion lautet:

$$Y = \bar{x}_3\bar{x}_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3\bar{x}_2x_1\bar{x}_0 \vee \bar{x}_3x_2x_1x_0 \vee x_3\bar{x}_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_3\bar{x}_2x_1\bar{x}_0$$

$$x_3x_2\bar{x}_1\bar{x}_0 \vee x_3x_2\bar{x}_1x_0 \vee x_3x_2x_1\bar{x}_0 \vee x_3x_2x_1x_0$$

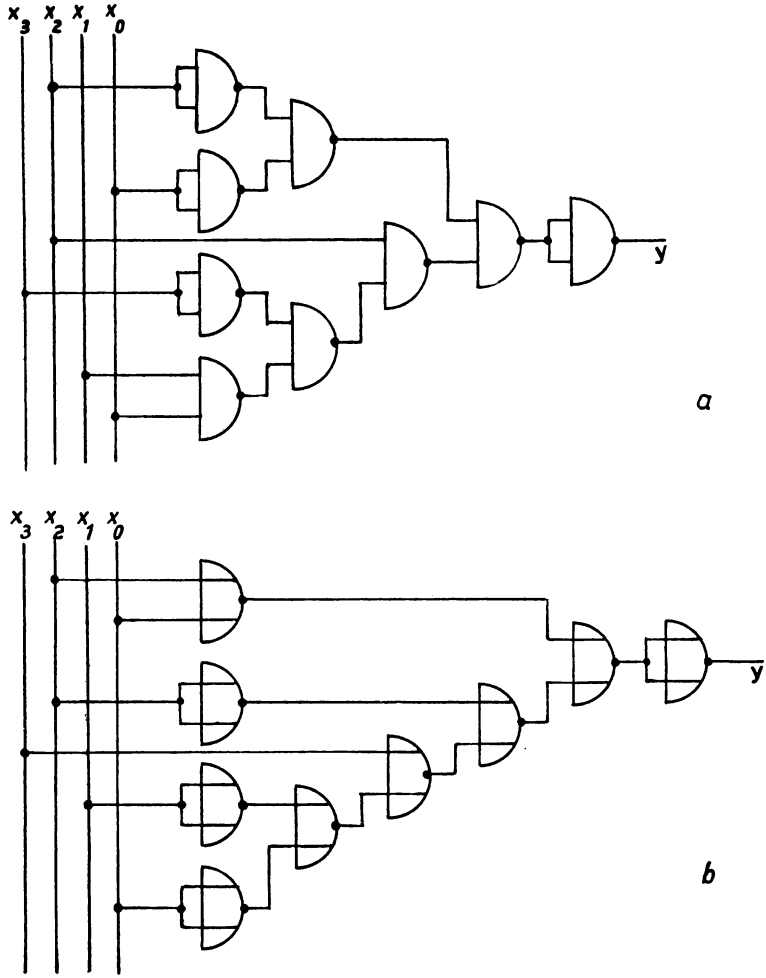


Abb. 5.92

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_0\left[\bar{x}_3(\bar{x}_1 \vee x_1) \vee x_3(\bar{x}_1 \vee x_1)\right] \vee$$
$$x_3x_2\left[\bar{x}_0(\bar{x}_1 \vee x_1) \vee x_0(\bar{x}_1 \vee x_1)\right] \vee \bar{x}_3x_2x_1x_0$$

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_0(\bar{x}_3 \vee x_3) \vee x_3x_2(\bar{x}_0 \vee x_0) \vee \bar{x}_3x_2x_1x_0$$

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee x_3x_2 \vee \bar{x}_3x_2x_1x_0$$

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee x_2(x_3 \vee \bar{x}_3x_1x_0)$$

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee x_2(x_3 \vee x_1x_0)$$

Für den Einsatz von Shefferg liedern wird die Gleichung umgeformt:

$$Y = \bar{x}_2\bar{x}_0 \vee x_2\overline{(\bar{x}_3\,\overline{x_1x_0})}$$

$$Y = \overline{\bar{x}_2\bar{x}_0\; x_2\;\overline{\bar{x}_3\,\overline{x_1x_0}}}$$

==========

Die Logikschaltung mit Shefferg liedern zeigt Abb. 5.92a.
Die Umformung für den Einsatz von Norgliedern ergibt:

$$Y = \overline{\overline{x_2 \vee \bar{x}_0} \vee x_2(x_3 \vee \overline{\bar{x}_1 \vee \bar{x}_0})}$$

$$Y = \overline{x_2 \vee x_0} \vee \bar{x}_2 \vee x_3 \vee \bar{x}_1 \vee \bar{x}_0$$

==========

Die Logikschaltung mit Norgliedern zeigt Abb. 5.92b.

zu 6. Wird das L-Signal durch eine positive Spannung gebildet, sind die Dioden in Abb. 5.34 mit umgekehrter Polarität einzubauen und der Arbeitswiderstand des Gliedes ist an den positiven Pol der Betriebsspannung anzuschließen.

Solange in dieser Schaltanordnung mindestens ein Eingang 0-Signal hat, fließt ein Strom durch die Dioden und den Arbeitswiderstand, der infolge des Spannungsteilerverhältnisses ein 0-Signal bewirkt. (Abb. 5.93)

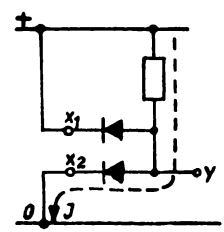


Abb. 5.93

Literaturnachweis

H. Töpfer, D. Schrepel, A. Schwarz:
Universelles Baukastensystem für pneumatische Steuerungen.
Zmsr 7 (1964) 2, Seiten 63...72

INGENIEUR-
FERNSTUDIUM

Birnstiel

Steuerungs- und Regelungstechnik 6

Herausgeber:
Institut für Fachschulwesen
der Deutschen Demokratischen Republik
Karl-Marx-Stadt

L E H R W E R K
für das Ingenieur-Fernstudium

Horst Birnstiel

S T E U E R U N G S - U N D R E G E L U N G S T E C H N I K

6

Glieder-Strecken-Regler-Regelkreise

V e r ö f f e n t l i c h t :

INSTITUT FÜR FACHSCHULWESEN DER
DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
K A R L - M A R X - S T A D T

2. Auflage

Alle Rechte vorbehalten

Ag 613/23/65/1300 Best.-Nr. 5034-06

Vorzugsschutzgebühr MDN 5.50

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	Einteilung der Signale und der Glieder von Steuerungen und Regelungen nach TGL 14591	1
	Wiederholungsfragen zu 1.	8
2.	Beschreibungs- und Untersuchungsmethoden von Gliedern	9
2.1.	Grundsätzliche Bemerkungen	9
2.2.	Statische Beschreibung und Beschränkung auf stetige lineare Glieder	10
2.3.	Dynamische Beschreibung von stetigen linearen Gliedern	13
2.3.1.	Die Sprungantwort, die Übergangsfunktion	13
2.3.2.	Die Differentialgleichung	15
2.3.3.	Hinweis auf den Frequenzgang	25
2.3.4.	Hinweis auf die Ortskurve des Frequenzganges	27
	Wiederholungsfragen zu 2.	28
	Übungsaufgaben zu 2.	28
3.	Stetige lineare Glieder	29
3.1.	Übersicht über die stetigen linearen Grundglieder	29
3.2.	Zusammenschaltung von Gliedern	37
3.3.	Zusammengesetzte lineare Glieder	40
	Wiederholungsfragen zu 3.	44
	Übungsaufgaben zu 3.	45
4.	Steuer- und Regelstrecken	47
	Wiederholungsfragen zu 4.	59
	Übungsaufgaben zu 4.	59
5.	Regeleinrichtungen	60
5.1.	Einteilung	60
5.2.	Zweipunktregler	61
5.3.	Zweilaufregler	68
5.4.	Stetige lineare Regler, Grundbegriffe	69

		Seite
5.5.	Beispiele stetiger linearer Regler ohne Rückführung	76
5.5.1.	P-Regler	77
5.5.1.1.	P-Regler ohne Hilfsenergie	77
5.5.1.2.	P-Regler mit pneumatischer Hilfsenergie	79
5.5.1.3.	P-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie	80
5.5.1.4.	P-Regler mit elektrischer Hilfsenergie	81
5.5.1.5.	P-Regler mit elektronischer Hilfsenergie	83
5.5.2.	I-Regler	84
5.5.2.1.	I-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie	84
5.5.2.2.	I-Regler mit elektrischer Hilfsenergie	86
5.5.3.	Beispiele von PI-, PD-, PID-Reglern ohne Rückführung	87
5.5.4.	Nachteile von Reglern ohne Rückführung	88
5.6.	Rückführungen	90
5.6.1.	Beispiel	90
5.6.2.	Grundlagen zu den Rückführungen	92
5.6.3.	Die gerätemäßige Verwirklichung der verschiedenen Rückführungen	97
5.7.	Beispiele stetiger Regler mit Rückführungen	104
5.7.1.	Pneumatische Energieschalter (Düse-Prallplatte) mit verschiedenen Rückführungen	104
5.7.2.	Hydraulischer Energieschalter (Strahlrohr) mit verschiedenen Rückführungen	109
5.7.3.	Elektrischer Energieschalter (Verstärker - Motor - Getriebe) mit verschiedenen Rückführungen	112
5.7.4.	Elektronischer Energieschalter (elektronischer Verstärker) mit verschiedenen Rückführungen	114
	Wiederholungsfragen zu 5.	115
	Übungsaufgaben zu 5.	116
6.	Regelkreise	118
6.1.	Allgemeines	118
6.2.	Zweipunktregelkreise	122
6.2.1.	Charakterisierung der Regelstrecke	122
6.2.2.	Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich	125

		Seite
6.2.3.	Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich	128
6.2.4.	Maßnahmen zum Verkleinern der Schwankungsbreite	132
6.3.	Zweilaufregelkreise	133
6.4.	P-Regelkreise	135
6.4.1.	Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert	135
6.4.2.	Beschreibende Gleichung	136
6.4.2.1.	P-Regeleinrichtung an P-Strecke	136
6.4.2.2.	P-Regeleinrichtung an I-Strecke	139
6.5.	I-Regelkreise	141
6.5.1.	Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert	141
6.5.2.	Beschreibende Gleichung	141
6.5.2.1.	I-Regeleinrichtung an P-Strecke	141
6.5.2.2.	I-Regeleinrichtung an I-Strecke	143
6.6.	PI-Regelkreise	144
6.7.	Regelkreise mit D-Anteil	145
6.7.1.	Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert	145
6.7.2.	Einige Gleichungen	146
6.8.	Einstellregeln für lineare einschleifige Regelkreise	147
6.9.	Stabilitätskriterien	150
6.10.	Vermaschte Regelkreise	153
	Wiederholungsfragen zu 6.	156
	Übungsaufgaben zu 6.	157
	Lösungen der Übungsaufgaben	159

1. Einteilung der Signale und der Glieder von Steuerungen und Regelungen nach TGL 14591

Steuern und Regeln sind technische Vorgänge in abgegrenzten Systemen, bei denen die Werte physikalischer oder technischer Größen auf Grund eingebauter Gesetzmäßigkeiten in beabsichtigter Weise beeinflußt werden. Steuerungen und Regelungen können gerätetechnisch und funktionell betrachtet werden. Bei der gerätetechnischen Betrachtung werden die verwendeten Geräte, Bauglieder und sonstigen Einrichtungen sowie Anlagen und Anlagenteile unter besonderer Berücksichtigung der in ihnen wirkenden physikalischen und technischen Gesetzmäßigkeiten und Größen sowie ihrer Aufgabenstellung innerhalb des Steuerungs- oder Regelungsprozesses beschrieben.

Bei der funktionellen Betrachtung wird die prinzipielle Realisierung des gesamten Steuerungs- bzw. Regelungsprozesses auf Grund der Zuordnung der wirksamen Signale beschrieben. Der Weg, längs dessen die einen Steuerungs- bzw. Regelungsprozeß bestimmenden Wirkungen übertragen werden, heißt Wirkungsweg. Glieder sind Abschnitte des Wirkungsweges und als solche die wirkungsmäßigen Grundbestandteile von Steuerungen bzw. Regelungen. Bei der gerätetechnischen Betrachtung spricht man von Baugliedern, bei der funktionellen Betrachtung von Übertragungsgliedern. Die Wirkungsrichtung ist die Fortpflanzungsrichtung der Wirkungen. Sie kann nur angegeben werden, wenn alle beteiligten Glieder rückwirkungsfrei sind.

Glieder werden danach eingeteilt, welche Eingangssignale sie zu welchen Ausgangssignalen verarbeiten. Die also zunächst notwendige Unterteilung der Signale möge von einem Beispiel ausgehend erfolgen (Bild 1).

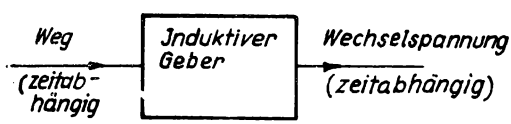


Bild 1

Ein induktiver Geber formt einen Weg in eine Wechselspannung um. Die Wechselspannung wird durch ihre Amplitude, ihre Frequenz und ihre Phasenlage bestimmt. Amplitude, Frequenz und Phasenlage sind Parameter (Bestimmungswerte) der Wechselspannung. Der Weg wird auf die Amplitude der Wechselspannung abgebildet. Die Wechselspannung als Signal hat einen Parameter (im gewählten Beispiel die Amplitude), der ein Abbild des Eingangsweges ist.

Allgemein:
Eine von einer physikalischen Größe getragene Zeitfunktion wird Signal genannt, wenn diese Zeitfunktion einen Parameter besitzt, der den Werteverlauf einer technischen oder physikalischen Größe, die signalisierte Größe genannt wird, abbildet.

Der Parameter des Signals, auf den der Werteverlauf der signalisierten Größte abgebildet wird, heißt Informationsparameter. Diejenige physikalische Größe, von der das Signal getragen wird, heißt Signalträger (im gewählten Beispiel die Wechselspannung). Die Dimension eines Signales ist die Dimension des Informationsparameters.

Es gibt meßwertabhängige Signale (die signalisierte Größe ist eine im Prozeß gemessene Größe) und Befehlssignale (die signalisierte Größe ist Ausgangsgröße einer Eingabeeinrichtung, z.B. eines Schalters oder einer Kurvenscheibe).
Die Einteilung der Signale kann nach verschiedenen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Dabei sind Teilungen in zwei Gruppen, von denen die eine das Gegenteil der anderen ist, am übersichtlichsten. Mehrere solcher Teilungen werden im folgenden vorgenommen, mit Beispielen erläutert und schließlich in einer Übersicht zusammengestellt (Tabellen 1 - 7).

Tabelle 1

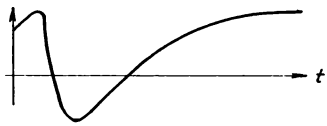
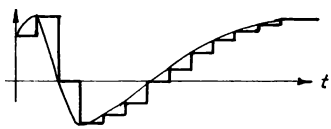
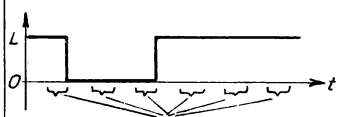
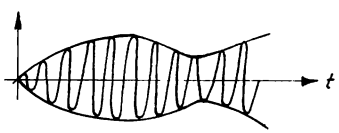
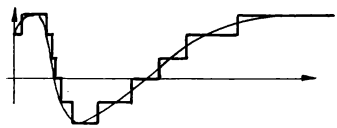
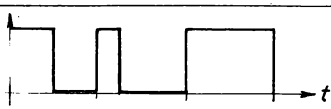
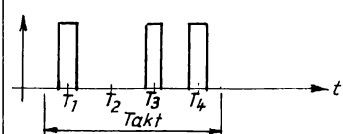
	Signale	
	ohne Quantisierung des Informationsparameters	mit Quantisierung des Informationsparameters
Bezeichnung	analoge Signale	diskrete Signale
Kennzeichen	Der Informationsparameter kann innerhalb gewisser Grenzen jeden beliebigen Wert annehmen.	Der Informationsparameter kann nur endlich viele diskrete (nicht zusammenhängende) Werte annehmen.
1, 2	 Jp = Amplitude	 Der Jp kann nur 2 Werte (0 und L, 0 entspricht z.B. dem ausgeschalteten, L dem eingeschalteten Zustand eines Relais) annehmen (binäre Signale).
3, 4	 Jp = Höhe der Rechteckimpulse Jn gewissen Grenzen ist jede Höhe möglich.	 Ausgang eines Zweipunkt-Fallbügelreglers. Jn den Tastpausen wird der Wert der vorangehenden Tastung übertragen.
5, 6	 Jp = Amplitude	 Jp = Höhe der Rechteckimpulse Es sind nur Höhen, die ganzzahlige Vielfache einer Einheit sind, möglich.
7, 8	 Jp = Breite der Rechteckimpulse Jn gewissen Grenzen ist jede Breite möglich.	 Jp = Anordnung von Jmpulsen Zu bestimmten Zeitpunkten T_i kann ein Jmpuls erscheinen oder nicht. Die Anordnung der Jmpulse enthält die Jnformation.

Tabelle 2

	Signale	
	ohne Zeitquantisierung	mit Zeitquantisierung
Bezeichnung	kontinuierliche Signale	diskontinuierliche Signale
Kennzeichen	Der Informationsparameter kann sich in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern.	Der Informationsparameter kann sich nicht in jedem beliebigen Zeitpunkt ändern.
Beispiele nach Tabelle 1	1, 2, 5, 6	3, 4, 7, 8

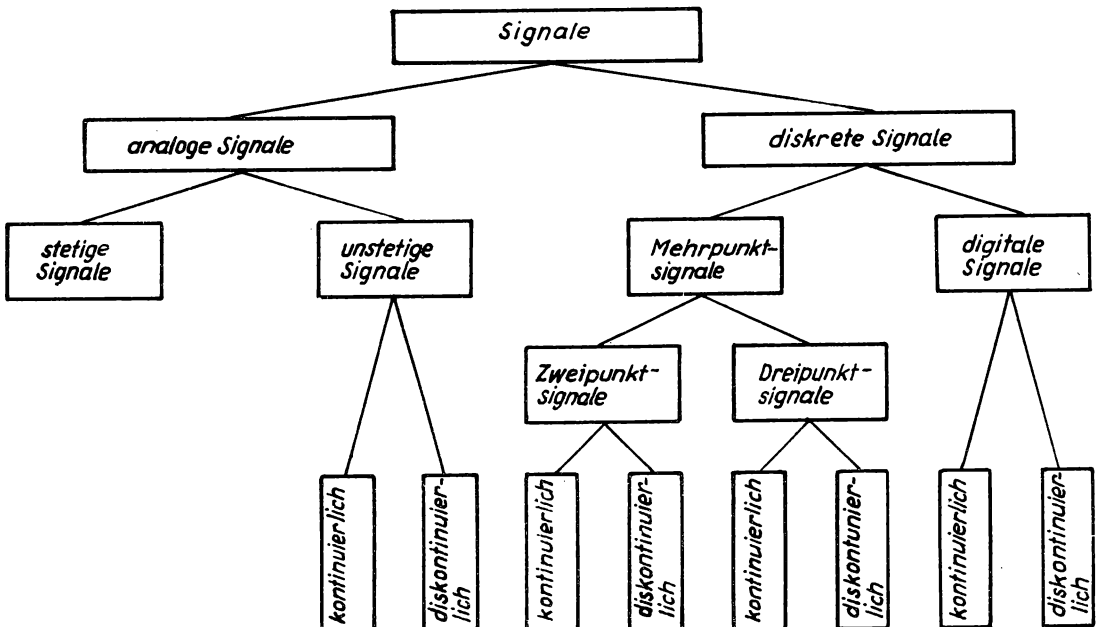
Tabelle 3

	Signale	
Bezeichnung	stetige Signale	unstetige Signale
Kennzeichen	Der zeitliche Verlauf des Informationsparameters ist eine stetige Funktion der Zeit.	Der zeitliche Verlauf des Informationsparamters ist eine unstetige Funktion der Zeit.
Beispiele nach Tabelle 1	1, 5	3, 7, 2, 4, 6, 8

Tabelle 4

	Diskrete Signale	
Bezeichnung	Mehrpunktsignale	digitale Signale
	Mehrpunktsignale sind alle diskreten Signale, die keine digitalen Signale sind.	Die diskreten Werte des Informationsparameters entsprechen Worten eines vereinbarten Alphabetes.
Beispiele nach Tabelle 1	2, 4	6, 8

Tabelle 5


Signale
analoge Signale
diskrete Signale
stetige Signale
unstetige Signale
Mehrpunkt-signale
digitale Signale
Zweipunkt-signale
Dreipunkt-signale
kontinuierlich
diskontinuier-lich
kontinuierlich
diskontinuier-lich
kontinuierlich
diskontuniер-lich
kontinuierlich
diskontinuier-lich

Die Einteilung der Glieder wird an Hand der übertragenen Signale vorgenommen. Man erhält so in Anlehnung an die Signaleinteilung die folgenden Bezeichnungen.

Tabelle 6

Bezeichnung	Kennzeichen
analoge Glieder	Zu analogen Eingangssignalen werden analoge Ausgangssignale abgegeben.
diskrete Glieder	Die Ausgangssignale sind diskret (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
kontinuierliche Glieder	Zu kontinuierlichen Eingangssignalen werden kontinuierliche Ausgangssignale abgegeben.
diskontinuierliche Glieder	Die Ausgangssignale sind diskontinuierlich (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
stetige Glieder	Zu stetigen (und ggf. in allen ihren Ableitungen stetigen) Eingangssignalen werden stetige Ausgangssignale abgegeben.
unstetige Glieder	Die Ausgangssignale sind unstetig (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
lineare Glieder	Es gilt das Überlagerungsgesetz. k-fache Eingangsänderungen ergeben k-fache Ausgangsänderungen.
nichtlineare Glieder	Das Überlagerungsgesetz gilt nicht.
Mehrpunktglieder	Die Ausgangssignale sind Mehrpunktsignale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
digitale Glieder	Die Ausgangssignale sind digitale Signale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
Zweipunktglieder	Die Ausgangssignale sind Zweipunktsignale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).
binäre Glieder	Binäre Eingangssignale werden zu binären Ausgangssignalen verarbeitet.
Dreipunktglieder	Die Ausgangssignale sind Dreipunktsignale (unabhängig vom Typ der Eingangssignale).

In Tabelle 7 ist die Einteilung der Glieder übersichtlich zusammengestellt. Dort sind auch Beispiele zu den verschiedenen Gliedern angegeben.

Tabelle 7

Glieder
analoge Glieder
diskrete Glieder
stetige Glieder
unstetige Glieder
Mehrpunkt-glieder
digitale Glieder
lineare Glieder
nichtlineare Glieder
kontinuierlich
diskontinuierlich
Zweipunkt-glieder
Dreipunkt-glieder
kontinuierlich
diskontinuierlich
kontinuierlich
diskontinuierlich
Beispiele:
Idealisierung
Mögliche Annäherung für viele Glieder.
Elektromotor, Düse-Prall-platte, Thermoelement usw.
Impulshöhen-modulator, Impulsbreiten-modulator
Relais Zweipunkt-regler
getastete Zweipunkt-regler
polarisiertes Relais
Fallbügel-regler
digitales Voltmeter
Messstellen-umschalter mit AD-Umsetzer

Wiederholungsfragen zu 1.

W1.1. Was ist ein Signal?

W1.2. Was versteht man unter dem Informationsparameter eines Signals?

W1.3. Welche physikalischen Größen kommen hauptsächlich als Signalträger vor?

W1.4. Welches sind die Kennzeichen von analogen bzw. diskreten Signalen?

W1.5. Nennen Sie Beispiele von analogen bzw. diskreten Signalen!

W1.6. Welches sind die Kennzeichen von kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen Signalen?

W1.7. Nennen Sie Beispiele von kontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen Signalen!

W1.8. Welches sind die Kennzeichen von stetigen bzw. unstetigen Signalen?

W1.9. Nennen Sie Beispiele von stetigen bzw. unstetigen Signalen!

W1.10. Wodurch ist ein digitales Signal gekennzeichnet?

W1.11. Nennen Sie Beispiele von Zweipunktsignalen!

W1.12. Verdecken Sie die rechte Seite der Tabelle 6 und charakterisieren Sie mit eigenen Worten die verschiedenen Glieder!

2. Beschreibungs- und Untersuchungsmethoden von Gliedern

2.1. Grundsätzliche Bemerkungen

Steuerungen und Regelungen sind aus einzelnen Gliedern aufgebaut: Meßfühler, Meßwandler, Sollwertgeber, Vergleichsglied, Zeitglied, Verstärker, Stellantrieb, Stellglied, Rückführung, Strecke, usw. Um das Zusammenwirken dieser Glieder übersehen zu können, bedarf es zunächst der Erfassung der einzelnen Glieder. Man braucht Aussagen, die ein Glied statisch und dynamisch eindeutig beschreiben. Diese Aussagen können messend oder rechnend gewonnen werden. Die Messung liefert Kennlinien und Diagramme. Die Rechnung liefert Gleichungen. Die exakte mathematische Behandlung von Regelungsaufgaben ist oft sehr schwierig bzw. überhaupt nur näherungsweise möglich. Deshalb sind in der Regelungstechnik viele Methoden zur Behandlung von Aufgaben üblich, bei denen Rechnung, Messung und Übergänge zwischen beiden sich gegenseitig ergänzen. Häufig kann trotzdem auf ein Probieren an den Anlagen mit dem Ziel, die günstigste Arbeitsweise zu finden, nicht verzichtet werden. Das sinnvolle Probieren ist eine exakte, wissenschaftliche Arbeitsmethode. Eine Verbindung zwischen Rechnen und Probieren stellt der Einsatz von Modellregelkreisen dar. Dort kann ohne besonderen Aufwand im Modell eine große Anzahl von Möglichkeiten für die Lösung einer Regelungsaufgabe durchprobiert und die günstigste ausgesucht werden. Oftmals ist das Probieren an der Anlage selbst entweder viel zu aufwendig, teuer, langwierig oder gar unmöglich. Bei Standardaufgaben wird eine Berechnung häufig unnötig sein, weil aus den bekannten Ergebnissen gleichartiger Aufgaben (Temperatur-, Druckregelung, usw.) auf die neue Aufgabe geschlossen werden kann. Messende wie rechnerische Beschreibung können entweder nur den stationären Zustand berücksichtigen oder auch die Dynamik einschließen.

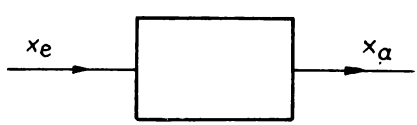
Die messende Beschreibung gibt graphisch an, welcher Ausgang im stationären Zustand zu welchem Eingang gehört (statische Kennlinie) und wie sich der Ausgang zeitlich ändert, wenn sich

der Eingang in bestimmter bekannter Weise zeitlich ändert (dynamische Kennlinien). Die rechnerische Beschreibung liefert auf Grund von entsprechenden Gleichungsansätzen (z.B. Maschensatz der Elektrotechnik, Momentengleichgewicht der Mechanik) eine Beziehung zwischen Eingangsgröße, Ausgangsgröße und der Zeit. Bei der dynamischen Beschreibung sind in der Gleichung die Änderungen der Größen (mathematisch durch Differentiale dargestellt) enthalten, die Gleichungen sind also Differentialgleichungen. Überall, wo Änderungen, wo dynamische Zustände rechnerisch beschrieben werden, treten Differentialgleichungen auf. Einschwingvorgänge der Regelgröße auf die Führungsgröße, Änderungen der Störgrößen usw. spielen aber in der Regelungstechnik eine große Rolle. So erklärt sich die Bedeutung der Differentialgleichungen für die Regelungstechnik.

2.2. Statische Beschreibung und Beschränkung auf stetige lineare Glieder

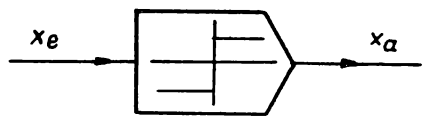
Bei der statischen experimentellen Erfassung eines Gliedes wird der Eingang von Wert zu Wert fest eingestellt und gemessen, welche dazugehörigen Ausgangswerte sich nach Ablauf des Einschwingvorganges ergeben.

Bei der statischen rechnerischen Erfassung eines Gliedes wird unter Vernachlässigung des Zeitverhaltens eine Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße aufgestellt.
Die einfachste Abhängigkeit der Ausgangsgröße von der Eingangsgröße eines Gliedes ist die lineare Abhängigkeit (k-fache Eingangsänderungen ergeben k-fache Ausgangsänderungen). Es ist üblich (TGL 14091), lineare Glieder im Blockschaltbild durch ein Rechteck zu kennzeichnen (Bild 2).

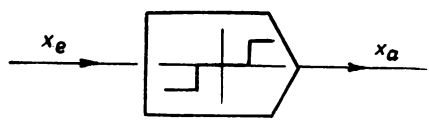


Lineares Glied
Bild 2

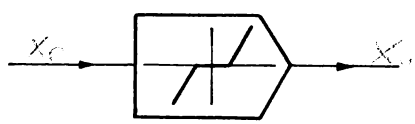
Die rechnerische Beschreibung der stetigen linearen Glieder führt auf lineare Differentialgleichungen.
Alle nicht linearen Glieder (dazu gehören die stetigen nicht linearen, die analogen unstetigen nicht linearen und die diskreten Glieder) heißen nichtlineare Glieder. Es ist üblich, nichtlineare Glieder im Blockschaltbild durch ein Fünfeck zu kennzeichnen, in dessen Mitte die statische Kennlinie des betreffenden Gliedes skizziert wird (Bilder 3 bis 7).



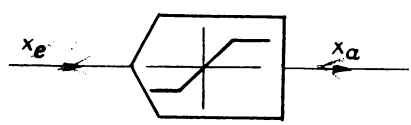
Zweipunktglied



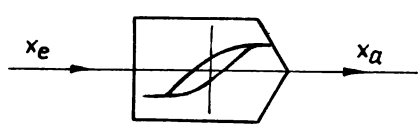
Dreipunktglied



Glied mit toter Zone



Glied mit Sättigung
(z. B. sämtliche Verstärker)

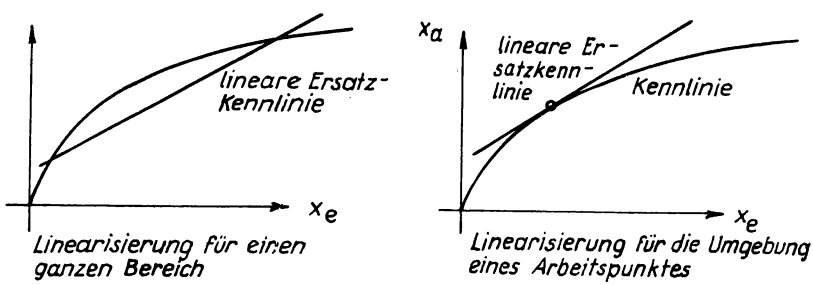


Glied mit Hysterese und Sättigung (z. B. Feder mit Reibung und Endlage, Membranventil), nichtlineares stetiges Glied

Die rechnerische Beschreibung der nichtlinearen Glieder ohne Quantisierung des Informationsparameters bzw. der Zeit führt auf nichtlineare Differentialgleichungen; die rechnerische Beschreibung der nichtlinearen Glieder mit Quantisierung des Informationsparamters bzw. der Zeit führt auf Differenzengleichungen. Der mathematische Aufwand dieser Methoden ist beachtlich.

Kernstück und wichtige Grundlage der gesamten Steuerungs- und Regelungstechnik ist die Betrachtung der stetigen linearen Glieder und deren Zusammenwirken. Streng genommen gibt es gar keine exakt linearen Glieder, denn jedes reale Bauglied hat Anschläge (mechanisch oder elektrisch), und diese sind bereits typische Nichtlinearitäten. Im "Kleinen" und als Näherung in gewissen Bereichen kann man aber viele Glieder als linear annehmen (Bilder 8 u. 9). Nur die Schaltsysteme, die ausschließlich Zweipunktglieder enthalten, bedürfen einer grundsätzlich anderen Betrachtung, die mittels der Rechenverfahren der Schaltalgebra möglich ist.

Der vorliegende Lehrbrief enthält einige wichtige Dinge zu den stetigen linearen Gliedern und stetigen linearen Systemen und wenige anschaulich beschreibende Bemerkungen zu nichtlinearen Gliedern und nichtlinearen Systemen. Man verstehe das stetige lineare Verhalten als wichtige Grundlage der gesamten Steuerungs- und Regelungstechnik und als mögliche ideale Näherung für viele reale Vorgänge.



Linearisierung für einen ganzen Bereich

Linearisierung für die Umgebung eines Arbeitspunktes

2.3. Dynamische Beschreibung von stetigen linearen Gliedern

2.3.1. Die Sprungantwort, die Übergangsfunktion

Die Sprungantwort ist eine graphische, sehr anschauliche, aus Messungen zu gewinnende dynamische Charakterisierung von Gliedern. Bei der Aufnahme der Sprungantwort wird die Eingangsgröße des zu untersuchenden Gliedes sprungförmig verstellt (Bild 10).

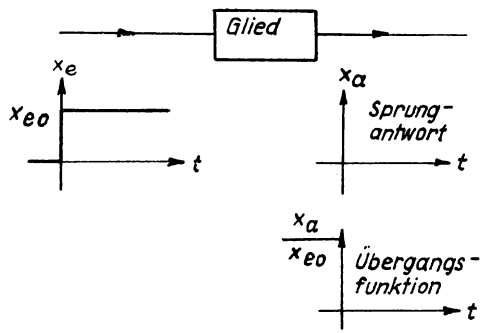


Bild 10

Das sich daraufhin ergebende zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße nennt man die Sprungantwort des betreffenden Gliedes. Wird die Ausgangsgröße auf die Einheit der Eingangsgröße bezogen, um von dem bei der Aufnahme der Sprungantwort gewählten Wert der Eingangsgröße unabhängig zu werden, so erhält man die Übergangsfunktion des betreffenden Gliedes. Die Übergangsfunktion eines Gliedes ist also die auf den Einheitseingang bezogene Sprungantwort. Experimentell nimmt man immer die Sprungantwort auf. Durch Quotientenbildung erhält man dann die Übergangsfunktion. Da die Sprungantwort die experimentell erhaltene dynamische Charakterisierung eines Gliedes ist, wird sie im folgenden meist benutzt werden.

Beispiele:

1. Beispiel: Sprungantwort einer Temperaturregelstrecke (z.B. eines Zimmers) (Bild 11)

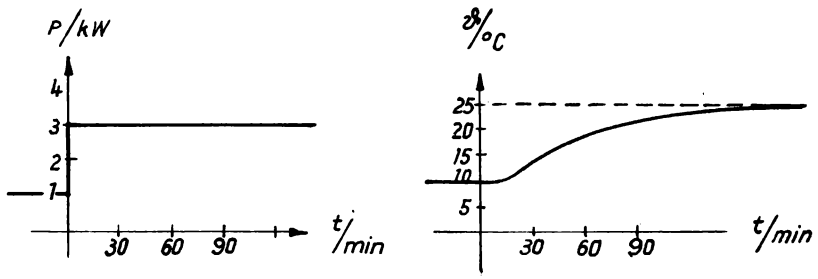


Bild 11

Nach sprungförmiger Verstellung der Heizleistung von 1 kW auf 3 kW ändert sich die Temperatur, die bisher 10 °C betrug, zunächst gar nicht (Totzeit), um dann langsam bis auf 25 °C zu steigen. Die Sprungantwort kann entweder mit Stoppuhr, Millimeterpapier und Temperaturmeßwerk aufgenommen oder von einem Temperaturschreiber geschrieben werden.

Die Art und Weise des Temperaturüberganges ist für die untersuchte Strecke charakteristisch, und man kann durch Auswertung der Sprungantwort Kenndaten erhalten.

2. Beispiel: Sprungantwort eines Gleichstrommotors, der einen Schieberweg verstellt (Bild 12)

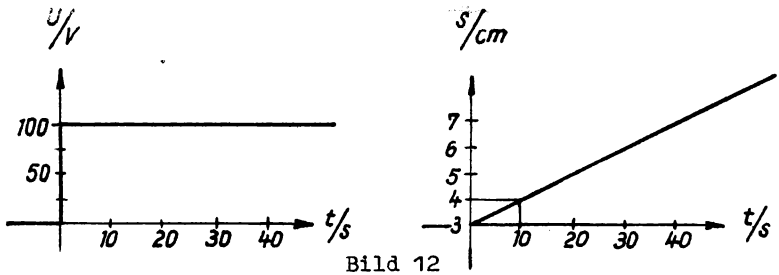


Bild 12

Wird die Speisespannung von 0 auf 100 V geschaltet, so
möge bis dahin an der Stelle s = 3 cm gestanden haben
wandt sich der Schieber mit einer konstanten Geschwindigkeit
Sein Weg ändert sich wie aus der Sprungantwort Bild ersichtlich.

1. Beispiel: Sprungantwort eines Tachodynamos (Bild 13)
Eingang = Winkel, Ausgang = Spannung

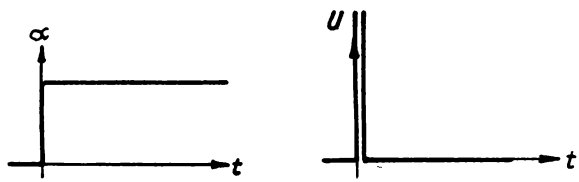


Bild 13

Wird der Winkel sprungartig verstellt, so wird im Moment des Verstellens eine große Spannung abgegeben, nach stattgefundenem Sprung aber keine Spannung mehr. Sprungantwort ist die skizzierte Nadelfunktion.

Sicher leuchtet Ihnen ein, daß für den Tachodynamo diese messende Untersuchung nicht geeignet ist. Man wird hier einen anderen Eingang benutzen, nämlich den Anstiegseingang.

2.3.2. Die Differentialgleichung

Die Differentialgleichung ist die rechnerische Erfassung des Verhaltens eines Gliedes. Sie stellt das Ergebnis eines entsprechenden Ansatzes dar (Tabelle 8).

Tabelle 8

G l i e d e r	G l e i c h u n g s - a n s a t z
elektrisch, elektronisch	Maschensatz, Knotenpunktsatz
mechanisch Translation	Kräftegleichgewicht
mechanisch Rotation	Momentengleichgewicht
thermisch	Zugeführte Wärmemenge = abgeführte + gespeicherte Wärmemenge
hydraulisch	Zufluß = Abfluß + Speicherung
usw.	usw.

In der Gleichung werden ganz allgemein die Ausgangsgröße und deren Ableitungen sowie die Eingangsgröße und deren Ableitungen, alle mit Koeffizienten behaftet, enthalten sein. Wir beschränken uns auf solche linearen Verhältnisse (Alle Größen treten nur in der ersten Potenz auf), bei denen die Koeffizienten Konstanten sind.

$$\ldots + a_2 \ddot{x}_a + a_1 \dot{x}_a + a_o x_a = e_o x_e + e_1 \dot{x}_e + \ldots$$

a_o, a_1, a_2, ...,e_o, e_1, ... sind Konstanten des beschriebenen Gliedes. Die graphische Darstellung der Lösung der Differentialgleichung für x_e = konstant = c (Sprungeingang) ergibt natürlich die Sprungantwort.

Beispiele:

1. Beispiel: Der in Bild 14 skizzierte passive Vierpol wird in elektronischen Zeitgliedern (in Reglern, in Modellregelkreisen, in Analogrechnern) vielfach verwendet. Wie hängt die Ausgangsspannung von der Eingangsspannung und von der Zeit ab?

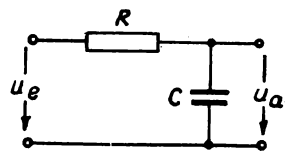


Bild 14

Bei der Aufnahme der Sprungantwort würde man die Eingangsspannung einschalten und die Änderung von u_a aufnehmen. u_a wird verzögert so groß wie u_e werden. Das hat man schon im Gefühl. Hier kann man aber auch leicht die beschreibende Gleichung finden. Die Anwendung des Maschensatzes ergibt

$$u_e = i\,R + u_a \quad ,$$

die Strom-Spannungs-Beziehung am Kondensator ergibt

$$i = C\,\frac{du_a}{dt} = C\cdot\dot{u}_a \quad .$$

Also ist $RC\cdot\dot{u}_a + u_a = u_e$ die den Vierpol beschreibende Differentialgleichung. Sie hat die Form $T\cdot\dot{u}_a + u_a = u_e$. $T = RC$ ist die Zeitkonstante des Verzögerungsvierpoles ($s = \Omega \cdot F$).
Die Lösung der Differentialgleichung lautet mit der Anfangsbedingung
$u_a(o) = o$ für $u_e = \text{konstant} = u_{eo}$:

$$u_a = u_{eo}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

Für $t \longrightarrow \infty$ (im stationären Zustand) wird $u_a = u_{eo}$. Der Übergang erfolgt mit Verzögerung 1. Ordnung. Der Vierpol ist ein T_1-Glied.

2. Beispiel: Gleichstrommotor (Bild 15).

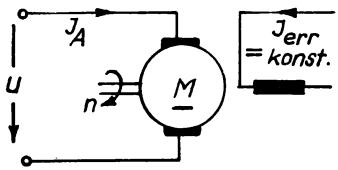


Bild 15

Eingang = Ankerspannung (Erregung = konstant), Ausgang = Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi n$. Hier dreht sich etwas, also wird der Ansatz: Antreibendes Moment ist gleich der Summe aller hemmenden Momente zur Gleichung führen. Das antreibende Moment ist dem Ankerstrom I_A und dieser der Differenz aus Eingangsspannung U_e = Ankerspannung U und Gegenurspannung U_g proportional, wobei die Gegenurspannung wiederum der Winkelgeschwindigkeit proportional ist. Als hemmende Momente seien ein konstantes Lastmoment M_L und das Beschleunigungsmoment $\Theta \dot{\omega}$ angenommen (Die Induktivität des Ankers und die Reibung mögen für die erste Näherung einer beschreibenden Gleichung vernachlässigt werden.).

Man erhält also: $c(U - U_g) = M_L + \Theta \dot{\omega}$

$$U_g = k\omega$$

Elimination von U_g ergibt die Gleichung $\Theta \dot{\omega} + c \cdot k \cdot \omega = c\, U - M_L$.

Man schreibt solche Gleichungen gern so um, daß die Ausgangsgröße (hier ω) mit dem Koeffizienten 1 steht.

$$\frac{\Theta}{c\,k} \dot{\omega} + \omega = \frac{1}{k} U - \frac{1}{c\,k} M_L$$

In dieser Form kann man nämlich sofort für den stationären Zustand (keine Änderung von ω mehr, also $\dot{\omega} = 0$) für U=konstant ablesen:

$$\omega_{\text{stationär}} = \frac{1}{k} U - \frac{1}{c\,k} M_L$$

Man sieht so schon, ohne die Differentialgleichung zu lösen, die sich einstellende Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit. Sie ist umso größer, je größer die Eingangsspannung ist und umso kleiner, je größer das Lastmoment ist.

Der Koeffizient bei $\dot{\omega}$ hat die Bedeutung einer Zeitkonstanten. Denn: Auf der linken Seite der Gleichung steht eine Summe. Addieren lassen sich nur Größen gleicher Dimension. $\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}$ hat die Dimension $\frac{\text{Dimension von } \omega}{\text{Zeit}}$. Damit der ganze erste Summand die Dimension von ω, also die Dimension des zweiten Summanden hat, muß der Faktor $\frac{\Theta}{c\,k}$ die Dimension einer Zeit haben (s, min, h, ...).

$\frac{\Theta}{c\,k}$ ist die Zeitkonstante des Motors.

Nun soll hier gleich eine Betrachtungsweise angeführt werden, die für die ganze Regelungstechnik wichtig ist. U ist im Beispiel die von o an gemessene Ankerspannung, ω ist die von o an gemessene Winkelgeschwindigkeit. Denkt man sich den Motor als Drehzahlregelstrecke, so gehört zur Sollwinkelgeschwindigkeit ω_s im Normalbetriebsfalle eine Spannung U_o · U_o sorgt im Normalbetriebsfalle für die Sollwinkelgeschwindigkeit ω_s Will sich von diesem Grundzustand = Ausgangszustand aus die Winkelgeschwindigkeit (etwa durch veränderte Belastung) ändern, so muß die Regeleinrichtung für ein verändertes U sorgen und damit die Sollwinkelgeschwindigkeit aufrecht erhalten.

$$U = U_o + \Delta u$$

$$\omega = \omega_s + \Delta \omega$$

(Abweichungen der Größen von Bezugswerten werden mit kleinen lateinischen Buchstaben bezeichnet. Um den Abweichungscharakter zu betonen und um den griechischen Buchstaben als Abweichungsbezeichnung kenntlich zu machen, ist Δ u und $\Delta\omega$ geschrieben worden.)

Ein positives $\Delta\omega$ (Winkelgeschwindigkeit höher als Sollwinkelgeschwindigkeit) muß ein negatives Δu (Ankerspannung niedriger als U_o) auslösen. Es leuchtet ein, daß es sinnvoller sein wird, statt der Bezugsgrößen o V und o $\frac{1}{s}$ die Bezugsgrößen U_o und ω_s zu nehmen. Von diesen Bezugswerten aus arbeitet ja eine Regelung. Spätere Beschreibungen von Regelvorgängen werden sich einfacher gestalten, wenn diese geschickte Bezugslage gewählt wird. Die mathematische Formulierung des Satzes: "Zur Sollwinkelgeschwindigkeit ω_s gehört im Normalbetriebsfalle die Spannung U_o" lautet:

$$\omega_s = \frac{1}{k} U_o - \frac{1}{c\,k} M_L$$

Wird nun $U = U_o + \Delta u$ und $\omega = \omega_s + \Delta\omega$ in die Differentialgleichung des Motors eingesetzt, so erhält man wegen $\dot{\omega}_s = o$:

$$\frac{\Theta}{c\,k} \Delta\dot{\omega} + \omega_s + \Delta\omega = \frac{1}{k} U_o + \frac{1}{k} \cdot \Delta u - \frac{1}{c\,k} \cdot M_L$$

Also:

$$\frac{\Theta}{c\,k} \Delta\dot{\omega} + \Delta\omega = \frac{1}{k} \cdot \Delta u$$

Δu ist die Abweichung der Eingangsspannung U von der Bezugsspannung U_o. $\Delta\omega$ ist die Abweichung der Ausgangswinkelgeschwindigkeit ω von der Sollwinkelgeschwindigkeit ω_s.

Hier ist als Eingang des Motors die Spannung angesehen worden und als Ausgang die Winkelgeschwindigkeit. Die Winkelgeschwindigkeitsabweichung ist im stationären Zustand der Spannungsänderung proportional. Der "Ausgang" ist dem "Eingang" proportional. So betrachtet ist der Motor ein P-Glied, und zwar ein solches mit Verzögerung 1. Ordnung.

3. Beispiel: Wird der Motor so eingesetzt, daß nicht seine Drehzahl und damit seine Winkelgeschwindigkeit, sondern ein von ihm verstellter Weg interessieren, so ist die Ausgangsgröße der Ausgangswinkel α , von dem ja leicht auf den ver-

stellten Weg umgerechnet werden kann. Es gilt $\omega = \dot{\alpha}$, also $\Delta\omega = \Delta\dot{\alpha}$. Mit dieser Beziehung erscheint die Motorgleichung in der Form

$$\frac{\Theta}{c\,k}\,\Delta\ddot{\alpha} + \Delta\dot{\alpha} = \frac{1}{k}\cdot\Delta u$$

Man schreibt in der Regelungstechnik Gleichungen sinnvollerweise immer so um, daß die Ausgangsgröße selbst mit dem Koeffizienten 1 erscheint. Das ist hier durch Integration zu erreichen.

$$\frac{\Theta}{c\,k}\,\Delta\dot{\alpha} + \Delta\alpha = \frac{1}{k}\int \Delta u\,dt$$

Es ist die Ausgangsgrößenabweichung dem Integral der Eingangsgrößenabweichung proportional (Streng genommen gilt das nur für Zeitkonstante $= \frac{\Theta}{c\,k} = 0$). So betrachtet ist der Motor ein I-Glied (mit Verzögerung 1. Ordnung).

4. Beispiel: Tachodynamo. Es ist die abgegebene Spannung u_a der Drehzahl n proportional. $u_a = k \cdot n$. So betrachtet ist der Tachodynamo ein P-Glied. Wird als Eingang dagegen der Winkel α angesehen, so wird wegen $\omega = 2\pi n = \dot{\alpha}$:

$$u_a = \frac{k}{2\pi}\,\dot{\alpha} = \frac{k}{2\pi}\cdot\frac{d\alpha}{dt}$$

Die Ausgangsspannung ist dem Differentialquotienten des Eingangswinkels proportional. So betrachtet ist der Tachodynamo ein D-Glied. Der Tachodynamo wird in der Technik sowohl als P-Glied (z.B. Drehzahlmessung) wie auch als D-Glied (Aufschaltung der Änderungsgeschwindigkeit von Winkeln, z.B. Kursregelung von Flugzeugen, geschwindigkeitsproportionale Dämpfung in selbstabgleichenden Meßgeräten) verwendet.

5. Beispiel: Spannungsteiler (Bild 16). Wie hängt u_a von u_e ab?

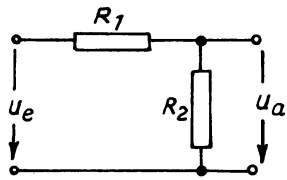


Bild 16

Nach der Spannungsteilerregel ist $u_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_e$.

Die Ausgangsspannung ist der Eingangsspannung proportional. u_a folgt u_e unverzögert. Es handelt sich um ein P-Glied ohne Verzögerung. Die Differentialgleichung ist von 0-ter Ordnung.

6. Beispiel: Masse-Feder-System mit Dämpfung (Bild 17)
Es liegt eine translatorische Bewegung vor. Also wird der Kräfteansatz zum Ziel führen. Es wirken auf den Körper der Masse m bei der Bewegung in Richtung der positiven x_a-Achse die eingezeichneten Kräfte.

Federkraft $= c\ (x_e - x_a)$

Trägheitskraft $= m\ \ddot{x}_a$

Dämpfungskraft $= d\ \dot{x}_a$

Das Kräftegleichgewicht verlangt: $m\ \ddot{x}_a + d\ \dot{x}_a = c\ (x_e - x_a)$.

Geordnet erhält man die Gleichung

$$\frac{m}{c}\ \ddot{x}_a + \frac{d}{c}\ \dot{x}_a + x_a = x_e$$

$\frac{d}{c}$ hat die Dimension Zeit, $\frac{m}{c}$ hat die Dimension $(\text{Zeit})^2$.

Allgemein hat die obige Gleichung also die Gestalt

$T_2^2\ \ddot{x}_a + T_1\ \dot{x}_a + x_a = x_e$. Ist der Einschwingvorgang abgeschlossen ($\ddot{x}_a = \dot{x}_a = 0$), so ist $x_a = x_e$. Es liegt T_2 - Verhalten vor. Die beiden Ableitungen der Ausgangsgröße charakterisieren eine Verzögerung 2. Ordnung. Das System ist schwingungsfähig.

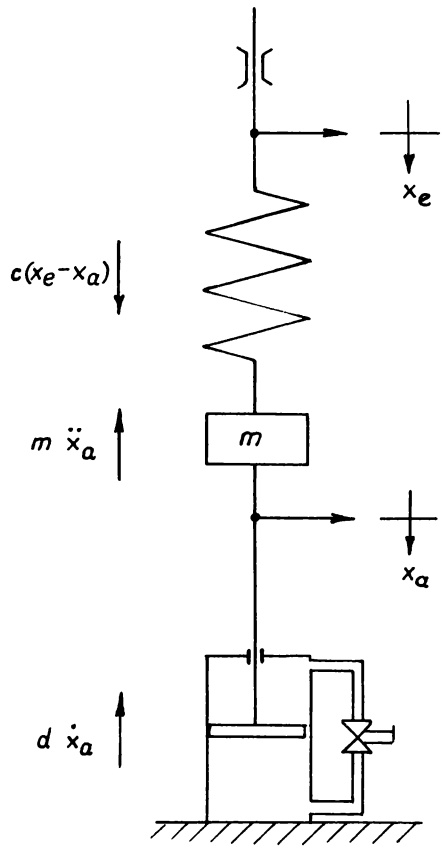


Bild 17

7. Beispiel: Pneumatisches Drossel-Speicher-System (Bild 18)

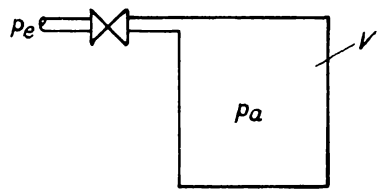


Bild 18

In der Kammer (Volumen V , Druck p_a) wird sich bei Anlegen eines konstanten Eingangsdruckes p_e über die Drossel (Öffnungsfläche A) der Druck p_a verzögert aufbauen. Näherungsweise gilt für die eingebrachte Luftmenge pro Zeiteinheit bei angenommener laminarer Strömung $\frac{dM}{dt} = k_1 A (p_e - p_a)$. Da das Volumen der Kammer konstant bleibt, muß der Druck steigen. Der Druckanstieg ist dem Mengenzuwachs dM und dem reziproken Volumen $\frac{1}{V}$ proportional:

$dp_a = k_2 \frac{dM}{V}$, also ist $\frac{dM}{dt} = \frac{V}{k_2} \cdot \frac{dp_a}{dt}$. Oben eingesetzt ergibt das $\frac{V}{k_1 k_2 A} \dot{p}_a + p_a = p_e$.

Diese Gleichung hat, wie schon die Gleichung des RC-Gliedes, die Form $T \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$.

T ist die Zeitkonstante des Einspeichersystems.

8. Beispiel: Transportband

Bei einem Transportband sei l die Entfernung zwischen Aufgabestelle und Abgabestelle, und das Band laufe mit der Geschwindigkeit v. Dann vergeht zwischen Aufschütten und Abschütten des Gutes die sogenannte Totzeit T_t. Es ist hier $T_t = \frac{l}{v}$. Ansonsten ist die pro Zeiteinheit abgegebene Menge gleich der pro Zeiteinheit aufgegebenen Menge: $x_a = x_e$ mit Zeitverschiebung T_t. Das Totzeit-Verhalten läßt sich mittels einer Verein-

barung gleichungsmäßig erfassen. Vereinbarung: Funktionen negativer Argumente seien identisch Null. Das ist schon früher benutzt worden. $x_e(t) = x_{eo}$ bedeutet z.B. immer, daß $x_e(t)$ zur Zeit 0 auf den Wert x_{eo} springt (Sprungeingang). Für negative Zeiten (Die Zeit t ist bei $x_e(t)$ das Argument) ist $x_e = o$.

Also lautet die Gleichung eines Totzeitgliedes, eines T_t-Gliedes

$$x_a(t) = x_e(t - T_t)$$

Mit der getroffenen Vereinbarung bedeutet diese Schreibweise also:

$$x_a(t) = o \qquad \text{für } t < T_t$$

$$x_a(t) = x_e(t) \quad \text{für } t \geq T_t$$

7.3.3. Hinweis auf den Frequenzgang

Die beschreibende Differentialgleichung eines stetigen linearen Gliedes

$$\ldots + a_2\ddot{x}_a + a_1\dot{x}_a + a_o x_a = e_o x_e + e_1\dot{x}_e + \ldots$$

ergibt für Eingang = Sprungeingang ($x_e = x_{eo}$ = konstant) die arithmetische Formulierung der Sprungantwort.

Für Eingang = harmonische Schwingung ($x_e = x_{eo} \cdot \sin\omega t$) hat bei den stetigen linearen Gliedern der Ausgang im stationären Zustand eine phasenverschobene Schwingung anderer Amplitude gleicher Frequenz. $x_a = x_{ao} \sin(\omega t + \varphi)$. Setzt man das in die Differentialgleichung ein, so erhält man die dynamische Frequenzabhängigkeit des Übertragungsverhaltens eines Gliedes. Dabei stößt man auf besonders einfach zu handhabende Gleichungen, wenn die harmonischen Schwingungen komplex dargestellt werden. Von den dadurch möglichen Vereinfachungen macht ja insbesondere die Elektrotechnik Gebrauch. (komplexe Rechnung der Wechselstromtechnik)

$$x_e(j\omega) = x_{eo}\, e^{j\omega t}$$

$$\dot{x}_e(j\omega) = j\omega \cdot x_{eo}\, e^{j\omega t} = j\omega x_e(j\omega)$$

$$\ddot{x}_e(j\omega) = (j\omega)^2 x_{eo}\, e^{j\omega t} = (j\omega)^2 x_e(j\omega)$$

$$x_a(j\omega) = x_{ao}\, e^{j(\omega t+\varphi)}$$

$$\dot{x}_a(j\omega) = j\omega \cdot x_{ao}\, e^{j(\omega t+\varphi)} = j\omega\, x_a(j\omega)$$

$$\ddot{x}_a(j\omega) = (j\omega)^2 x_{ao}\, e^{j(\omega t+\varphi)} = (j\omega)^2 x_a(j\omega)$$

Eine komplex dargestellte Schwingungsgröße wird also abgeleitet, indem man sie mit $j\omega$ multipliziert. Aus der Rechenoperation Differenzieren ist die weit einfachere Rechenoperation Multiplizieren geworden.
Werden die Ausdrücke für x_e, $\dot{x}_e$, ..., x_a, $\dot{x}_a$, ... in die Differentialgleichung eingesetzt, so erhält man mit der Abkürzung $j\omega = p$

$$(\ldots + a_2 p^2 + a_1 p + a_o)\, x_a(p) = (e_o + e_1 p + \ldots)\, x_e(p)$$

$$x_a(p) = \frac{e_o + e_1 p + \ldots}{a_o + a_1 p + a_2 p^2 + \ldots}\, x_e(p)$$

$$x_a(p) = F(p) \cdot x_e(p)$$

Man nennt $F(p) = \dfrac{x_a(p)}{x_e(p)} = \dfrac{e_o + e_1 p + \ldots}{a_o + a_1 p + a_2 p^2 + \ldots}$

den Frequenzgang des betreffenden Gliedes.

Wie man den Frequenzgang formal aus der Differentialgleichung erhält, ist leicht ersichtlich:
Ableitung durch Multiplikation mit p ersetzen, $\dfrac{x_a(p)}{x_e(p)}$ bilden.

Der Frequenzgang ist das Verhältnis des als Schwingung komplex dargestellten Ausganges zu dem als Schwingung komplex dargestellten Eingang.

Gegenüber der Differentialgleichung gibt der Frequenzgang formal eine wesentlich einfachere Gleichung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße eines Gliedes. Statt der Differentialgleichung in der Zeitabhängigkeit liegt in der $j\omega$- Abhängigkeit eine algebraisch Gleichung $x_a(j\omega) = F(j\omega) \cdot x_e(j\omega)$ vor. Mit algebraischen Gleichungen läßt sich einfacher umgehen als mit Differential-

gleichungen. Größere regelungstechnische Rechnungen gestalten sich in der Frequenzgangsprache einfacher als in der Differentialgleichungssprache, bzw. werden so überhaupt erst möglich.

2.3.4. Hinweis auf die Ortskurve des Frequenzganges

Der Frequenzgang ist ein von ω abhängiger komplexer Ausdruck. Seine graphische Darstellung als Kurve in der komplexen Zahlebene mit der Kreisfrequenz ω als Kurvenparameter ergibt die Ortskurve des Frequenzganges.
Andererseits erhält man die Ortskurve eines stetigen linearen Gliedes auch aus einer experimentellen Schwingungsuntersuchung. Wird der Eingang eines solchen Gliedes sinusförmig mit der Kreisfrequenz ω und der Amplitude x_{eo} verstellt, so führt der Ausgang im stationären Zustand eine Sinusschwingung mit der gleichen Kreisfrequenz ω , der Amplitude x_{ao} und der Phasenverschiebung φ aus. Diese Untersuchung wird für etliche dem untersuchten Glied angemessene Kreisfrequenzen durchgeführt. Zeichnet man mit ω als Parameter die Zeiger der zugehörigen Länge $\frac{x_{ao}}{x_{eo}}$ unter dem zugehörigen Phasenwinkel φ , so erhält man als geometrischen Ort aller Zeigerspitzen die Ortskurve des untersuchten Gliedes.

Wiederholungsfragen zu 2.

W2.1. Was ist die Sprungantwort, was die Übergangsfunktion eines Gliedes?

W2.2. Wie kommt man zur Differentialgleichung eines Gliedes?

W2.3. Zur Beschreibung welcher Glieder können lineare Differentialgleichungen verwendet werden?

W2.4. Wieso ist jedes reale Bauglied "im Großen" betrachtet ein nichtlineares Glied?

W2.5. Wodurch sind P-, I-, D-Glieder charakterisiert?

W2.6. Was heißt statische, was heißt dynamische Beschreibung von Gliedern?

Übungsaufgaben zu 2.

Ü2.1. Zeichnen Sie zu den in den Bildern 11, 12, 13 angegebenen Sprungantworten die Übergangsfunktionen!

Ü2.2. Beschreiben Sie, wie die Aufnahme der Sprungantwort eines gasbeheizten Glasschmelzofens vor sich gehen müßte!

Ü2.3. In der in Bild 14 angegebenen Schaltung sei $R = 1\ M\Omega$, $C = 10\ \mu F$
Wie lautet die beschreibende Gleichung?

Ü2.4. In der in Bild 17 angegebenen Anordnung sei $m = 1$ kg, $c = 0{,}4\ \frac{kp}{cm}$, $d = 0{,}02\ \frac{kp}{cm/s}$. Wie lautet die beschreibende Differentialgleichung? (Rechnen Sie mit $g = 10\ m/s^2$.

3. Stetige lineare Glieder

3.1. Übersicht über die stetigen linearen Grundglieder

In den Beispielen des Abschnittes "Beschreibungsmethoden" fielen bereits die Bezeichnungen P-Glied, I-Glied, D-Glied, T_1-Glied, T_2-Glied, T_t-Glied. Diese Grundglieder, aus denen man alle anderen stetigen linearen Glieder aufgebaut denken kann, sind in der Tabelle 9 auf Seite 30 zusammengestellt, und in Tabelle 10 (s. S. 31) sind Beispiele dazu angegeben.

Es folgen noch einige notwendige Erläuterungen.

Bemerkungen zum PT_1-Glied:

Als T_1-Glied sei ein P-Glied mit dem Übertragungsfaktor 1 und mit Verzögerung 1. Ordnung bezeichnet. Die Bemerkungen sollen sich gleich auf ein PT_1-Glied beziehen, also auf ein P-Glied mit dem allgemeinen Übertragungsfaktor K und mit Verzögerung 1. Ordnung. Die beschreibende Gleichung eines PT_1-Gliedes lautet: $T \cdot \dot{x}_a + x_a = K \cdot x_e$

T heißt Zeitkonstante, K heißt Übertragungsfaktor des PT_1-Gliedes.

Tabelle 9

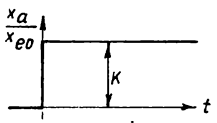
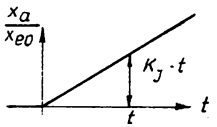
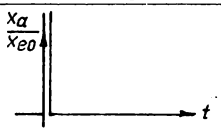
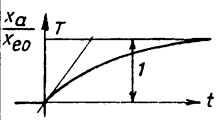
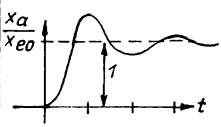
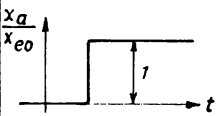
Stetige linearer Grundglieder			
Bezeichnung	Übergangsfunktion $x_e = \sqrt{x_{eo}}$	Differentialgleichung	Begriffe Kennwerte
P_0		$x_a = K \cdot x_e$	K Übertragungsfaktor
J_0		$x_a = K_J \int x_e \cdot dt$	K_J Integraler Übertragungsfaktor
D_0		$x_a = K_D \cdot \dot{x}_e$	K_D Differentialer Übertragungsfaktor
T_1		$T \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$	T Zeitkonstante
T_{2S}		$T_2^2 \cdot \ddot{x}_a + T_1 \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$ Schwingend für $D = \frac{T_1}{2T_2} < 1$	D Dämpfungszahl
T_t		$x_a = x_e \ (t - T_t)$	T_t Totzeit

Tabelle 10

Glieder	Beispiele
P_0	Spannungsteiler, Hebel, elektronische Verstärker, P-Strecken ohne Verzögerung, P-Regler ohne Verzögerung, Näherung für wenig verzögerte P-Glieder
I_0	Motor mit vernachlässigbarer Verzögerung, hydraulischer Stellantrieb, Integratoren von Analogrechnern, I-Strecken ohne Verzögerung, I-Regler ohne Verzögerung, Näherung für wenig verzögerte I-Glieder
D_0	Tachodynamo, D-Anteile von Reglern, ideale D-Glieder gibt es nicht, stets machen sich Verzögerungen bemerkbar, Näherung für wenig verzögerte D-Glieder
I_1	RC-Glieder, Drossel-Speicher-Systeme
I_2	Masse-Feder-System, RLC-Schwingkreis, Näherung für Verzögerung höherer Ordnung
T_t	Transportvorgänge, Fördereinrichtungen, Mischvorgänge in Flüssigkeitsrohrnetzen, Näherung für große Verzögerung

Die Sprungantwort (Bild 19) ist die graphische Darstellung der Lösung der Differentialgleichung für $x_e = x_{eo}$ = konst. also die Lösung von $T \cdot \dot{x}_a + x_a = K \cdot x_{eo}$.

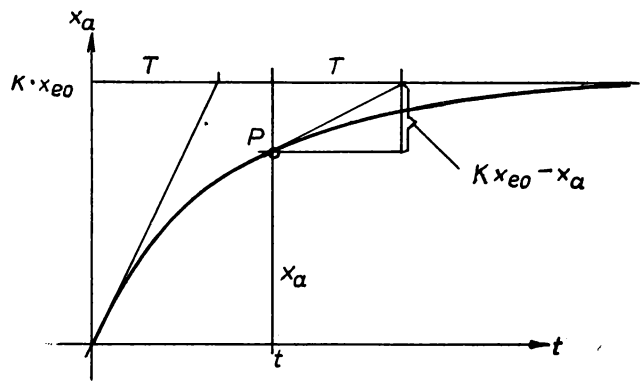


Bild 19

Mit der Anfangsbedingung $x_a(o) = o$ erhält man nach bekannten Verfahren die Lösung als:

$x_a(t) = K\, x_{eo} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$. Auch ohne Lösen der Differentialgleichung läßt sich schon folgendes aussagen:

$x_a(\infty) = K\, x_{eo}$, denn nach "langer Zeit", im stationären Zustand sind die Änderungen, also $\dot{x}_a$ zu null geworden.

$x_a(o) = \frac{K\, x_{eo}}{T}$, denn zur Zeit t = o ist x_a = o (Anfangsbedingung).

Die Summe aus Größe (x_a) und deren mit T multiplizierten Geschwindigkeit ($T\, \dot{x}_a$) muß konstant sein ($K\, x_{eo}$). Durch die Geschwindigkeit wächst die Größe, damit wird aber die Geschwindigkeit (Steigung) geringer usw. So kommt man "gefühlsmäßig" zum Verlauf der Funktion

$$x_a(t) = K\, x_{eo} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) .$$

Zeichnet man in einem beliebigen Punkt der Kurve die Tangente (Bild 19), so ist die Zeitentfernung zwischen diesem Punkte und dem Schnittpunkt der Tangente mit der Geraden $x_a = K\, x_{eo}$ = Endwert immer gleich der Zeitkonstanten. Das folgt aus einer einfachen Umstellung der Differentialgleichung $\frac{K\, x_{eo} - x_a}{T} = \frac{dx_a}{dt}$. Die Zeitkonstante ist also die Zeit, die von einer beliebigen Stelle des Überganges an noch gebraucht würde, um den Endwert zu erreichen, wenn die gerade herrschende Geschwindigkeit bestehen bliebe.

Daraus kann man leicht eine graphische Konstruktion des PT_1-Überganges ableiten. Aus Bild 20 ist diese Konstruktion zu erkennen. Die Funktion ist aus Tangentenstücken zusammengesetzt.

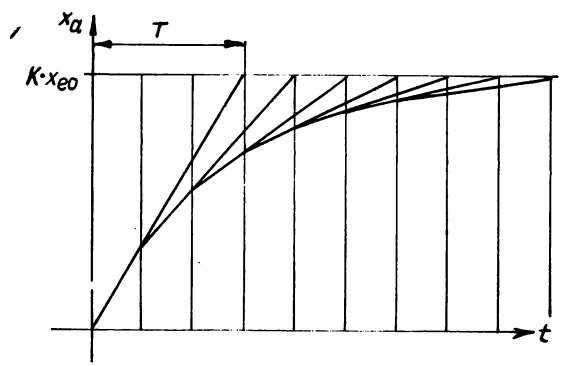


Bild 20

Aus der Lösung der Differentialgleichung kann man noch folgendes entnehmen:

Nach t = T hat x_a den Wert $x_a = K\, x_{eo} \,(\, 1 - e^{-1}\,) = 0{,}63\, K\, x_{eo}$

= 63 % des Endwertes erreicht.

Nach t = T : x_a = 63 % des Endwertes,
nach t = 2T : x_a = 86 % des Endwertes,
nach t = 3T : x_a = 95 % des Endwertes,
nach t = 4T : x_a = 98 % des Endwertes.

Nach Ablauf der 3fachen Zeitkonstante ist also der Übergang praktisch so gut wie abgeschlossen.

Bemerkungen zum PT_2-Glied:

Als PT_2-Glied wird ein P-Glied mit dem Übertragungsfaktor K und mit Verzögerung 2. Ordnung bezeichnet (Masse-Feder-System mit Dämpfung, RLC-Schwingkreise, usw.). Um anzudeuten, daß der Koeffizient der zweiten Ableitung die Dimension $(\text{Zeit})^2$ haben muß, ist er als T_2^2 geschrieben. Die Sprungantwort erhält man experimentell oder als graphische Darstellung der Lösung der Differentialgleichung für $x_e = x_{eo} = \text{konst.}$

$T_2^2 \ddot{x}_a + T_1 \dot{x}_a + x_a = K x_{eo}$ Zur Lösung macht man die Substitution $x_a - K \cdot x_{eo} = z$ und erhält die homogene Differentialgleichung $T_2^2 \ddot{z} + T_1 \dot{z} + z = o$, deren charakteristische Gleichung $T_2^2 \lambda^2 + T_1 \lambda + 1 = o$ folgende Wurzeln hat

$$\lambda_{1/2} = - \frac{T_1}{2T_2^2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4T_2^4} - \frac{1}{T_2^2}}$$

$$\lambda_{1/2} = - \frac{T_1}{2\,T_2^2} \pm \frac{1}{2\,T_2^2} \sqrt{T_1^2 - 4\,T_2^2}$$

Es sind nun die Lösungsfälle

$T_1^2 - 4\,T_2^2 > o$, d.h. $\lambda_1 \neq \lambda_2$, beide reell

$T_1^2 - 4\,T_2^2 = o$, d.h. $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, reell

$T_1^2 - 4\,T_2^2 < o$, d.h. $\lambda_1 = -\delta + \omega j$

$\lambda_2 = -\delta - \omega j$, Wurzeln einander konjugiert komplex

zu unterscheiden.

Im Falle $\lambda_1 = \lambda_2$, beide Wurzeln reell, ist die allgemeine

Lösung

$$z = C_1 e^{\lambda 1 \cdot t} + C_2 e^{\lambda 2\, t}$$

Im Falle $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, reelle Doppelwurzel, ist die allgemeine Lösung:

$$z = (C_1 t + C_2) e^{\lambda t}$$

Im Falle $\lambda_1 = - \delta + \omega j$

$\lambda_2 = - \delta - \omega j$ ist die allgemeine Lösung:

$$z = C_1 e^{- \delta t} \sin (\omega t + C_2) \quad .$$

Es können also als Übergangsfunktionen des PT_2-Gliedes neben den aperiodischen Übergängen gedämpfte Schwingungen oder Dauerschwingungen konstanter Amplitude ($\delta = o$) auftreten.
($- \delta = - \frac{T_1}{2\, T_2^2}$ ist nie positiv, also kann es entdämpfte aufklingende Schwingungen nicht geben.) Man unterscheidet T_{2N}-Glieder (Nicht schwingende Verzögerungsglieder 2. Ordnung) und T_{2S}-Glieder (Schwingende Verzögerungsglieder 2. Ordnung).
Von z läßt sich leicht auf x_a schließen: $x_a = z + K\, x_{eo}$.
Die Integrationskonstanten C_1 und C_2 müssen dann noch aus den Anfangsbedingungen bestimmt werden. Eine technisch sehr häufig vorkommende Anfangsbedingung ist die Bedingung: Das System sei zur Zeit null energielos, d.h., es enthalte keine potentielle Energie $x_a(o) = o$ und auch keine kinetische Energie $\dot{x}_a(o) = o$.
δ ist die Abklingkonstante, ω die Eigenkreisfrequenz des PT_2-Gliedes.
Die erste Überschwingweite (Bild 21) findet man als

$x_1 = K\, x_{eo}\, e^{- \frac{\pi \cdot \delta}{\omega}}$, wenn $K \cdot x_{eo}$ der sich einstellende Endwert ist.

Weiter ist das Amplitudenverhältnis $\frac{x_2}{x_1}$, allgemein $\frac{x_{n+1}}{x_n}$

(alle diese Verhältnisse sind einander gleich) für die Beurteilung des Einschwingverhaltens wesentlich.

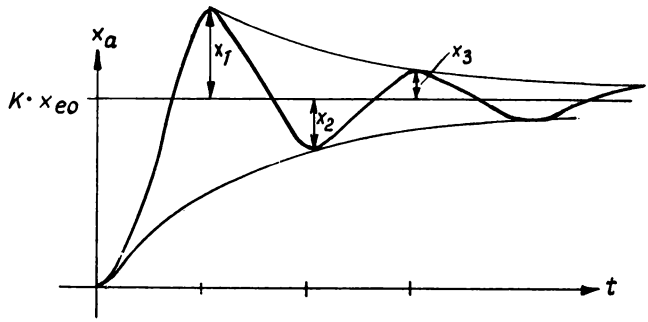


Bild 21

Es ist

$$\frac{x_{n+1}}{x_n} = e^{-\frac{\pi \cdot \delta}{\omega}}$$

Als Dämpfungszahl D bezeichnet man das Verhältnis $D = \frac{\delta}{\omega_o}$, wobei ω_o die Kreisfrequenz jener harmonischen Schwingung ist, die sich ohne Dämpfung einstellen würde (bei $T_1 = o$), also

$$\omega_o = \frac{1}{T_2} \quad .$$

$D = \frac{T_1}{2\,T_2}$ Diese dimensionslose Dämpfungszahl D (auch Dämpfungsgrad genannt) gilt für alle Lösungen der Differentialgleichung

$$T_2^2 \ddot{z} + T_1 \dot{z} + z = o$$

D = o : Dauerschwingungen konstanter Amplitude
D < 1 : Gedämpfte Schwingungen
D ≧ 1 : Aperiodisches Einschwingen

Es besteht noch die Beziehung, die man aus dem Vorhergehenden ableiten kann.

$$D = \frac{\ln \frac{x_n}{x_{n+1}}}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln \frac{x_n}{x_{n+1}}\right)^2}},$$

1.3. Zusammenschaltung von Gliedern

In der Steuerkette bzw. in Teilen des Regelkreises liegen Glieder hintereinander oder parallel, der gesamte Regelkreis hat eine Gegeneinanderschaltung von Strecke und Regeleinrichtung. Diese drei Schaltungsarten lassen sich durch das Zusammensetzen der Differentialgleichungen der Einzelglieder beschreiben. Man erhält Systeme von Differentialgleichungen. Das gilt allerdings nur, wenn die einzelnen Glieder rückwirkungsfrei sind. Bei einem rückwirkungsfreien Glied beeinflußt die Eingangsgröße die Ausgangsgröße, während die umgekehrte Beeinflussung vernachlässigbar ist.

Beispiel (Bild 22): Die Temperatur ϑ beeinflußt die Spannung des Thermoelementes und diese Spannung u den Ausschlag α eines Spannungsmessers. Die Spannung u hat natürlich keinen Einfluß auf die Temperatur ϑ, wie auch der Ausschlag α rückwirkend keinen Einfluß auf die Spannung u hat. Die Rückwirkungsfreiheit der Glieder ist praktisch meist vorhanden.

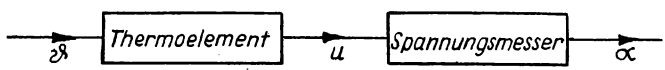


Bild 22

Hintereinanderschaltung von Gliedern (Bild 23)

Problemstellung: Wie erhält man bei der Hintereinanderschaltung von Gliedern aus den Gleichungen der einzelnen Glieder die beschreibende Gleichung der Gesamtschaltung?

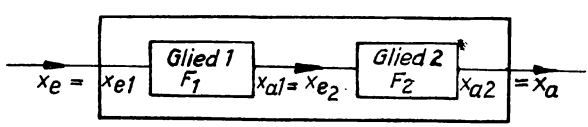


Bild 23

Lösung: $x_e = x_{e1}$, $x_{a1} = x_{e2}$, ... , x_a letztes Glied $= x_a$
verkoppelt die einzelnen Gleichungen zu einem Gleichungssystem, aus dem man durch Eliminieren der Zwischengrößen eine Beziehung zwischen x_e und x_a findet.

Parallelschaltung von Gliedern (Bild 24)

Problemstellung: Wie erhält man bei der Parallelschaltung von Gliedern aus den Gleichungen der einzelnen Glieder die beschreibende Gleichung der Gesamtschaltung?

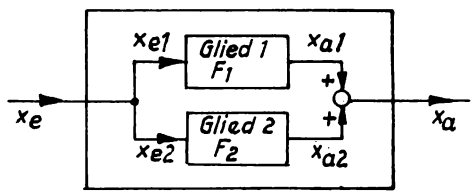


Bild 24

Lösung: $x_e = x_{e1} = x_{e2} = \dots = x_e$ letztes Glied

$x_a = x_{a1} + x_{a2} + \dots + x_a$ letztes Glied

verkoppelt die einzelnen Gleichungen zu einem Gleichungssystem, aus dem man durch Eliminieren der Zwischengrößen eine Beziehung zwischen x_e und x_a findet.

Gegeneinanderschaltung von Gliedern (Bild 25), Rückführschaltung

Problemstellung: Wie erhält man bei der Gegeneinanderschaltung zweier Glieder aus den Gleichungen des Vorwärtsgliedes und des Rückführgliedes die beschreibende Gleichung der Gesamtschaltung?

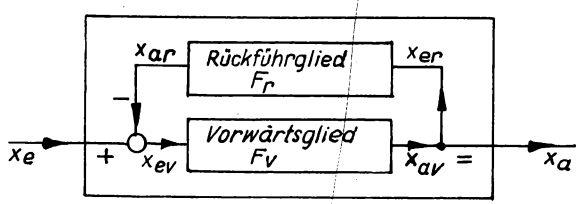


Bild 25

Lösung: $x_{ev} = x_e - x_{ar}$, $x_{av} = x_{er} = x_a$ verkoppelt die einzelnen Gleichungen zu einem Gleichungssystem, aus dem man durch Eliminieren der Zwischengrößen eine Beziehung zwischen x_e und x_a findet.

Bei der Beschreibung von Gliedern mittels Differentialgleichungen läßt sich für die drei Schaltungsarten nicht allgemein angeben, welcher Zusammenhang zwischen x_e und x_a besteht. Bei speziellen Gliedern ist das Rechnen mit Systemen von Differentialgleichungen umständlich. Wesentlich eleganter erhält man die Gesamtbeschreibung der Hintereinander-, Parallel- und Gegeneinanderschaltung von Gliedern in der Frequenzgangsprache.

Hintereinanderschaltung von Gliedern (Bild 23):

Mit mehrfacher Benutzung der Beziehung Ausgang = Frequenzgang mal Eingang ($x_a(p) = F(p)\, x_e(p)$) erhält man (die unabhängige Variable $j\omega = p$ wird der Einfachheit halber nicht mitgeschrieben):

$x_a = F_2\, x_{e2}$, $x_{a1} = F_1\, x_e$ und wegen $x_{a1} = x_{e2}$

$x_a = F_1\, F_2\, x_e$, also ist $F_{gesamt} = \dfrac{x_a}{x_e} = F_1 \cdot F_2$

Der Frequenzgang der Hintereinanderschaltung von Gliedern ist das Produkt der Einzelfrequenzgänge.

Parallelschaltung von Gliedern (Bild 24):

$$x_a = x_{a1} + x_{a2} = F_1 x_e + F_2 x_e = (F_1 + F_2) x_e$$

Also ist $$F_{gesamt} = \frac{x_a}{x_e} = F_1 + F_2$$

Der Frequenzgang der Parallelschaltung von Gliedern ist die Summe der Einzelfrequenzgänge.

Gegeneinanderschaltung von Gliedern (Bild 25):

Es ist $x_a = F_v (x_e - x_{ar})$ und $x_{ar} = F_r x_a$, also

$x_a = F_v (x_e - F_r x_a)$. Daraus folgt durch Umstellung

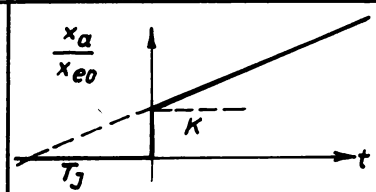
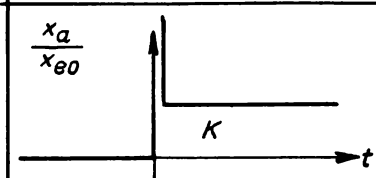
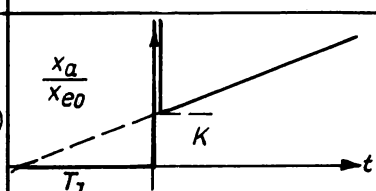
$$F_{gesamt} = \frac{x_a}{x_e} = \frac{1}{\frac{1}{F_v} + F_r}$$

Der Frequenzgang wurde auf diese Form gebracht, weil so folgendes ersichtlich ist: Ist das Vorwärtsglied ein Verstärker mit sehr großer Verstärkung ($F_v \to \infty$), so ist der Gesamtfrequenzgang gleich dem reziproken Rückführfrequenzgang.

3.3. Zusammengesetzte lineare Glieder

Das Zusammenfügen der linearen Grundglieder in Hintereinander-, Parallel- und Gegeneinanderschaltung ergibt alle übrigen linearen Glieder. PI-, PD-, PID-Verhalten kann man sich als Parallelschaltung (Addition) von P- und I-, P- und D-, P- und I- und D-Verhalten entstanden denken. Praktisch wichtig ist die Erzeugung dieses zusammengesetzten Zeitverhaltens durch Rückführungen. Davon wird noch die Rede sein. Verzögerte Glieder können als Hintereinanderschaltung der unverzögerten Glieder mit T_1-, T_2-, T_t-Gliedern angesehen werden. In Tabelle 11 sind die Gleichungen und Übergangsfunktionen unverzögerter zusammengesetzter linearer Glieder angegeben. Übertragungsfaktor K und Integralzeit T_I sind aus den Übergangsfunktionen zu entnehmen. Für das PI-Glied wird für den Sprungeingang

Tabelle 11

Glied	Gleichung	Übergangsfunktion $x_e = x_{e0}$
PJ	$x_a = K x_e + K_J \int x_e \, dt$ $x_a = K \left(x_e + \frac{1}{TJ} \int x_e \, dt \right.$ T_J = Integralzeit	
PD	$x_a = K x_e + K_D \dot{x}_e$ $x_a = K \left(x_e + T_D \dot{x}_e \right)$ T_D = Differentialzeit	
PJD	$x_a = K x_e + K_J \int x_e \, dt + K_D \dot{x}_e$ $x_a = K \left(\dot{x}_e + \frac{1}{T_J} \int x_e \, dt + T_D x_e \right)$	

$x_e = x_{eo}$ mit der Sprungstelle bei $t = o$ für $t > o$

$x_a = K \left(x_{eo} + \frac{1}{T_I} x_{eo} t \right)$.

Also ist $\frac{x_a}{x_{eo}} = K + \frac{K}{T_I} t$ eine Gerade mit den Achsenabschnitten T_I und K.

Die Integralzeit T_I eines PI-Gliedes ist die Zeit, die die Ausgangsgröße x_a nach einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße vom Wert Null auf einen festen Wert benötigt, um zusätzlich die gleiche Ausgangsänderung zu erzeugen, welche durch den P-Anteil sofort nach dem Sprung erzeugt wird. Der I-Anteil braucht also die Zeit T_I , um bei Sprungeingang soviel zu verstellen, wie der P-Anteil sofort verstellt. Kleine Integralzeit bedeutet starken I-Anteil. Die Differentialzeit T_D ist aus den Sprungübergangsfunktionen nicht zu entnehmen. Sie ergibt sich als Achsenabschnitt der Anstiegsübergangsfunktion (Bild 26).

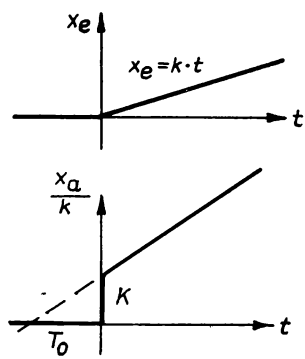


Bild 26

Für linear ansteigenden Eingang $x_e = k\,t$ wird der Ausgang des PD-Gliedes $x_a = K\,(k\,t + T_D \cdot k)$. Es ist $\frac{x_a}{k} = K\,t + K\,T_D$

eine Gerade mit den Achsenabschnitten T_D und K. Die Differentialzeit T_D eines PD-Gliedes ist die Zeit, die die Ausgangsgröße x_a bei linear verlaufender Änderung der Eingangsgröße x_e benötigt, um zusätzlich die gleiche Ausgangsänderung zu erzeugen, welche durch den D-Anteil sofort mit Beginn des linearen Anstiegs erzeugt wird. Der P-Anteil braucht also Zeit T_D, um bei linearem Anstiegseingang soviel zu verstellen, wie der D-Anteil sofort verstellt. Kleine Differentialzeit bedeutet schwachen D-Anteil.
Die Integralzeit T_I eines PI-Reglers wird Nachstellzeit T_n genannt. Die Differentialzeit T_D eines PD-Reglers wird Vorhaltzeit T_v genannt.

Verzögerungen der stetigen linearen Glieder werden in der beschreibenden Gleichung durch Ableitungen der Ausgangsgröße charakterisiert.

Beispiel: Hintereinanderschaltung eines PI-Gliedes mit einem T_1-Glied (Bild 27).

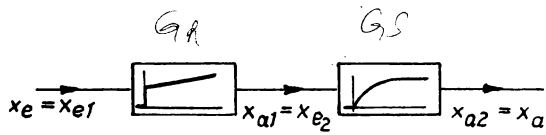


Bild 27

Gleichungen der Einzelglieder $x_{a1} = K \left(x_{e1} + \frac{1}{T_I} \int x_{e1}\, dt \right)$

$T \dot{x}_{a2} + x_{a2} = x_{e2}$. Weiter ist $x_e = x_{e1}$, $x_{a1} = x_{e2}$, $x_{a2} = x_a$.

Elimination der Zwischengrößen ergibt

$$T \dot{x}_a + x_a = K \left(x_e + \frac{1}{T_I} \int x_e dt \right)$$

Das ist ein PI-Glied mit Verzögerung 1. Ordnung (PIT-Glied).
Ganz allgemein lautet die Gleichung der wichtigen stetigen linearen Glieder $\ldots + T_2^2 \ddot{x}_a(t) + T_1 \dot{x}_a(t) + x_a(t) = K$

$$\left[x_e(t) + \frac{1}{T_I} \int x_e(t)\, dt + T_D \dot{x}_e(t) \right]$$

Die höchste Ableitung der Ausgangsgröße kennzeichnet die Ordnung der Verzögerung. Bei hinzukommender echter Totzeit steht bei der Eingangsgröße x_e als Argument $t - T_t$. Beispiel: $T\,\dot{x}_a(t) + x_a(t) = K_I \int x_e(t - T_t)\,dt$ ist ein IT_1T_t-Glied.

Wiederholungsfragen zu 3.

W3.1. Was sind die Kennwerte von P-, I-, D-Gliedern und wie sind sie erklärt?

W3.2. Was sind die Zeitkonstante und der Übertragungsfaktor eines PT_1-Gliedes?

W3.3. Was ist der Unterschied zwischen einem T_{2N}- und einem T_{2S}-Glied?

W3.4. Was ist ein Totzeitglied?

W3.5. Wie sehen die Blockschaltbilder der Hintereinanderschaltung, der Parallelschaltung und der Gegeneinanderschaltung von Gliedern aus? Wie kommt man von den Einzelgleichungen zur Gesamtgleichung?

W3.6. Nennen Sie etliche zusammengesetzte stetige lineare Glieder!

W3.7. Was ist die Integralzeit eines PI-Gliedes?

W3.8. Was ist die Differentialzeit eines PD-Gliedes?

Übungsaufgaben zu 3.

Ü3.1. Wie lautet die Gleichung eines Temperaturtransmitters, von dem bekannt sei, daß er bei 10 grd Temperaturänderung 0,2 at Druckänderung abgibt?

Ü3.2. Wie lautet die Gleichung eines I-Reglers für Druck, der so eingestellt sei, daß er bei einer Druckänderung von 0,05 at mit einer Geschwindigkeit von 2 $\frac{mm}{s}$ ein Ventil verstellt?

Ü3.3. Wie ist bei einem Tachodynamo die abgegebene Spannung vom Drehwinkel abhängig, wenn bekannt sei, daß der Tacho 20 V bei einer Drehzahl von 1000 $\frac{U}{min}$ abgibt?

Ü3.4. Ein Ausdehnungsthermometer brachte 10 mm Hub bei 50 grd Temperaturänderung. Der Endhub hatte sich verzögert nach etwa 1 min eingestellt. Wie lautet die Dgl. der Anordnung wenn näherungsweise eine Dgl. 1. Ordnung zur Beschreibung genommen werden soll?

Ü3.5. Wie groß ist die Schwingungsdauer des in der Übungsaufgabe Ü2.4. angegebenen Masse-Feder-Systems?

Ü3.6. Aus der experimentell aufgenommenen Einschwingkurve eines Masse-Feder-Systems wurde eine Eigenkreisfrequenz von 2 $\frac{1}{s}$ und ein Amplitudenverhältnis $x_1/x_2 = 4/1$ bei einer Einschwingung des Ausganges von 0 auf 10 mm gemessen. Der elektrische Eingang des Masse-Feder-Systems betrug dabei 0,5 A. Wie lautet unter Annahme linearer Verhältnisse die Differentialgleichung des Systems (x = Weg = Ausgang, i = Strom = Eingang) ?

Ü3.7. Wie lautet die Gleichung für ein Transportband von 10 m Länge, welches mit einer Geschwindigkeit von 0,5 $\frac{m}{s}$ läuft (x_e = Aufgabe in $\frac{kg}{min}$, x_a = Abgabe in $\frac{kg}{min}$) ?

Ü3.8. Einem elektronischen PD-Glied wurde eine linear ansteigende Eingangsspannung gegeben, die sich in 10 s um 5 V änderte. Der Ausgang sprang daraufhin von 0 V auf 10 V und stieg dann pro s um 2 V linear an. Wie groß waren Übertragungsfaktor und Differentialzeit des PD-Gliedes eingestellt?

Ü3.9. Bei einem pneumatischen PI-Regler ergab sich nach einer sprungförmigen Änderung des Einganges von 0,4 at auf 0,5 at eine schnelle Änderung des Ausganges von 0,9 at auf 0,7 at und eine anschließende weitere langsame Absenkung des Druckes, die nach 5 min auf einen Druck von 0,6 at führte. Wie groß waren Übertragungsfaktor und Integralzeit des Reglers eingestellt?

Ü3.10. Zeichnen Sie die Ausgänge von P-, I-, D-, PI-, PD-, PID-Gliedern, wenn deren Eingänge nach folgender Funktion verstellt werden:

$x_e = o \quad \text{für} \quad t < o$

$x_e = c \quad \text{für} \quad o \leq t \leq t_1$

$x_e = o \quad \text{für} \quad t > t_1$

Ü3.11. Zwei PT_1-Glieder ($T_1\dot{x}_a + x_a = K_1 x_e$ und $T_2\dot{x}_a + x_a = K_2 x_e$) seien hintereinandergeschaltet. Wie lautet die Gesamtgleichung der Schaltung?

Ü3.12. Ein PT_1-Glied ($T \dot{x}_a + x_a = K x_e$) und ein I-Glied ($\dot{x}_a = K_I x_e$) seien parallel geschaltet. Wie lautet die Gesamtgleichung der Schaltung?

Ü3.13. Zwei P-Glieder werden gegeneinandergeschaltet (Vorwärtsglied $x_a = K_v x_e$, Rückführglied $x_a = K_r x_e$). Wie lautet die Gesamtgleichung der Schaltung?

Ü3.14. Zwei I-Glieder werden gegeneinandergeschaltet (Vorwärtsglied $\dot{x}_a = K_{Iv} x_e$, Rückführglied $\dot{x}_a = K_{Ir} x_e$). Wie lautet die Gesamtgleichung der Schaltung?

II.15. Ein Ferrarismotor mit Getriebe habe als Verzögerungsglied 1. Ordnung eine Zeitkonstante von 0,5 s und es gehöre zu einer Steuerspannung von $u = 20$ V eine Drehzahl von $n = 10 \frac{U}{min}$. Der Motor verstelle über eine Spindel mit der Steigung 4 mm ein Ventil, welches bei 5 mm Hubänderung eine Durchflußänderung von 3 $\frac{kg}{s}$ gibt.
Gesucht unter Annahme linearer Verhältnisse:
a) Blockschaltbild der Anordnung,
b) Abhängigkeit des Durchflusses G von der Steuerspannung u (Differentialgleichung),
c) Zeitverhalten der gesamten Anordnung.

4. Steuer- und Regelstrecken

Die Strecke ist innerhalb der Gesamtheit der Glieder einer Steuerung oder Regelung die zusammenfassende Benennung für denjenigen Teil des Wirkungsweges, dem die aufgabengemäß zu beeinflussenden Glieder oder der aufgabengemäß zu beeinflussende Teil einer Anlage angehören. Das Stellglied gehört zur Strecke und ist deren Eingangsglied. Es kann stetig oder unstetig arbeiten. Eingangssignale der Strecke sind Stellgrößen und solche Störgrößen, die an der Strecke angreifen. Ausgangssignal der Strecke ist die gesteuerte bzw. geregelte Größe und gegebenenfalls gewisse Hilfsgrößen. (TGL 14591) Strecken sind Übertragungsglieder und werden als solche eingeteilt und benannt. Selbstverständlich gelten die Beschreibungsmethoden: statische Kennlinie, Übergangsfunktion, Differentialgleichung auch für Strecken.

Wichtige Unterteilung: P - Strecken = Strecken mit Ausgleich
I - Strecken = Strecken ohne Ausgleich
Merkmale für weitere Unterteilung: Verzögerung 1. Ordnung, 2. Ordnung, usw., Totzeit, lineare Strecken, nichtlineare Strecken, Temperaturstrecken, Druckstrecken usw.

Von einem Beispiel ausgehend sollen nun noch einige Besonderheiten der Strecken erläutert werden.

Beispiel: Gleichstrom-Nebenschluß-Motor als Drehzahlregelstrecke (Bild 28)

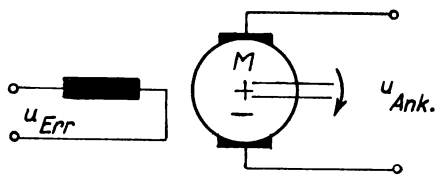


Bild 28

Regelgröße x = Drehzahl n
Stellgrößen y_1 = Ankerspannung $u_{Ank.}$
y_2 = Erregerspannung $u_{Err.}$
Störgrößen z_1 = Laständerung ΔM
z_2 = Netzspannungsschwankungen Δu , usw.

Bild 29 zeigt das zugehörige Blockschaltbild.

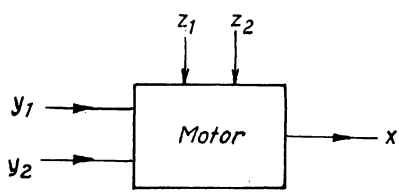


Bild 29

Zur regelungstechnischen Beschreibung müssen die Einflüsse aller einzelnen Eingangsgrößen auf die Ausgangsgröße bekannt sein. Die Einzeleinflüsse überlagern sich additiv. Bild 30 bringt das zum Ausdruck.

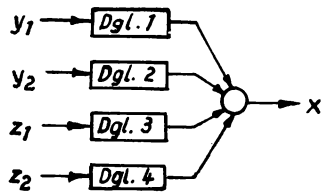


Bild 30

Die Differentialgleichung 1 gibt an, wie x von y_1 (Stellgröße) bei konstanten anderen Einflüssen abhängt. Die zugehörige Übergangsfunktion heißt Stellübergangsfunktion.
Die Differentialgleichung 3 gibt an, wie x von z_1 (Störgröße) bei konstanten anderen Einflüssen abhängt. Die zugehörige Übergangsfunktion heißt Störübergangsfunktion.

Bei der Beschreibung durch lineare Differentialgleichungen wird angenommen, daß eine Verdoppelung von z.B. y_1 eine Verdoppelung von x zur Folge hat usw. Reicht diese "im Kleinen" meist gültige lineare Näherung zur Beschreibung nicht aus, so müssen die statischen Kennlinien noch herangezogen werden (Bild 31).

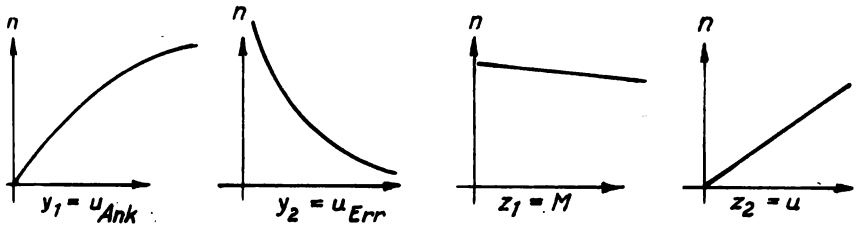


Bild 31

Auch das dynamische Verhalten ist in Wirklichkeit vom Arbeitspunkt und von den gewählten Eingängen abhängig. Die Differentialgleichungen werden dann nichtlinear. An den Kennlinien sieht man, daß z.B. die Abhängigkeit der Drehzahl von der Erregerspannung ganz typisch nichtlinear ist. Wir beschränken uns auf die Betrachtung linearer Abhängigkeiten und damit bei realen Nichtlinearitäten auf die Betrachtung von Arbeitsbereichen, wo näherungsweise lineare Verhältnisse angenommen werden können.
Wir beschränken uns noch weiter. Im allgemeinen wird man nur eine Stellgröße benutzen (Im Beispiel etwa die Ankerspannung bei Erregerspannung = konstant.). Das wollen wir annehmen. Weiter ist es wenig aussichtsreich, an Strecken die Einflüsse aller Störgrößen für sich genau erfassen zu wollen. Häufig genügt eine Pauschalerfassung, im Beispiel etwa so: Alle Störgrößen sind summiert so groß, daß ihnen mit einer Ankerspannungsänderung von $\pm$ 20 V begegnet werden kann. Mit dieser Aussage sind die Störgrößen in Einheiten der Stellgröße angegeben worden. Im Blockschaltbild finden diese Vereinfachungen folgendermaßen ihren Ausdruck (Bild 32).

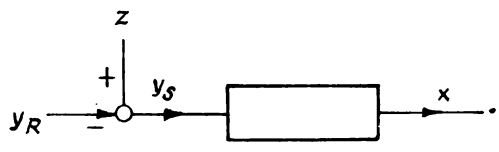


Bild 32

Auf die Strecke wirkt y_S, das ist die Störgröße z abzüglich der Gegenwirkung y_R durch den Regler.
Alle Störgrößen zusammenzufassen zu z, z in Einheiten der Stellgröße anzugeben und Stellgröße wie Störgröße über die gleiche Differentialgleichung auf die Regelgröße x wirken zu lassen, ist eine große Vereinfachung, nicht statisch (für den Endzu-

stand wird ja die Umrechnung richtig gemacht), sondern dynamisch.
Wir treffen sie aber, sind uns allerdings der Vereinfachung bewußt. Wie andererseits genau (Bild 30) zu verfahren wäre, ist deutlich. Wir erlauben uns die Vereinfachung, die nun wiederum praktischen Belangen entgegenkommt. Das möge durch noch ein Beispiel belegt werden.

Beispiel: Glühofen als Temperaturregelstrecke

Regelgröße = Temperatur, Stellgröße = Heizleistung in kW, Störgrößen = sehr vielfältig (Spannungsschwankungen, Außentemperaturänderungen, offene Klappe am Ofen, usw.)

Der Einzeleinfluß der Störgrößen läßt sich so gut wie nicht angeben. Pauschal läßt sich aber meist leicht bestimmen, daß allen Störgrößen mit einer Heizungsverstellung von z.B. $\pm$ 2 kW begegnet werden kann. Das ist die Angabe der Störgrößen in Einheiten der Stellgröße. Die Vereinfachung gipfelt also schließlich darin, daß die Strecke als regelungstechnisches Glied ein Eingangssignal y_S und ein Ausgangssignal x hat. y_S = Stellgrößenabweichung, x = Regelgrößenabweichung (Bild 33).

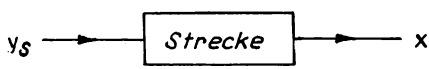
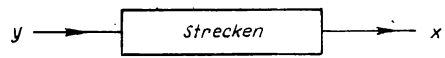
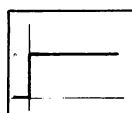
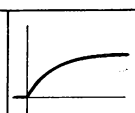
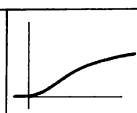
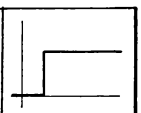
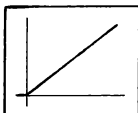
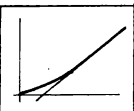
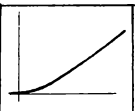
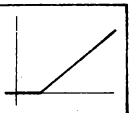


Bild 33

Es sind "klein x" und "klein y_S" wieder wie immer Abweichungen von Bezugswerten X_o und Y_o. Statt Stell- und Störübergangsfunktionen anzugeben, wird nur eine Stellübergangsfunktion benutzt.
In den vorangegangenen Abschnitten ist schon gesagt worden, was über die Abhängigkeit des Ausgangssignals eines Gliedes vom Eingangssignal gesagt werden muß. Das braucht jetzt einfach auf Strecken angewendet zu werden. Man kommt so zur folgenden Übersicht (Tabelle 12).

Tabelle 12



	P - Strecken (Strecken mit Ausgleich)				J - Strecken (Strecken ohne Ausgleich)			
	mit Verzögerung				mit Verzögerung			
	o. Ordnung	1. Ordnung	2. Ordnung	mit echter Totzeit	o. Ordnung	1. Ordnung	2. Ordnung	mit echter Totzeit
Stellübergangsfunktion								
Differentialgleichung	$x = K_S\, y$	$T_S\,\dot{x} + x = K_S\, y$	$T_2^2\,\ddot{x} + T_1\,\dot{x} + x = K_S\, y$	$x = K_S\, y(t - T_t)$	$x = K_{JS}\int y\,dt$	$T_S\,\dot{x} + x = K_{JS}\int y\,dt$	$T_2^2\,\ddot{x} + T_1\,\dot{x} + x = K_{JS}\int y\,dt$	$x = K_{JS}\int y\,(t - T_t)\,dt$
Beispiele	Strom und Spannung in rein ohmschen Netzen, Druck und Durchfluß in Flüssigkeitsrohrnetzen	Drehzahl kleiner Maschinen, Druck und Durchfluß in Gasrohrnetzen, Gasdruck in Behältern	Drehzahl großer Maschinen, Temperaturstrecken, Druck in Mehrspeichersystemen	Förderstrecken Förderbandwaage Konzentration in Beimischstrecken	Flüssigkeitsstand in Behältern Weg von trägheitsarmen elektromotorischen und hydraulischen Antrieben	Nachlaufregelstrecken Weg von trägen elektromotorischen und hydraulischen Antrieben, z.B. an Werkzeugmaschinen	Kurs von Fahrzeugen, Kursregelstrecken von Flugzeugen, Schiffen	Mengenregelung über Förderstrecken

Die Übersicht unterscheidet Strecken mit und ohne Ausgleich o., 1., 2. usw. Ordnung. Die Ordnungszahl wird von der Differentialgleichung angegeben. Jede Angabe ist wieder als Näherung anzusehen. So wird das Drehzahlverhalten kleiner Maschinen mit für viele Zwecke genügender Näherung durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung beschrieben. In den meisten Fällen ist in der Verfahrenstechnik die Regelstrecke dem Regelungstechniker vorgegeben (Ofen, Druckkessel, Rohrleitung usw.). Man muß dann die geeignete Regeleinrichtung gefunden werden. Da an dem Zusammenspiel der Regelung aber Strecke wie Regler gleichermaßen Anteil haben, ist es wünschenswert, daß die Strecke schon gute regelungstechnische Eigenschaften mitbringt. Deshalb sollte schon der Anlagenbauer dem Regelungstechniker in die Hände arbeiten. Das muß bei manchen Aufgaben geradezu so sein. So können bei der Raketenentwicklung unmöglich Rakete und Kursregel- und steuereinrichtung nebeneinander oder gar hintereinander entwickelt werden. Hier geht nur das Miteinander. Trotzdem ist es heute meistens so, daß die Strecken dem Regelungstechniker vorgegeben sind, daß die Anlagen nur nach technologischen, nicht auch nach regelungstechnischen Gesichtspunkten gebaut sind.

Man gilt nun Kennwerte zu finden, die die Strecke regelungstechnisch charakterisieren. Man stelle sich dazu mit der Aufgabe, die beschreibende Differentialgleichung zu finden, z.B. vor einen Kessel im Kraftwerk. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird man die höhere Mathematik beiseite legen, nicht etwa weil sie unbrauchbar ist, sondern weil gar zu viele Einflußfaktoren die exakte Erfassung gar zu schwer machen. Die experimentelle Untersuchung wird weiterhelfen. Aber auch sie liefert streuende Meßergebnisse, so daß es oft wenig sinnvoll ist, an der aufgenommenen Übergangsfunktion nach 1., 2., 3. usw. Ordnung unterscheiden zu wollen. In solchen Fällen genügen dem Ingenieur meist wenige "handfeste" Kennwerte. Diese Kennwerte wollen gefunden werden.

Kennwerte von Strecken:

P-Strecken:

Genaue Beschreibung durch Sprungantwort oder Differentialgleichung. Aus der Sprungantwort lassen sich durch Anlegen der Wendetangente die eingetragenen Abschnitte festlegen (Bild 34).

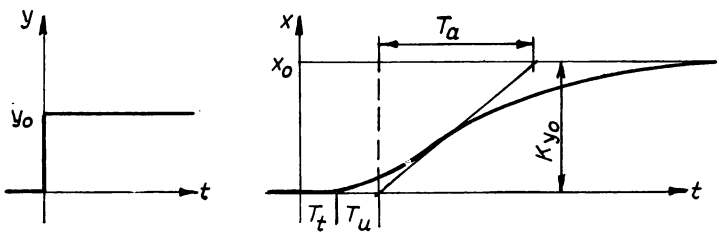


Bild 34

$K = \frac{x_o}{y_o}$: Übertragungsfaktor der Strecke

($q = \frac{1}{K}$ = Ausgleichswert)

T_t : Totzeit. Sie ist die Zeit, die nach einer sprunghaften Verstellung der Eingangsgröße vergeht, bis sich die Ausgangsgröße merklich zu ändern beginnt.

T_u : Verzugszeit

T_a : Ausgleichszeit

Soll besonders zum Ausdruck gebracht werden, daß es sich um Kennwerte von Strecken handelt, so erhalten diese den zusätzlichen Index S (z.B. K_S , T_{tS} usw.).

Totzeit (auch echte Totzeit genannt) und Verzugszeit (auch unechte Totzeit genannt) lassen sich schlecht exakt abgrenzen. Man spricht deshalb oft von Ersatztotzeit $T_t^* = T_t + T_u$.

Angenäherte Beschreibung einer P-Strecke durch die Kennwerte K_S , T^*_{tS} , T_{aS} .

I-Strecken:

Genaue Beschreibung durch Sprungantwort oder Differentialgleichung. Aus der Sprungantwort lassen sich durch Anlegen der Asymptote die eingetragenen Abschnitte festlegen (Bild 35).

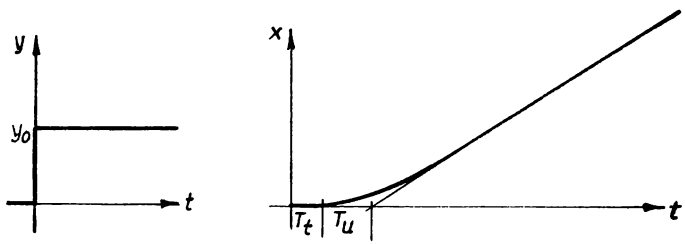


Bild 35

$K_I = \frac{dx/dt}{y_o}$: Integraler Übertragungsfaktor (bezogene Änderungsgeschwindigkeit)

T_t : Totzeit

T_u : Verzugszeit

Als Anlaufwert A bezeichnet man den Kehrwert der maximalen Änderungsgeschwindigkeit, die sich bei einer Verstellung von y_s um den gesamten Stellbereich Y_h ergibt. $A = \frac{1}{(dx/dt)_{max}}$.

Von der Stellgliedverstellung y_o läßt sich linear auf die Verstellung y_h umrechnen. $A = \frac{1}{(dx/dt)} \cdot \frac{y_o}{Y_h}$.

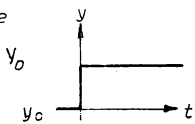
Angenäherte Beschreibung einer I-Strecke durch die Kennwerte A , T^*_{tS} oder K_{IS} , T^*_{tS} .

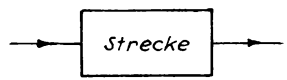
Teilt man Strecken nur nach den gefundenen Kennwerten und nicht nach ihren Differentialgleichungen ein, so ergibt sich die folgende Übersicht (Tabelle 13), die nach dem bisher Gesagten ohne Kommentar verständlich ist, ebenso wie die sich anschließenden Kennwerte üblicher Strecken (Tabelle 14).

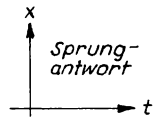
Tabelle 13

Regel- und Steuerstrecken

Eingang = sprunghafte Stellabweichung y_0 von einem Bezugswert Y_0







Ausgang = zeitliche Änderung der Regelgrößen Abweichung x von einem Bezugswert X_0

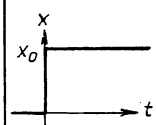
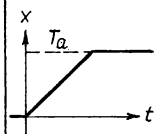
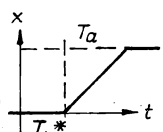
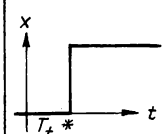
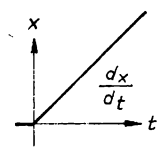
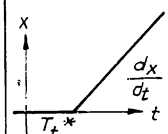
	mit Ausgleich				ohne Ausgleich	
Vereinfachte Sprungantwort						
Bezeichnung	ohne Ersatztotzeit ohne Ausgleichszeit	ohne Ersatztotzeit mit Ausgleichszeit	mit Ersatztotzeit mit Ausgleichszeit	mit Ersatztotzeit ohne Ausgleichszeit	ohne Ersatztotzeit	mit Ersatztotzeit
Kennwerte	Übertragungsfaktor $K_S = \frac{x_0}{y_0}$	K_S Ausgleichszeit T_a	K_S T_a Ersatztotzeit T_t*	K_S T_t*	Anlaufwert A $A = \frac{1}{\frac{dx}{dt}} \frac{y_0}{y_h}$ y_h = Stellbereich	T_t* A
Beispiele	ohne Verzögerung	mit Verzögerung 1. Ordnung	mit Verzögerung höherer Ordnung	Transportvorgänge	ohne Verzögerung	mit Verzögerung

Tabelle 14

Kennwerte üblicher Strecken (nach E. Samal)

Regelgröße	Art der Strecke	T_t*	T_a	A
Temperatur	Kleiner, elektr. beheizter Ofen	0,5 bis 1 min	5 bis 15 min	bis 1 s/grd
	Großer, elektr. beheizt. Glühofen	1 bis 5 min	10 bis 60 min	bis 3 s/grd
	Destillationskolonne	1 bis 7 min	40 bis 60 min	20 bis 40 s/grd
	Dampfüberhitzer	40 s bis 3 min		0,5 s/grd
	Raumheizung	1 bis 5 min	10 bis 60 min	1 min/grd
Durchfluß	Rohrleitung	0 bis 5 s	0,2 bis 10 s	-
Druck	Gasrohrleitung	0	0,1 s	-
	Trommelkessel mit Gas- oder Ölfeuerung	0	150 s	-
Niveau	Trommelkessel	0,6 bis 1 min	-	3 bis 10 s/cm
Drehzahl	Kleiner elektr. Antrieb	0	0,2 bis 10 s	-
	Großer elektr. Antrieb	0	5 bis 40 s	-
	Dampfturbine	0	-	$\frac{20\ s}{1000\ U/min}$
Elektr. Spannung	Kleine Generatoren	0	1 bis 5 s	-
	Große Generatoren	0	5 bis 10 s	-

In der Praxis hat sich herausgestellt, daß Regelungen an manchen Strecken sehr gute Ergebnisse haben, an anderen Strecken wieder eine gute Regelung schwierig ist. Das liegt an der Art der Strecke. So lassen sich z.B. Regelungen an Strecken mit großen Ersatztotzeiten (relativ zu den Ausgleichszeiten) schwierig ausführen.
Das kann man sich anschaulich deutlich machen:
Tritt am Eingang der Strecke (das ist der dynamisch ungünstigste Fall) eine Störung auf, so merkt der Regler ungefähr die Ersatztotzeit lang zunächst noch gar nichts. Dann "bekommt er mit", daß eine Regelabweichung eintritt und verstellt entsprechend das Stellglied. Sein Eingriff wird aber erst nach ungefähr nochmaligem Ablauf der Ersatztotzeit wirksam, so daß - grob gesagt - während der Zeit 2 T_t^* der Störvorgang so verläuft, als wäre keine Regelung vorhanden. Ist nun die Ausgleichszeit bei vorhandener Ersatztotzeit klein, so hat sich bis zum Wirksamwerden des kompensierenden Reglereingriffes schon eine große Änderung der Regelgröße ergeben. So wird deutlich, daß die Regelung umso schwieriger sein wird, je größer die Ersatztotzeit im Verhältnis zur Ausgleichszeit ist.

Mit dem Gütefaktor $\alpha = \frac{T_a}{T_t^*}$ kann das Streckenverhalten von Strecken mit Ausgleich charakterisiert werden.

$\frac{T_a}{T_t^*} > 10$	:	gut regelbar	mit einem einschleifigen Regelkreis.
$\frac{T_a}{T_t^*}$ um 6	:	noch einigermaßen regelbar	
$\frac{T_a}{T_t^*} < 3$	:	schwer regelbar	

Wiederholungsfragen zu 4.

W4.1. Was ist eine Regelstrecke?

W4.2. Nennen Sie etliche Ihnen bekannte Regelstrecken nebst den dazugehörigen Regelgrößen, Stellgrößen und Störgrößen!

W4.3. Welche Vereinfachungen liegen dem Blockschaltbild vom Bild 32 zugrunde?

W4.4. Nach welchen Gesichtspunkten kann man Strecken einteilen?

W4.5. Welche Kennwerte beschreiben eine P-Strecke angenähert?

W4.6. Welche Kennwerte beschreiben eine I-Strecke angenähert?

W4.7. Welche Strecken sind gut, welche schlecht regelbar?

Übungsaufgaben zu 4.

Ü4.1. Einem kleinen gefüllten Laborofen wurde eine elektrische Heizleistung von 80 W zugeführt. Es ergab sich daraufhin im Innern folgender Temperaturverlauf:

0 min - 20 °C	10 min - 30 °C	70 min - 150 °C
1 " - 20 "	20 " - 54 "	80 " - 162 "
2 " - 20 "	30 " - 75 "	90 " - 170 "
3 " - 21 "	40 " - 97 "	100 " - 182 "
4 " - 22 "	50 " - 116 "	110 " - 190 "
5 " - 23 "	60 " - 135 "	120 " - 195 "

Schließlich stellte sich eine Temperatur von 210 °C ein.

a) Wie groß sind K_S, T_t, T_u, T_a, q dieser Temperaturregelstrecke?

b) Wird die Temperaturregelung an dieser Strecke Schwierigkeiten bereiten oder nicht?

Ü4.2. Bei einem Gebläse bringe eine Drehzahlsteigerung um $50 \frac{U}{min}$ eine Steigerung des Ausgangsdruckes um 120 mm WS. Wie groß ist der Übertragungsfaktor dieser Regelstrecke um den betrachteten Arbeitspunkt?

Ü4.3. Eine Druckregelstrecke werde durch die Gleichung $2s\,\dot{x}(t) + x(t) = 1{,}5\,\frac{at}{cm} \cdot y$ mit x = Druck, y = Ventilstellung beschrieben. Zeichnen Sie den Verlauf des zugehörigen Ausganges, wenn der Eingang von 0,5 cm auf 1,0 cm verstellt wird.

Ü4.4. An einer Wasserstandsregelstrecke wurde durch Versuch bestimmt, daß bei einer Erhöhung des Wasserzuflusses um $y = 5\ m^3/h$ der Wasserstand in t = 20 s um h = 40 cm ansteigt. Der maximale Zufluß bei voller Öffnung des Einlaßventils ist $15\ m^3/h$.

a) Wie groß ist der Anlaufwert der Regelstrecke?

b) Wie groß ist die bezogene Änderungsgeschwindigkeit der Strecke?

5. Regeleinrichtungen

5.1. Einteilung

Die Einrichtung (Steuer- bzw. Regeleinrichtung) ist die zusammenfassende Benennung für alle Glieder im Wirkungsweg, die zur aufgabengemäßen Beeinflussung der Strecke über das Stellglied dienen. Charakteristisch für das Regeln sind: Messen, Vergleichen, Stellen und der geschlossene Wirkungsweg, der Regelkreis genannt wird. Als Regler wird ein der Regeleinrichtung angehörendes Gerät bezeichnet, wenn es die wesentliche Verarbeitung des Signals der Regelabweichung durchführt. Meßeinrichtung, Wandler, Vergleichsglied, Regler, Verstärker, Stellantrieb sind Teile der Regeleinrichtung. Im folgenden werden die wichtigsten Regler behandelt. Die übrigen Teile des Regelkreises sind jeweils nur mit angedeutet. Ihr Zusammenspiel wird im Kapitel "Regelkreise" beschrieben.
Nun sind Regler natürlich regelungstechnische Glieder. Für stetige lineare Regler gelten also alle für stetige lineare Glieder gültigen Begriffe und Beschreibungsmethoden. Man kann Regler verschieden einteilen. Die Einteilung nach der Art der

Regelgröße (Spannungsregler, Temperaturregler, Druckregler usw.) sagt nicht viel aus, weil ja ein und derselbe Regler mit verschiedenen Meßwandlern auch verschiedene Größen regeln kann. (Meßwandler mit einheitlichem Ausgang, 0 - 10 mA Gleichstrom, 0,2 - 1,0 at Überdruck, Einheitsregler, Baukastensysteme) Ebenso ist die Art der Hilfsenergie (elektrische Regler, pneumatische Regler, hydraulische Regler) nicht wesentlich. Wesentlich ist das Zeitverhalten des Reglers, die Art und Weise, wie er auf Störungen und Führungsbefehle reagiert. Die Einteilung der Regler nach dem Zeitverhalten deckt sich mit der Einteilung der Glieder. Von den so möglichen Reglern haben einige grundsätzliche Bedeutung. Von denen soll nachfolgend die Rede sein.

5.2. Zweipunktregler

Die größte Anzahl aller technischen Regelungen sind Zweipunktregelungen, bei denen nur zwei Werte (o und Y_h) für die Stellgröße y möglich sind. Der eine Wert wird vom Zweipunktregler dann eingestellt, wenn die Regelgröße x einen bestimmten Wert x_{ob} überschreitet, der andere Wert dann, wenn die Regelgröße x einen bestimmten, meist anderen Wert x_{un} unterschreitet (Bild 36).

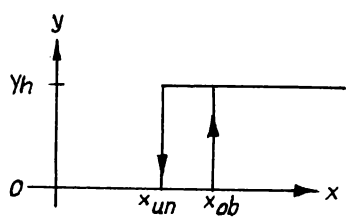


Bild 36

Oberer Schaltpunkt x_{ob} und unterer Schaltpunkt x_{un} können zusammenfallen, sind aber meist konstruktiv bedingt (unvermeidbar oder auch bewußt gewollt) um die sogenannte Schaltdifferenz

$x_d = x_{ob} - x_{un}$ verschieden (Hysterese, Reibung, Tastfolge bei Fallbügelreglern usw.). Näherungsweise kann der Sollwert als in der Mitte des Bereiches x_d liegend angenommen werden.

Es gibt auch unstetige Regler (z.B. Dreipunktregler), die mehr als zwei diskrete Werte der Stellgröße einstellen können; sie arbeiten aber zwischen je zwei dieser Werte wie ein Zweipunktregler.

Die Funktion des Zweipunktreglers beruht auf Schaltvorgängen, hierin ist seine besonders bei elektrischer Stellgröße einfache Konstruktion begründet. Als Energieschalter werden vor allem verwendet: elektrische Berührungskontakte, Stromtore, mechanische Kupplungen. Es sind so gerätemäßig einfach sehr hohe Energieverstärkungen möglich. Zum Beispiel ist eine Schaltleistung von 1kW bequem mit einer Steuerleistung von 1 W zu betätigen. Die Steuerleistung kann vom Meßwerk aufgebracht werden (Kontaktthermometer, Kontaktmanometer, Ausdehnungsstäbe, die Kontakte betätigen, Bimetallschalter, Relais usw.). Ist die Energie des Meßwerkes zu gering, um einen Schalter zu betätigen (Drehspul- und Kreuzspulmeßwerke), so kann der Schaltvorgang durch mechanische, lichtelektrische oder andere Abtastung der Zeigerstellung ausgelöst werden. So sind Leistungsverstärkungen bis in die Größenordnung 10^{14} möglich. Viel verwendet wird die Fallbügelabtastung. Fallbügelregler nehmen nur in bestimmten Zeitabständen (z.B. 15 s als Tastzyklus) die Regelgröße auf (diskontinuierliche Regler). In den Zwischenzeiten ist der Signalfluß unterbrochen.

Solche Anordnungen können verschiedene Vorteile haben:

1. Günstige dynamische Eigenschaften bei Vorhandensein von Totzeit. Der Regler wartet in den Tastpausen gewissermaßen erst einmal ab, wie sich sein Stelleingriff auswirkt, anstatt blind drauflos zu stellen.

2. In der Zwischenzeit kann der gleiche Regler über einen zyklischen Umschalter noch an anderen Strecken regeln. Voraussetzung dafür ist eine gewisse Trägheit der Strecken. Bei Temperaturstrecken z.B. ist diese Voraussetzung meist erfüllt.

1. In der Zwischenzeit können von einem übergeordneten Gerät Rechenoperationen ausgeführt werden, um den Regelvorgang zu optimieren.

Bild 37 zeigt das Blockschaltbild eines Zweipunktreglers ohne Schaltdifferenz,

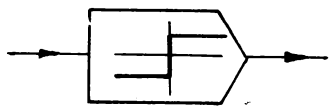


Bild 37

Bild 38 das Blockschaltbild eines getasteten Zweipunktreglers.

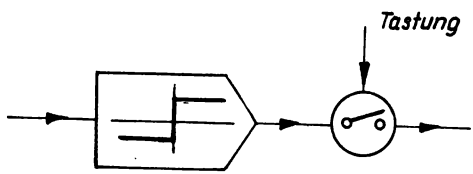


Bild 38

Der getastete Wert wird entweder nur während der Tastung übertragen oder durch ein Halteglied (mechanische Verklinkung z.B.) während der ganzen Zeit bis zur nächsten Tastung (Bild 39).

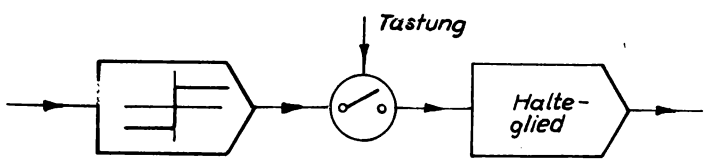


Bild 39

Schließlich kann durch einen in seiner Kontaktgabezeit einstellbaren Kontaktgeber die Zeit der Übertragung des getasteten Wertes variabel gemacht werden (Bild 40).

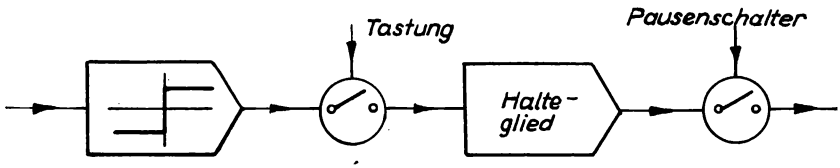


Bild 40

Beispiele von Zweipunktreglern:

Bild 41 zeigt einen Bimetall-Zweipunkt-Temperaturregler, wie er in Bügeleisen, Heizkissen, Backröhren usw. verwendet wird. Seine Funktion geht aus der Skizze hervor.

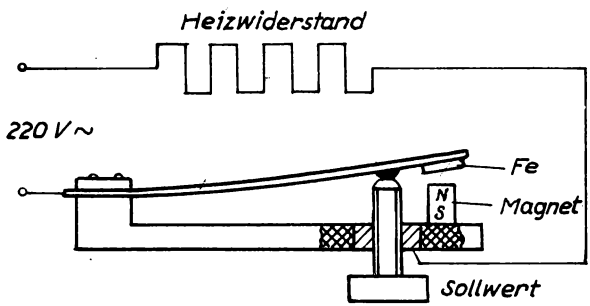


Bild 41

Um die bei der stetig erfolgenden Krümmung des Bimetallstreifens auftretende schleichende Kontaktgabe (feuernde Kontakte, kurze Lebensdauer, nur niedrige Schaltleistungen möglich) in eine Sprungschaltung umzuwandeln, kann ein Eisenplättchen und ein kleiner Dauermagnet wie skizziert angebaut werden. Dann wird der Kontakt schlagartig geschlossen wie auch schlagartig aufgerissen. Die Sprungschaltung kann auch durch mechanische Mittel, z.B. vorgespannte Federn (wie in Kippschaltern z.B.) erzielt werden. Sie bringt eine vergrößerte Schaltleistung, längere Lebensdauer der Kontakte und eine verringerte Schalthäufigkeit, bewirkt aber einen Unterschied zwischen Ein- und

Ausschaltwert der Regelgröße (Schaltdifferenz). Bei dem skizzierten Bimetallregler beträgt die Schaltdifferenz beispielsweise 1 bis 2 grd.

Bild 42 zeigt einen Zweipunkt-Spannungsregler, wie er in Kraftfahrzeugen verwendet wird. Trotz schwankender Drehzahl des Generators (Lichtmaschine) soll seine über der Batterie Ba und dem Belastungswiderstand R_a liegende Spannung annähernd konstant bleiben.

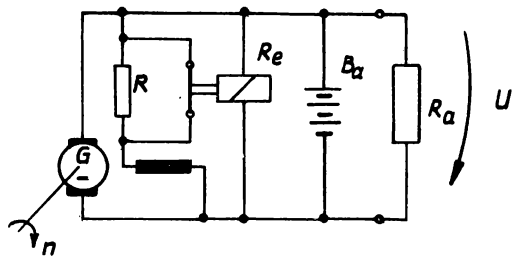


Bild 42

Zu dem Zwecke liegt ein Relais Re an der zu regelnden Spannung und schaltet einen Widerstand R vor die Erregerwicklung des Generators oder überbrückt diesen Widerstand. Bei $U < U_{soll}$ zieht das Relais nicht. Der Widerstand R ist damit durch den Ruhekontakt des Relais kurzgeschlossen, die Spannung der Maschine beginnt nach der durch die Zeitkonstante der Erregerwicklung gegebenen Übergangsfunktion zu steigen. Wird die Ansprechempfindlichkeit des Relais erreicht, so zieht das Relais, der Widerstand R wird in den Erregerkreis geschaltet und die Spannung der Maschine beginnt zu fallen. Die Ansprechspannung des Relais muß gerade U_{soll} sein. Das Ein- und Ausschalten des Widerstandes wiederholt sich mehrmals pro Sekunde.

Bild 43 zeigt einen Zweipunktdrehzahlregler wie er zur Drehzahlregelung kleinerer Elektromotoren (z.B. in elektrischen Bohreibmaschinen) verwendet wird.

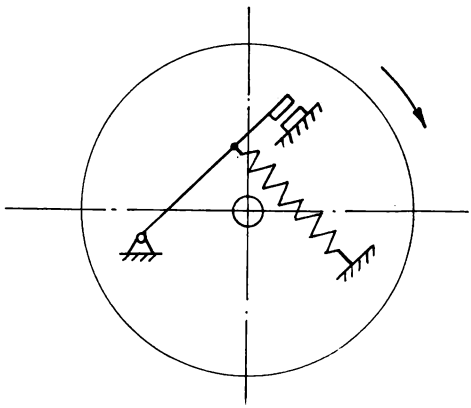


Bild 43

Mit der Welle läuft ein drehbar gelagerter Kontaktarm um. Das auf den Kontaktarm wirkende Fliehmoment ist bei der Solldrehzahl gerade gleich dem einstellbaren Moment der Federkraft. Der Kontakt schaltet über Schleifringe einen Vorwiderstand im Ankerkreis (oder im Feldkreis) des antreibenden Elektromotors. Die Schaltfrequent beträgt einige Hz. Mit einem solchen einfachen Regler können Drehzahlen auf o,1 % genau konstant gehalten werden.

Die Bilder 44 und 45 zeigen das Prinzip der viel verwendeten und in vielen konstruktiven Varianten gebauten Fallbügelregler. Der Zeiger Z eines in horizontaler Richtung ausschlagenden Meßwerkes ist in senkrechter Richtung nachgiebig und wird bei einer Auslenkung aus der dem Sollwert entsprechenden Lage o durch den mittels eines kleinen Synchronmotors periodisch auf und ab bewegten Fallbügel nach unten gedrückt. Je nach dem Vorzeichen der Auslenkung wird dabei über den Zeiger einer der beiden Schaltkontakte S_1 oder S_2 betätigt. (Bild 45) Je nach dem Betrag der Auslenkung wird der betreffende Schaltkontakt kürzer oder länger betätigt.

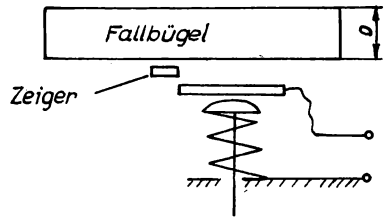


Bild 44

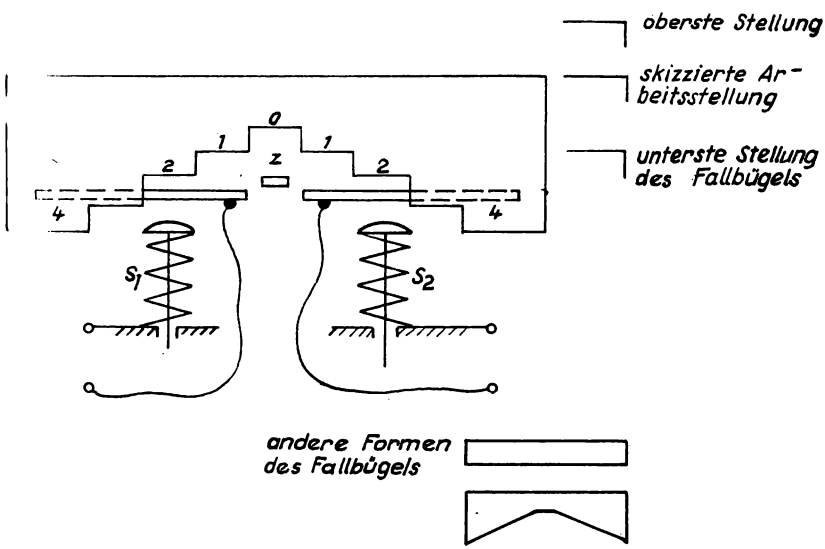


Bild 45

Beispiel:

Zeiger in Stellung	0	1	2	3	4
Kontaktbetätigung in s	0	2	4	6	8

Tastzyklus 15 s. Dann hat der Zeiger also 7 bis 13 s Zeit zum Einspielen.

Die Kontaktgabe kann durch mechanische Verklinkung bis zur nächsten Abtastung bestehen bleiben. Durch einen in Reihe liegenden einstellbaren Kontaktgeber (der z.B. 10 s lang schließt und 5 s lang öffnet) läßt sich dann eine Anpassung des Reglers an die Strecke erzielen. Es gibt vielfältige konstruktive Ausführungen. Skizziert wurde ein ausschlagsabhängiger Dreipunkt-Fallbügelregler (linker Kontakt, kein Kontakt, rechter Kontakt). Der Fallbügelregler bewirkt sehr einfach eine sehr große Leistungsverstärkung. Wird z.B. ein Meßwert mit 10 mV Vollausschlag und 100 Ohm Innenwiderstand verwendet, so ist die Meßleistung $U^2/R = 1\,\mu W$. Die oft verwendeten Quecksilberschaltröhren haben mindestens eine Schaltleistung von 6A·220 V = $1{,}32 \cdot 10^3$ W. Das bedeutet eine Leistungsverstärkung von $1{,}32 \cdot 10^9$, die nicht so leicht auf andere Weise erzeugt werden kann.

5.3. Zweilaufregler

Mit einem Dreipunktglied (rechts-null-links-Schalter) kann ein I-Glied (Motor) auf Rechtslauf, Stillstand und Linkslauf gebracht werden. Eine solche Anordnung heißt Zweilaufregler (Bild 46).

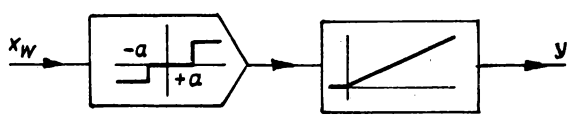


Bild 46

Eingang des Dreipunktschalters ist die Regelabweichung x_w, Ausgang des I-Gliedes die Stellabweichung y. Innerhalb des Stellbereiches ist jede beliebige Stellgröße möglich. Der Motor kann ja bei jeder Stellung des Stellgliedes auf Still-

stand geschaltet werden. Die Stellgeschwindigkeit kann nur drei diskrete Werte annehmen: Voller Rechtslauf für $x_w \geq a$, Stillstand für $-a < x_w < +a$, voller Linkslauf für $x_w \leq -a$ (a = Ansprechwert). Während also bei den Mehrpunktreglern (z.B. Zweipunktregler) nur diskrete (z.B. 2) Werte der Stellgröße möglich sind, sind beim Zweilaufregler nur drei diskrete Werte der Stellgeschwindigkeit, aber jede beliebige Stellgröße möglich. Bei einer Zweilaufregelung kommt der Regelvorgang zur Ruhe, wenn der Dreipunktschalter die Stellung null einnimmt. Das ist ein den stetigen Reglern ähnliches Verhalten. Man spricht von stetig-ähnlicher Regelung. Obwohl unstetig geschaltet wird, ist doch stetig jede Stellgröße einstellbar.

Als Dreipunktschalter werden verwendet:

1. Polarisierte Relais
2. Fallbügelregler (nicht ausschlagsabhängige und ausschlagsabhängige)

Durch Halteglieder, einstellbare Kontaktgeber und schließlich durch Rückführung sind viele Varianten des Zweilaufreglers und damit eine Anpassung an verschiedene Strecken möglich.

5.4. Stetige lineare Regler, Grundbegriffe

Bei den stetigen Reglern besteht zwischen Stellabweichung y und Regelabweichung x_w ein stetiger Zusammenhang. Dadurch ist es möglich, der Stellgröße genau den Wert zu geben, der zur Aufrechterhaltung des gewünschten Wertes der Regelgröße nötig ist. Bei den stetigen linearen Reglern ist der x_w - y - Zusammenhang besonders übersichtlich. Es gibt P-, I-, PI-, PD- und PID-Regler. Alle nichtlinearen Regler lassen sich aufbauend auf den linearen Formen verstehen. Für die stetigen linearen Regler gelten alle die für stetige lineare Glieder kennengelernten Begriffe, Beschreibungsmethoden und Kennwerte. Soll besonders zum Ausdruck gebracht werden, daß es sich um Kennwerte von Reglereinrichtungen handelt, so erhalten diese den zusätzlichen Index R (z.B. K_R , K_{IR} , T_R usw.). Einige weitere Begriffe sollen hier angeführt werden.

Kennlinie und Proportionalbereich des P-Reglers

Bild 47 zeigt die Regelung eines Flüssigkeitsstandes mit einem P-Regler.

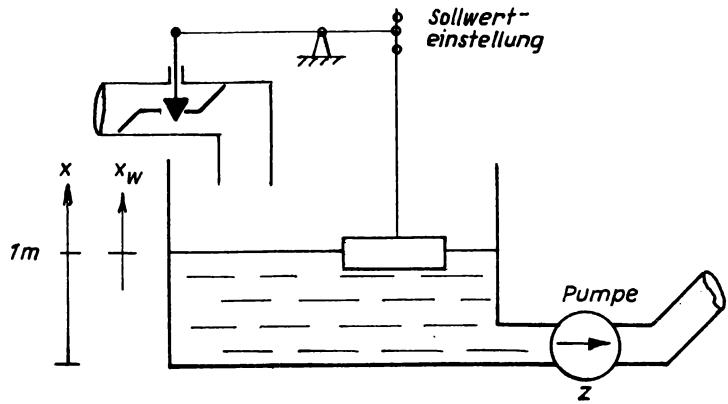


Bild 47

Störgröße ist die unterschiedliche Entnahme, Regelgröße ist der Flüssigkeitsstand, Stellgröße der Zulauf. Es ist $y = K_R \cdot x_w$, mit angenommenen Zahlenwerten $y = \frac{0{,}5\ 1/s}{cm}\ x_w$. Die Sollwerteinstellung geschieht durch entsprechendes Anlenken des Hebels am Schwimmer. Es wird für die Normalentnahme (von angenommen 5 l/s) bei Sollstand der Flüssigkeit die Grundstellung des Ventils so eingestellt, daß gerade Zufluß = Normalentnahme ist. Von dieser Bezugsstellung aus arbeitet dann der Regler.

x_w = o bedeutet: Regelgröße = Sollwert x_s = 100 cm
y = o bedeutet: Stellgröße = Bezugsstellgröße Y_o = 5 l/s

Die Bezugsstellgröße Y_o hält für z = o (Normalentnahme durch die Pumpe) den Sollwert der Regelgröße.
Nun gilt die Reglergleichung $y = K_R \cdot x_w$ nicht für alle x_w.
Im skizzierten Beispiel wird, falls der maximale Zufluß Y_h = 10 l/s beträgt, die Proportionalität zwischen y und x_w wegen

$y = \frac{0{,}5\ l/s}{cm}\ x_w$ nur für einen x_w-Bereich von 20 cm gelten. Außerhalb dieses Bereiches steht das Ventil gegen seinen oberen bzw. unteren Anschlag. Dieser Sachverhalt gilt allgemein. Jeder P-Regler kommt mit dem Stellglied einmal gegen Anschläge. Dann gilt die Proportionalität zwischen y und x_w nicht mehr (Nichtlinearität!). Der Bereicn der Regelgröße, innerhalb dessen die Proportionalität gilt, heißt sinnvollerweise Proportionalbereich X_p. Der P-Bereich ist also der Bereich, um den sich die Regelgröße ändern muß, um bei einem P-Regler die Stellgröße über den gesamten Stellbereich zu ändern. Bild 48 verdeutlicht diesen Zusammenhang in der sogenannten Kennlinie des P-Reglers.

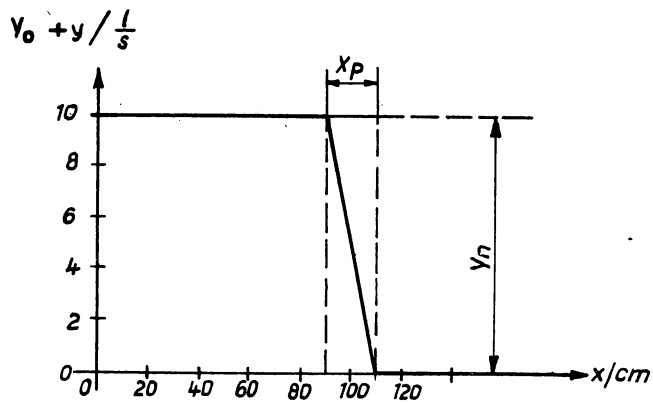


Bild 48

Der Sollwert liegt im skizzierten Beispiel in der Mitte des P-Bereiches. Das muß nicht so sein. Es wird aber in vielen Fällen sinnvoll sein, weil so der P-Regler sowohl Störungen nach der einen Seite (Entnahme niedriger als normal), als auch Störungen nach der anderen Seite (Entnahme größer als normal) gleichermaßen proportional begegnen kann. Bei der Veränderung des Übertragungsfaktors des P-Reglers (im Beispiel Verschiebung des Hebeldrehpunktes) ändert sich auch der P-Bereich (Bild 49).

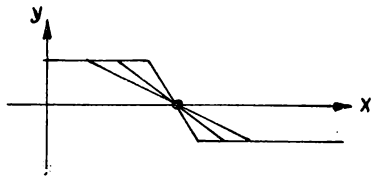


Bild 49

Man wählt die Lage des Sollwertes innerhalb des P-Bereiches in den meisten Fällen als den Punkt, der bei einer Veränderung des P-Bereiches fest bleibt. Dieser Punkt muß nicht die Mitte des P-Bereiches sein. Auch Sollwertlagen nach Bild 50 sind denkbar.

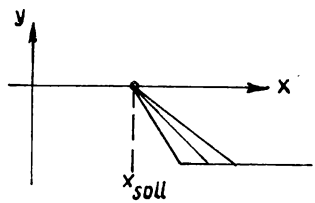


Bild 50

Das Zeichnen der Kennlinie des P-Reglers wird statt mit x und Y_o+y als Koordinaten besser mit x_w und y als Koordinaten erfolgen (Bild 51). y = - 3 l/s bedeutet dann z.B., daß der Zufluß 3 l/s niedriger als der Bezugszufluß von 5 l/s ist. x_w = + 5 cm bedeutet entsprechend, daß die Regelgröße 5 cm größer als der Sollwert von 100 cm ist. Die Kennlinie bringt zum Ausdruck, daß bei größer als normal werdendem Stand (etwa durch verringerte Entnahme bewirkt) der Zufluß gedrosselt wird. Wegen $K_R = \frac{y}{x_w}$ kann man aus der Kennlinie leicht den Zusammenhang zwischen Übertragungsfaktor K_R und P-Bereich X_P finden: $K_R = \frac{Y_h}{X_P}$

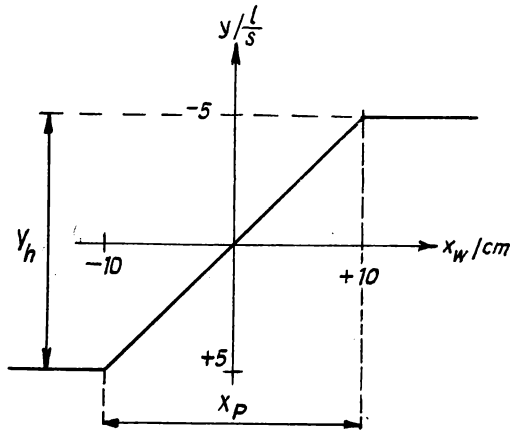


Bild 51

Dem größeren P-Bereich entspricht der kleinere Übertragungsfaktor. Der P-Bereich wird im allgemeinen in Einheiten der Regelgröße angegeben. Er kann aber auch in Prozent des Skalenumfanges (wenn der Regler eine Anzeigeskala hat) angegeben werden. Wenn im skizzierten Beispiel eine Standanzeige von 0 bis 150 cm vorhanden wäre, würde der eingestellte P-Bereich $\frac{20\ cm}{150\ cm}$ = 13,3 % betragen. Der kleinste P-Bereich, der mit industriellen P-Reglern betriebssicher erzielbar ist, liegt bei 1 %, gelegentlich werden auch Einstellbereiche über 100 % hinaus vorgesehen. Für sehr kleine P-Bereiche nähert sich das Verhalten des P-Reglers dem eines Zweipunktreglers (Kennlinie wird steiler und steiler!).

Nachstellzeit, Laufbereich des I-Reglers

Bild 52 zeigt einen I-Regler. Die als Weg erscheinende Regelabweichung x_w verstellt einen Steuerkolben. Dieser steuert

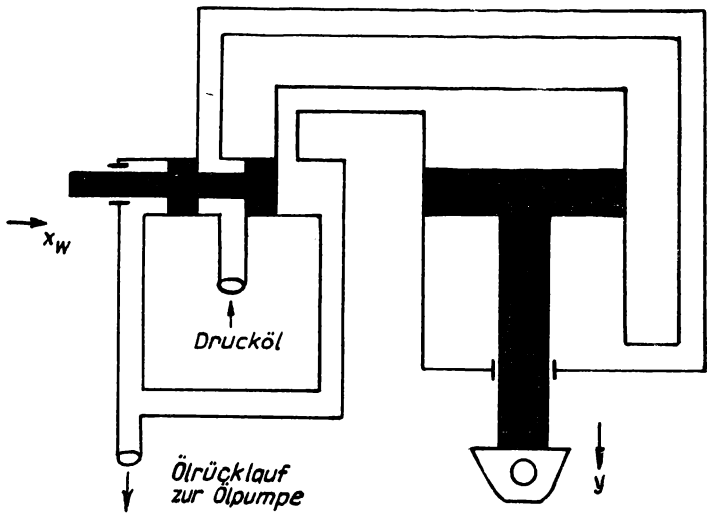


Bild 52

einen Druckölstrom, der die Stellkolbenbewegung y zur Folge hat. In der Gleichung des I-Reglers $\dot{y} = K_I \cdot x_w$ ist K_I die bezogene Stellgeschwindigkeit. Bewegt sich z.B. der Stellkolben mit einer Geschwindigkeit von 0,2 cm/s bei einer Regelabweichung von 0,1 cm, so ist $K_I = \frac{0{,}2 \text{ cm/s}}{0{,}1 \text{ cm}} = 2 \frac{\text{cm/s}}{\text{cm}}$.

Dabei wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen $\dot{y}$ und x_w angenommen. Die gilt aber sicher nur innerhalb eines Bereiches (Bild 53). Für $x_w = o$ steht der Stellkolben ($\dot{y} = o$), für $x_w > o$ bewegt sich der Stellkolben in der einen Richtung ($\dot{y} > o$), für $x_w < o$ bewegt sich der Stellkolben in der anderen Richtung ($\dot{y} < o$).

Neue Begriffe:
Der Laufbereich X_h des I-Reglers ist derjenige Bereich, um den sich die Regelgröße ändern muß, um die Stellgeschwindigkeit vom Wert Null auf ihren maximalen Wert zu bringen.

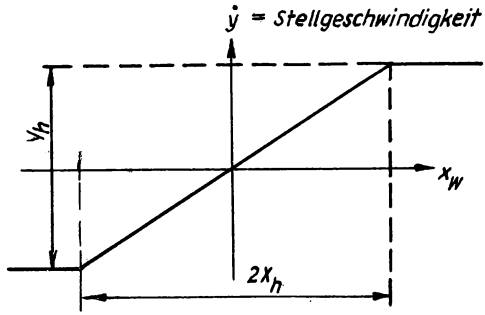


Bild 53

Die Stellzeit T_y ist die Zeit, in der die Stellgröße den Stellbereich bei größtmöglicher Stellgeschwindigkeit durchläuft. Im skizzierten Beispiel (Bild 52) steht der Steuerkolben so, daß der Stellkolben die maximale Geschwindigkeit nach oben hat. Wir wollen annehmen, der Steuerkolben müsse 1 cm nach rechts geschoben werden, um die maximale Stellkolbengeschwindigkeit nach unten zu erreichen und außerdem mögen die beiden maximalen Stellgeschwindigkeiten ihren Betrage nach gleich sein. Weiter sei der maximale Stellkolbenweg 30 cm. Dann ist

$X_h = 0{,}5$ cm, $\dot{y}_{max} = K_I \cdot x_{w\,max} = 2 \frac{cm/s}{cm} \cdot 0{,}5$ cm $= 1$ cm/s,

$T_y = \frac{30 \text{ cm}}{1 \text{ cm/s}} = 30$ s .

Allgemein bestehen zwischen K_I , $\dot{y}_{max}$, X_h , Y_h und T_y die Beziehungen: $\dot{y}_{max} = K_I \cdot X_h = \frac{Y_h}{T_y}$

Damit läßt sich die Gleichung des I-Reglers $\dot{y} = K_I \cdot x_w$ auch schreiben als $\dot{y} = \frac{Y_h}{T_y \cdot X_h} x_w$

Beim I-Regler die Abhängigkeit der Stellgröße von der Regelgröße darzustellen, ist wenig sinnvoll. Zu jeder Regelabweichung, die ungleich Null ist, gehört ja eine Endlage der Stellgröße, zur Regelabweichung Null kann jede mögliche Stellgröße gehören (Bild 54).

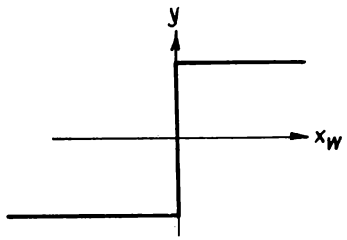


Bild 54

Wenn die Gleichung des I-Reglers als $y = K_I \int x_w \cdot dt$ angegeben wird, so ist das Zeitintegral immer mit den Grenzen t_o (Anfang der Betrachtung) bis t gemeint. t_o, der Anfang der Betrachtung, wird meist gleich Null gesetzt.

Für $x_w = c$ wird $y = K_I \int_{t_o}^{t} x_w \, dt = K_I \cdot c \cdot t - K_I \cdot c \cdot t_o$

$K_I \cdot c \cdot t$ ist die beim Sprungeingang der Höhe c in der Zeit t erfolgte Stellgliedverstellung. $K_I \cdot c \cdot t_o$ ist die vor dem Sprungeingang vorhandene Stellung des Stellgliedes. Ein I-Regler läßt, wenn x_w zu Null wird, das Stellglied dort stehen, wo es gerade steht.

5.5. Beispiele stetiger linearer Regler ohne Rückführung

Wie kann man die verschiedenen linearen Regler gerätemäßig verwirklichen? Die naheliegende Antwort lautet:
Aus Bauelementen mit P-Verhalten kann man P-Regler bauen.
Aus Bauelementen mit I-Verhalten kann man I-Regler bauen.
Aus Bauelementen mit D-Verhalten kann man den D-Anteil in Reglern verwirklichen. Parallelschaltung dieser Bauelemente ermöglicht PI-, PD-, PID-Regler zu bauen. Immer muß ein Vergleich zweier Größen (Soll- und Istwert) stattfinden. Meist ist die

Meßenergie zu klein, um die Stellenergie aufzubringen. Also muß meist eine Energieverstärkung stattfinden, d.h. die geringe Meßenergie steuert die Hilfsenergie (elektrisch, pneumatisch, hydraulisch). Die gesteuerte Hilfsenergie wirkt als Stellenergie. Also ist ein Regler meist ein Verstärker mit der Möglichkeit der Signalmischung (Soll- Istwertvergleich und evtl. Aufschaltung weiterer Größen) am Eingang.

5.5.1. P-Regler

5.5.1.1. P-Regler ohne Hilfsenergie

Regler ohne Hilfsenergie sind meist P-Regler. Die Energie des Meßfühlers wird benutzt, um die gemessene Größe rückkoppelnd korrigierend zu beeinflussen. Da die Meßenergie (wenigstens angenähert) proportional der Regelgröße ist, haben die auf diesem Prinzip beruhenden Regler P-Verhalten.

Bild 55 zeigt einen Temperaturregler.

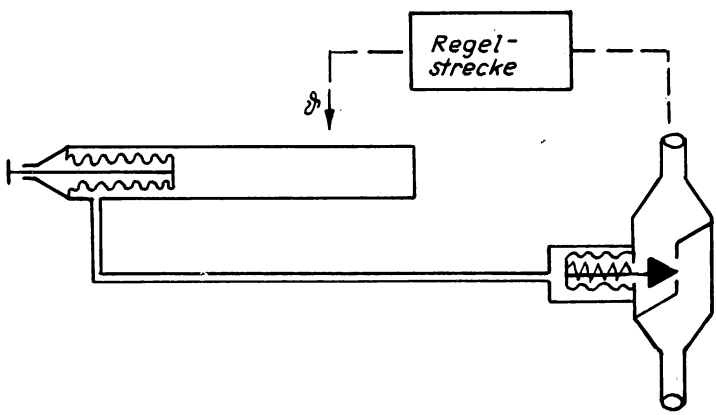


Bild 55

Der Druck einer sich ausdehnenden Meßflüssigkeit wird zur Verstellung eines Ventils (Gasventil, Warmwasserventil, Dampfventil usw.) benutzt. Die Ventilverstellung wirkt auf die Temperatur, die - und damit schließt sich der Regelkreis - auf den Meßdruck zurückwirkt. Mittels einer Schraube am Meßfühler kann eine Grundstellung des Ventils und damit der Sollwert der Temperatur eingestellt werden.

An Warmwasserkesseln wird häufig ein ähnlicher Regler verwendet. Der von einer sich ausdehnenden Flüssigkeit hervorgerufene Weg bewirkt die Verstellung der Heizungsluftklappe."Zu hohe Wassertemperatur - Weg wird größer - Ofenklappe wird mehr geschlossen - weniger Kohle verbrennt - Wassertemperatur sinkt" ist dabei der Wirkungsablauf. Durch eine Grundstellung der Ofenklappe durch Einhängen in die vom Meßfühler kommende Kette wird der Sollwert eingestellt.
Schließlich beruhen die Kühlwassertemperaturregler in Kraftfahrzeugen auf dem gleichen Prinzip. Wirkungsablauf: Kühlwasser zu heiß - Meßsubstanz dehnt sich aus - Ventil öffnet - Wasserumlauf zum Kühler wird freigegeben - Kühlwassertemperatur sinkt.
Da bei der Wärmedehnung von Flüssigkeiten und festen Körpern große Kräfte entstehen, ist es nicht verwunderlich, daß nach diesem Prinzip viele Temperaturregler gebaut werden.
Man braucht nur nach Meßfühlern mit großen Meßkräften zu suchen, um weitere P-Regler ohne Hilfsenergie zu finden.

Folgendes sei stichwortartig noch angeführt:

Standregelung: Schwimmer mit genügend großem Auftrieb verstellt Zulauf zu dem Behälter.

Druckregelung: Reduzierstation (Bild 56). Der Vordruck verstellt über eine Membrane entgegen der Federkraft (Sollwert) das Reduzierventil.

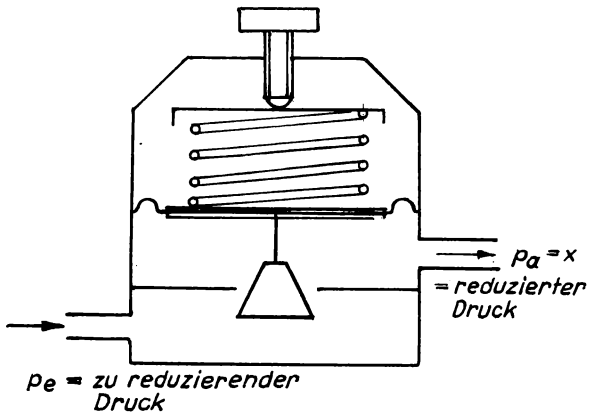


Bild 56

4.4.1.2. P-Regler mit pneumatischer Hilfsenergie

In vielen Varianten (Einlaßdüsensteuerung, Auslaßdüsensteuerung, kombinierte Einlaß- Auslaßdüsensteuerung) immer wiederkehrendes Prinzip aller pneumatischen Regler ist das Erzeugen eines Stelldruckes durch Verstellen der Prallplatte eines Düse-Prallplatte-Systems (Bild 57). Die Regelgröße wird als Moment abgebildet mit dem an einer Feder eingestellten Sollmoment verglichen. Stimmen die Momente nicht überein, wird die Prallplatte proportional zur Differenz der Momente verstellt, da ja das Moment der Feder dem Prallplattenausschlag proportional ist. Der von einer Bezugsstellung aus gemessene Prallplattenausschlag ist der Abweichung der Eingangskraft proportional. Da über die Kennlinie von Düse-Prallplatte der ausgesteuerte Druck dem Prallplattenweg angenähert proportional ist, ist schließlich die Druckabweichung von einem Bezugswert der Abweichung der Eingangskraft proportional: $\Delta p_a = K_R \cdot \Delta F_e$.
Diese Proportionalität gilt nur angenähert (Kennlinie). Die üblichen Prallplattenwege liegen in der Größenordnung von

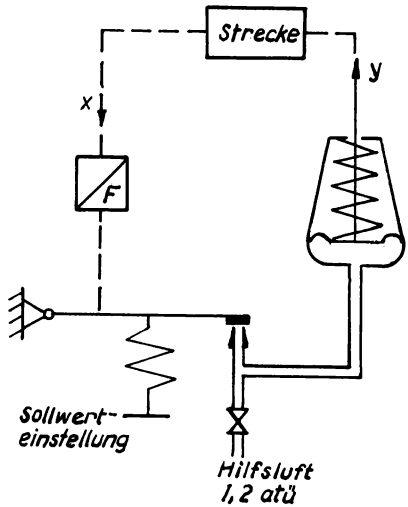


Bild 57

0,1 mm. Die Sollwertfeder müßte also eine sehr große Federkonstante haben oder die Hebelübersetzung müßte konstruktiv entsprechend ausgebildet werden. Diese Schwierigkeiten bewirken, daß pneumatische Regler meist anders, nämlich mit Rückführungen gebaut werden.

5.5.1.3. P-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie

Immer wiederkehrende Bauelemente aller hydraulischen Regler sind kleine Steuerventile und das Strahlrohr. Das Prinzip ist: Kleine Kräfte steuern über Steuerventil oder Strahlrohr einen Druckölstrom, der auf großen Stellkolbenflächen große Stellkräfte auslöst. Dabei hat die Hydraulik "von Haus aus" I-Verhalten, so wie die Pneumatik "von Haus aus" P-Verhalten hat. Hydraulische P-Regler werden deshalb mittels Rückführungen gebaut. Davon wird noch die Rede sein.

5.5.1.4. P-Regler mit elektrischer Hilfsenergie

Bild 58 zeigt den Aufbau einer Spannungsregelung mit einem Maschinenverstärker.

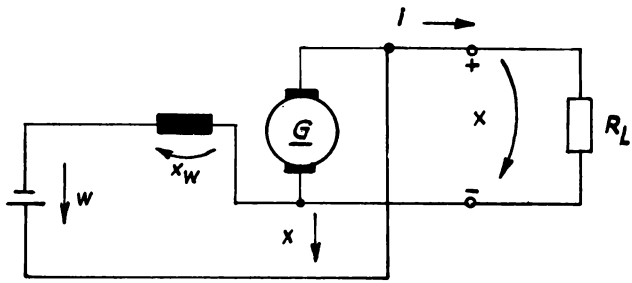


Bild 58

Jeder unterhalb seiner Sättigung erregte, remanenzfreie Gleichstromgenerator ist ein Verstärker, denn seine abgegebene elektrische Leistung ist wesentlich größer als die im Feldkreis aufgewendete Leistung. Es gibt etliche Abwandlungen des einfachen Gleichstromgenerator (Amplidyne, Rototrol, Metadyne usw.). Meist wird dabei sehr große Verstärkung angestrebt. Ein Vorteil der Maschinenverstärker ist die mögliche Mischung verschiedener Eingangssignale in voneinander galvanisch getrennten Feldwicklungen. Es kann aber auch, da ja außerdem eine galvanische Trennung zwischen Feld- und Ankerkreis besteht, die Bildung der Regelabweichung unmittelbar durch Spannungsvergleich vorgenommen werden. Das ist im skizzierten Beispiel der Fall. Im Feldkreis ist die Summe der antreibenden Spannungen (Klemmenspannung x und Führungsspannung w) gleich dem Spannungabfall über der Erregerwicklung. $x_w = w - x$.
Nach der Kennlinie von Gleichstromgeneratoren ist in gewissen Bereichen die induzierte Urspannung e dem Erregerstrom und damit x_w proportional. $e = K\, x_w$. Zwischen Urspannung und Klemmenspannung besteht die Beziehung $e = x + i\, R_i$, wenn

R_i der Widerstand der Ankerwicklung und i der Ankerstrom ist.

$$w - x = x_w = \frac{e}{K} = \frac{x + i \cdot R_i}{K}$$

$$x = \frac{w}{1 + \frac{1}{K}} - \frac{R_i}{1 + K} \cdot i$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß die Klemmenspannung x mit großem K (großer Verstärkung) weitgehend von dem Belastungsstrom i unabhängig wird und daß x durch w eingestellt werden kann. Dabei wird die Regelgröße x nicht genau gleich der Führungsgröße w . Der P-Regelkreis hat eine bleibende Regelabweichung. Für $K \longrightarrow \infty$ (idealer Verstärker mit unendlich großer Verstärkung) wird x = w . Bild 58 war übrigens ein Beispiel für die Art von Regelungen, bei denen Regelstrecke und Regeleinrichtung eine Einheit und gerätemäßig nicht zu trennen sind. Diese Trennung ist andererseits bei den Regelungen nach den Bildern 52, 55, 57 leicht möglich.
Jeder Verstärker mit der Möglichkeit, Eingangssignale (Regelgröße, Führungsgröße, Hilfsgrößen, z.B. Störgrößen) zu mischen, kann als Regler benutzt werden. Das gilt für die Maschinenverstärker und auch für die Magnetverstärker. Magnetische Verstärker werden heute in steigendem Maße verwendet. Sie sind robust, betriebssicher, bedürfen keiner Wartung und beherrschen weite Leistungsbereiche (mW bis einige kW). Das Prinzip der magnetischen Verstärker ist die Änderung des Scheinwiderstandes einer Wechselstromdrossel durch Gleichstromvormagnetisierung des Eisenkernes. Die zur Gleichstromvormagnetisierung benötigte Steuerleistung ist gering im Verhältnis zu der dadurch steuerbaren Wechselstromleistung. Der Ausgangswechselstrom kann selbstverständlich gleichgerichtet werden. Durch mehrere Gleichstromwicklungen ist die Mischung von Eingangssignalen möglich (Bildung der Regelabweichung). Die Verwendung dieses grundsätzlichen Steuerverfahrens in magnetischen Verstärkern führt zu Anordnungen, deren Wirkungsweise umfassend und exakt zu erläutern hier nicht der Platz ist. In der Regel werden mehrere vormagnetisierte Drosseln benutzt und mit Hilfe einer Rückkopplung

wird ein Teil des Ausgangsstromes (Arbeitsstrom) nach erfolgter Gleichrichtung wider dem Eingang (Gleichstrom-Vormagnetisierung) zugeführt. Das Prinzip eines Magnetverstärkers ohne Rückkopplung zeigt Bild 59.

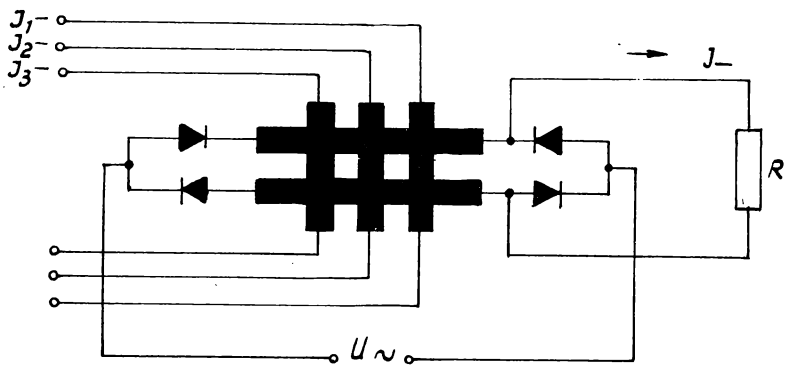


Bild 59

Näherungsweise beschreibt in gewissen Bereichen die folgende Gleichung das Verhalten: $I = \pm K_1 I_1 \pm K_2 I_2 \pm K_3 I_3$
Plus oder minus gilt je nachdem in welcher Richtung der entsprechende Steuerstrom vormagnetisiert. Die K_i hängen von den Drosseleigenschaften ab. Man sieht, daß die Gleichung $y = K (x - w)$ möglich ist. Das ist die Gleichung eines P-Reglers.

5.5.1.5. P-Regler mit elektronischer Hilfsenergie

Unter elektronischer Hilfsenergie soll die Energie der im luftverdünnten oder gasgefüllten Raume oder in Halbleitern bewegten Elektrizitätsträger verstanden werden. Durch Steuergitter läßt sich der Elektronen- bzw. Ionenstrom in einer luftverdünnten bzw. gasgefüllten Röhre beeinflussen. Ähnliche Beeinflussungen mit verstärkender Wirkung sind bei Halbleitern möglich. Durch mehrere Gitter oder durch andere Maßnahmen (Bild 60) ist Signalmischung möglich. Also können P-Regler

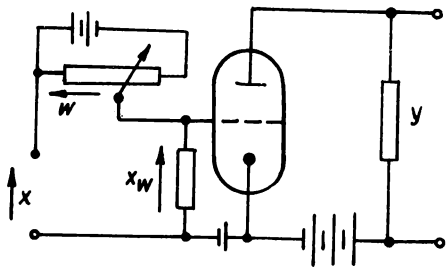


Bild 60

gebaut werden. Es sind vielfältige Schaltungen bekannt. So gut wie immer wird durch geeignete Rückführungen ein gewünschtes Übertragungsverhalten erreicht. Von Haus aus haben die elektronischen Verstärkerelemente P-Verhalten. Bild 60 zeigt schematisch einen P-Regler ohne Rückführung. Alle kleinen Buchstaben bedeuten - wie immer - Abweichungen von Arbeitspunkten. Es gilt (in gewissen Bereichen) $y = - K x_w$.

5.5.2. I-Regler

Pneumatische und elektronische Bauelemente (Düse-Prallplatte, Elektronenröhre, Halbleiter) haben von Haus aus P-Verhalten. Will man pneumatisch bzw. elektronisch I-Regler bauen, so muß das mittels Rückführungen geschehen. Davon soll später die Rede sein. Ohne Rückführungen, also ohne zusätzliche Maßnahmen beim Aufbau, gibt es I-Regler mit hydraulischer und elektrischer Hilfsenergie.

5.5.2.1. I-Regler mit hydraulischer Hilfsenergie

Bild 61 zeigt einen Strahlrohrregler im Signalfluß eines Regelkreises. Die am schwenkbaren Strahlrohr durch Momentenvergleich gebildete Regelabweichung bewirkt eine Auslenkung des Strahlrohres aus der Mittelstellung. Dadurch wird der Öldruck in den beiden Druckaufnehmeröffnungen unterschiedlich, der Stellkolben bewegt sich und verstellt das Stellglied (Ventil, Schieber,

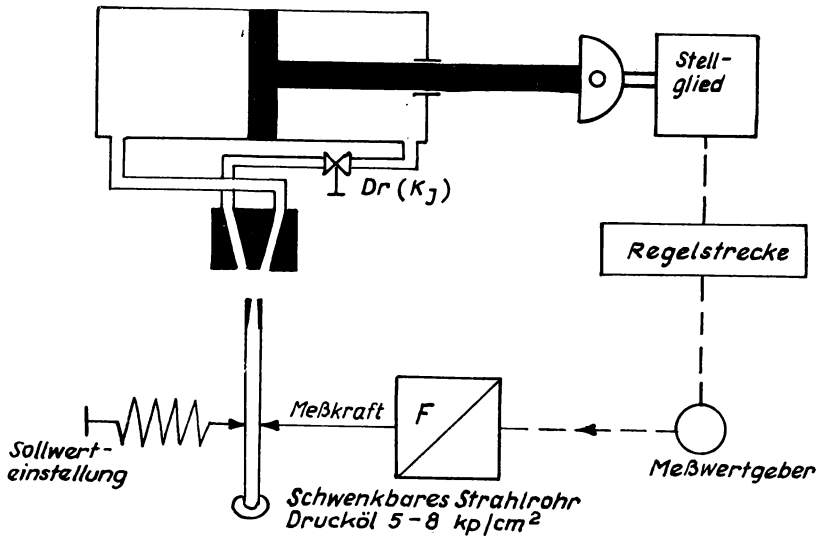


Bild 61

Klappe usw.) so, daß die Meßkraft, die über Meßwertgeber und Umformer ein Abbild der Regelgröße ist, wieder gleich der Sollkraft (Mittelstellung des Strahlrohres) wird. Die Geschwindigkeit des Stellkolbens ist von der Strahlrohrauslenkung und von der Einstellung der Drossel Dr abhängig. Es ist in gewissen Grenzen $\dot{y} = K_I \cdot x_w$.

Bild 62 zeigt eine andere Möglichkeit eines hydraulischen I-Reglers. In Bild 61 war das Strahlrohr der Energieschalter, in Bild 62 ist es ein (etwa daumengroßer) Steuerkolben.

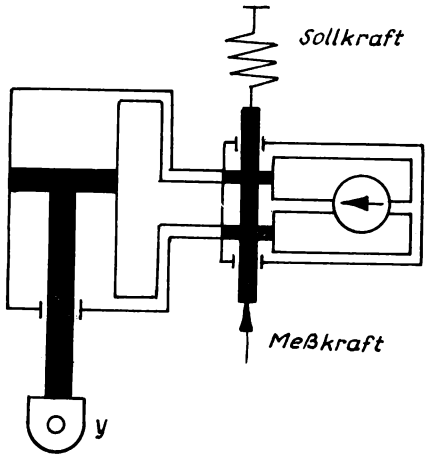


Bild 62

5.5.2.2. I-Regler mit elektrischer Hilfsenergie

Der von einem Elektromotor verstellte Weg hat in Abhängigkeit von der Steuerspannung I-Verhalten. Das ist das Prinzip der elektrischen I-Regler. In Bild 63 hat der Meßwertgeber als Ausgang einen mechanischen Ausschlag, welcher einen induktiven Geber verstellt.

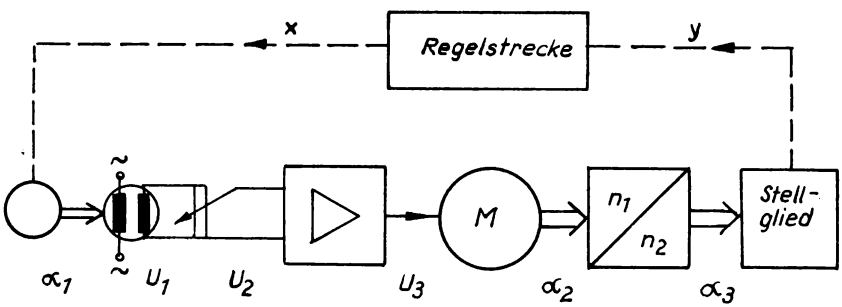


Bild 63

Der Geber ist so angelenkt, daß er keine Spannung abgibt, wenn die Regelgröße x gleich ihrem Sollwert ist. Von der Ausgangswechselspannung des induktiven Gebers ist der Effektivwert ein Maß für den Betrag der Regelabweichung und die Phasenlage ein Maß für die Richtung der Abweichung. Der Soll-Istwert-Vergleich geschieht hier durch einen Wegvergleich. Die Ausgangsspannung des induktiven Gebers (die oft noch gleichgerichtet wird), beaufschlagt einen Verstärker (das kann u.a. ein einfacher Dreipunktschalter sein), der über Motor - Getriebe - Stellglied die Eingangsgröße der Regelstrecke verstellt. Der Motor bleibt erst stehen, wenn der induktive Geber (auch ohmsche Geber werden benutzt) keine Spannung mehr abgibt. Dann ist $x = x_s$. An Gleichungen wäre aufzuschreiben:

$\alpha_1 = c_1 \cdot x$ Der Ausschlag des Meßwerkes ist der Regelgröße proportional

$u_1 = c_g \cdot x_w$ Die Geberspannung ist der Regelabweichung proportional

$u_2 = c_t \cdot u_1$ u_2 ist ein einstellbarer Teil von u_1

$u_3 = V \cdot u_2$ V = Verstärkung

$n = c_M \cdot u_3$ Die Drehzahl ist der Spannung proportional

$\omega = 2\pi n = \dot{\alpha}_2$

$\alpha_2 = i \cdot \alpha_3$ Getriebeübersetzung i

$y = c \cdot \alpha_3$ Die Stellgliedverstellung ist der Winkelverstellung der Antriebsspindel proportional

Zwischen y und x_w gilt also die Beziehung

$$y = c \frac{1}{I} \int 2\pi c_M \cdot V \cdot c_t \cdot c_g \cdot x_w \, dt = K_I \int x_w \cdot dt$$

5.5.3. Beispiele von PI-, PD-, PID-Reglern ohne Rückführung

PI-, PD-, PID-Regler werden durchweg durch entsprechende Rückführungen an Verstärkern verwirklicht. Die Verwirklichung des zusammengesetzten Zeitverhaltens durch Parallelschaltung der Einzelglieder ist zwar denkbar, wird aber kaum benutzt, weil

durch Rückführungen des gewünschte Zeitverhalten viel eleganter erreicht werden kann.
Davon wird noch die Rede sein.

5.5.4. Nachteile von Reglern ohne Rückführung

Beim Regler ohne Rückführung steuert die Regelabweichung die Stellgröße, ohne daß die Stellgröße anders als über die Regelstrecke auf die Regelgröße zurückwirkt (Bild 64).

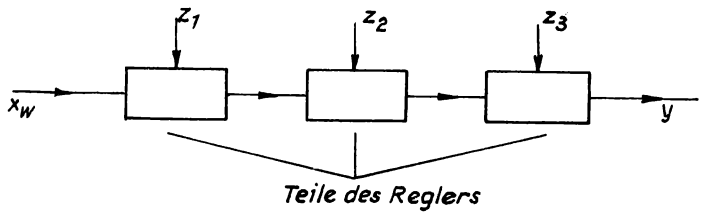


Bild 64

Ob ein x_w das richtige y auslöst, stellt sich erst an der Auswirkung auf die Regelgröße x heraus. Auf die einzelnen Teile des Reglers wirken aber Störgrößen, die die gewünschte Abhängigkeit $y = f(x_w)$ in ungewollter Weise beeinflussen.

Beispiele:
Das Übertragungsverhalten des Reglers wird verändert

in Bild	durch
57	Vordruckschwankungen der Hilfsluft, Verschmutzen der Düse, Hysterese des Membranantriebes usw.
61, 62	Vordruckschwankungen des Drucköles, Federhysterese, Änderung der Viskosität des Öles usw.
59, 63	Speisespannungsschwankungen usw.
60	Speisespannungsschwankungen, Röhrenalterung usw.

Nun soll aber eigentlich ein Regler eine gewollte Abhängigkeit der Stellgröße von der Regelabweichung immer möglichst genau

einhalten, auch entgegen von Störgrößen. Das ist bei den bisher skizzierten Reglern nicht möglich. Der Regler soll die nötige Leistungsverstärkung haben, es soll die meist geringe Meßenergie die weit größere Stellenergie steuern und außerdem soll diese Steuerung noch gewünschte Übertragungseigenschaften konstant besitzen. Das ist beides auf einmal mit einer Geradeausschaltung von Bauelementen nicht exakt möglich. Weiter sollen die Übertragungsfaktoren möglichst auch unabhängig von der Größe der Regelabweichung sein. Denkt man aber an die Kennlinien von Düse-Prallplatte, Strahlrohr, Elektronenröhre usw., so ist deutlich, daß dort keine konstanten Übertragungsfaktoren über größere Bereiche vorliegen. Das könnte im gesamten Regelkreis betrachtet z.B. zu Instabilität führen, wenn der Regler bei z.B. kleinen Regelabweichungen zu stark eingreift; stellte man dagegen die Übertragungsfaktoren kleiner ein, so wäre für größere Regelabweichungen die Einstellung nicht optimal. Es sind also konstante Übertragungseigenschaften im allgemeinen wünschenswert. Manchmal wird die Veränderung der Übertragungseigenschaften mit der Größe der Regelabweichung allerdings bewußt eingeführt (z.B. bei den sog. progressiven Reglern). Wenn Übertragungseigenschaften von Reglern von Störgrößen unabhängig gemacht werden sollen und wenn diese Übertragungseigenschaften unabhängig von "krummen" Kennlinien der verwendeten Bauelemente für alle Regelabweichungen konstant sein sollen, dann muß das getan werden, was zur Konstanthaltung immer getan wird: es müssen die Übertragungseigenschaften geregelt werden. Im Regler wird eine Regelung zur Konstanthaltung der Übertragungseigenschaften eingeführt. Man spricht von Rückführung im Regler. Verschiedene Rückführungen ergeben verschiedenes Zeitverhalten. Ein "kleiner Regelkreis" (Bild 65) innerhalb des "großen Regelkreises" sorgt dafür, daß die Signalverarbeitung der Regeleinrichtung oder auch die Signalverarbeitung von Teilen der Regeleinrichtung (z.B. des Reglers) im gewünschten Sinne konstant bleibt. Die Beeinflussung von y durch x_w wird störunabhängig.

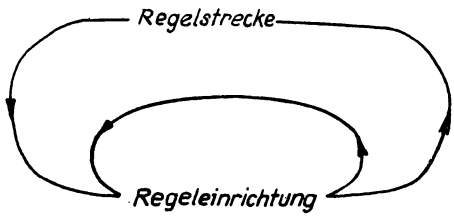


Bild 65

5.6. Rückführungen

5.6.1. Beispiel: Es werde ein Verstärker mit dem Übertragungsfaktor K = 10 gebraucht. Es muß (z.B. durch Röhrenalterung, Hilfsenergieabhängigkeit usw.) mit einer 10%igen Änderung des Übertragungsfaktors gerechnet werden.

1. Lösung: Es wird ein Verstärker ohne Rückführung mit $K = 10 \pm 10\ \%$ gebaut.

2. Lösung: Es wird ein Vorwärtsverstärker mit einem Übertragungsfaktor von $K_v = 100 \pm 10\ \%$ mit einer Rückführung ausgerüstet, die den Gesamtübertragungsfaktor auf K = 10 bringt (Bild 66).

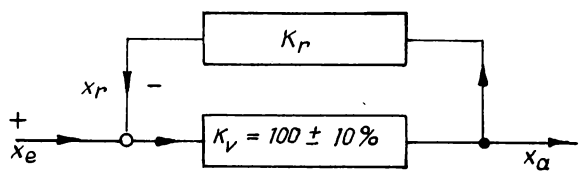


Bild 66

Die Rückführung besteht aus passiven Bauelementen, deren Eigenschaften konstant sind. Die Rückführung habe den Übertragungsfaktor K_r .

Es ist $x_a = K_v\,(x_e - K_r \cdot x_a)$, also $x_a = \dfrac{K_v}{1 + K_v \cdot K_r}\; x_e$.

Der Gesamtübertragungsfaktor ist damit $K = \dfrac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}$

Ändert sich in dieser Beziehung K_v um 10 %, so ändert sich K nur um weniger als 10 %. Das läßt sich mit den bekannten Methoden der Fehlerrechnung leicht zeigen. Ausführlich abgeleitet erhält man folgende Schritte:

1. Differentialbildung auf beiden Seiten $K = f(K_v)$, K_r = konstant (falls auch K_r variabel ist, kann man entsprechend mit $K = f(K_v, K_r)$ rechnen)

$$dK = d\,\frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r} = \frac{\frac{1}{K_v^2}}{(\frac{1}{K_v} + K_r)^2} \cdot dK_v$$

2. Beide Seiten der Gleichung durch $K = \dfrac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}$ dividieren, um auf den relativen Fehler zu kommen.

$$\frac{dK}{K} = \frac{\frac{1}{K_v^2}}{\frac{1}{K_v} + K_r} \cdot dK_v$$

3. Umformen

$$\frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + K_r K_v}\;\frac{dK_v}{K_v}$$

4. Für kleine dK_v gilt ja (Grundlage der Fehlerrechnung)

$$dK_v = \Delta K_v$$

$$dK \approx \Delta K$$

Also ist $\dfrac{\Delta K}{K} \approx \dfrac{1}{1 + K_r K_v} \cdot \dfrac{\Delta K_v}{K_v}$

Der relative Fehler des Gesamtübertragungsfaktors K ist also der $(1 + K_r K_v)$ - te Teil vom relativen Fehler des Übertragungsfaktors K_v des Vorwärtsverstärkers. Für unser Zahlenbeispiel ist aus

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}$$ die Einstellung von K_r zu ersehen.

$$10 = \frac{1}{\frac{1}{100} + K_r}$$, also $K_r = \frac{9}{100}$. Aus der allgemeinen Beziehung zwischen den relativen Fehlern erhält man

$$\frac{dK}{K} = \frac{1}{1 + \frac{9}{100} \cdot 100} \cdot 10\,\% = 1\,\%$$, d.h. der Gesamtübertragungsfaktor ändert sich nur um 1 %. Diese Änderung wäre bei noch größerem K_v noch geringer. $K = 10 \pm 1\,\%$.

Also: "Rezept" zum Bau von P-Gliedern mit weitgehend konstantem Übertragungsfaktor:

1. Teilung in Vorwärtszweig und Rückführzweig. Im Eingang des Vorwärtszweiges muß eine Signalmischung möglich sein.
2. Vorwärtszweig mit möglichst großem Übertragungsfaktor auslegen. Das gilt gleichermaßen für elektronische, elektrische, hydraulische und pneumatische Anordnungen. Der Übertragungsfaktor des Vorwärtszweiges muß nicht konstant sein; Hauptsache: er ist genügend groß.
3. Durch Rückführzweig aus passiven Bauelementen, die keiner Veränderung unterworfen sind (K_r = konstant) den Gesamtübertragungsfaktor auf den gewünschten Wert bringen.
4. Die Übertragungskonstante (veränderlich!) des Vorwärtszweiges wird nicht als Gesamtübertragungskonstante ausgenutzt, sondern zu deren Konstanthaltung.

5.6.2. Grundlagen zu den Rückführungen

Das allgemeine Signalflußbild einer Rückführschaltung (Bild 67) besteht aus dem Vorwärtszweig und dem Rückführzweig.

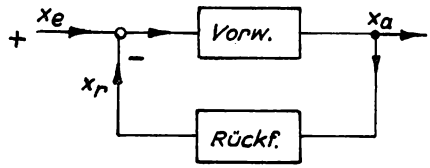
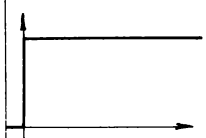
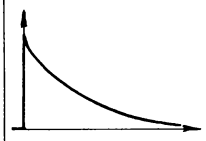
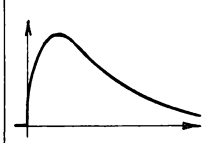
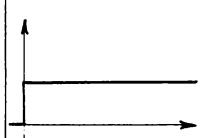
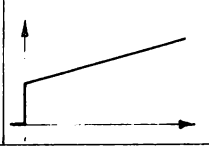
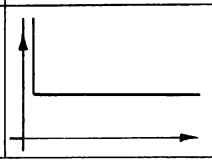
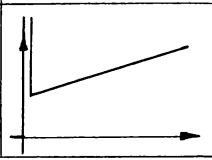


Bild 67

Die Eingangsgröße für den Vorwärtszweig ist die Differenz $x_e - x_r$. Es liegt eine Gegeneinanderschaltung vor. Man erhält die Gesamtgleichung aus den Einzelgleichungen durch die Verkoppelung der Einzelgleichungen und Elimination der Zwischengrößen. Für den Bau von Reglern ist das Vorwärtsglied ein Verstärker großer Verstärkung. Näherungsweise kann man den Übertragungsfaktor als ∞ annehmen. Dann stellt sich immer der Zustand $x_e = x_r$ (exakt $x_e \approx x_r$) ein. Die Eingangsgröße wird von der Rückführgröße kompensiert. Wäre nämlich $x_e > x_r$, bekäme der Verstärker einen positiven Eingang, der ein sehr großes positives x_a und damit über die Rückführung ein größeres x_r zur Folge hätte. Wäre dagegen $x_e < x_r$, bekäme der Verstärker einen negativen Eingang, der ein sehr großes negatives x_a und damit über die Rückführung ein kleineres x_r zur Folge hätte. Es muß sich also $x_e = x_r$ einstellen.
Das gilt unter der Annahme, daß der Vorwärtsverstärker eine sehr große Verstärkung hat. Man erhält also die Gesamtgleichung der Rückführschaltung, wenn man in der Gleichung des Rückführgliedes x_r durch x_e ersetzt. Verschiedene Rückführungen ergeben damit verschiedenes Übertragungsverhalten für den Regler. Die folgende Tabelle 15 gibt übersichtlich die praktisch meist verwendeten Rückführungen mit dem durch sie erzeugten Zeitverhalten an. Eingang des Rückführgliedes ist x_a ; Ausgang des Rückführgliedes ist x_r (Bild 67).
Die Zwischenrechnungen sind weggelassen.

Tabelle 15

Rückführungen				
	starr	nachgebend	verzögert	verzögert und nachgebend
Sprungantwort der Rückführung				
Differentialgleichung der Rückführung	$x_r = K_r\, x_a$	$T_r\, \dot{x}_r + x_r = K_r\, \dot{x}_a$	$T_r\, \dot{x}_r + x_r = K_r\, x_a$	$T_2^2\, \ddot{x}_r + T_1\, \dot{x}_r + x_r = Kr\, \dot{x}_a$
erzeugen an Verstärkern (z.B. Düse-Prallplatte, hydraulische Steuerventile, Magnetverstärker, elektronische Verstärker) folgendes Zeitverhalten:				
Gleichung der Gesamtschaltung	$x_a = \frac{1}{K_r}\, x_e$	$x_a = \frac{T_r}{K_r}\left(x_e + \frac{1}{T_r}\int x_e\, dt\right)$	$x_a = \frac{1}{K_r}\left(x_e + T_r\, \dot{x}_e\right)$	$x_a = \frac{T_1}{K_r}\left(x_e + \frac{1}{T_1}\int x_e\, dt + \frac{T_2^2}{T_1}\, \dot{x}_e\right)$
Zeitverhalten	P	PJ	PD	PJD
Sprungantwort des Gesamtverhaltens				

Rückführungen dienen also nicht nur zur Konstanthaltung der Übertragungseigenschaften des Reglers, sondern mittels der Rückführungen wird das verschiedene Zeitverhalten erzielt. Industrielle stetige lineare Regler sind meist mit Rückführungen gebaut.

Die rechnerisch gewonnenen Ergebnisse lassen sich sehr anschaulich verstehen.

a) Starre Rückführung erzeugt P-Verhalten (Bild 68).

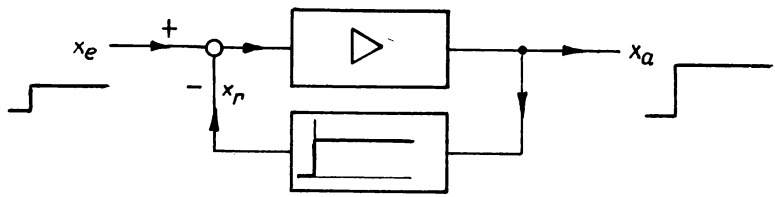


Bild 68

Der Vorwärtsverstärker will ein auftretendes x_e hoch verstärken, wird aber durch die sofort vorhandene Gegenkopplung "im Zaume" gehalten.

b) Nachgebende Rückführung erzeugt PI-Verhalten (Bild 69).

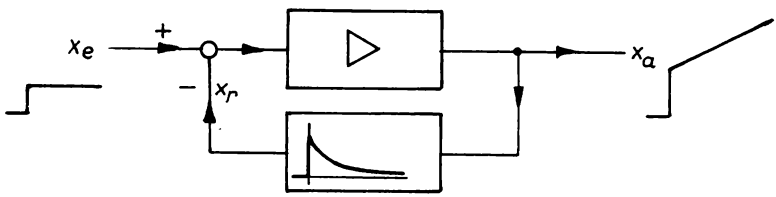


Bild 69

Die nachgebende Rückführung wirkt im ersten Moment wie eine starre Rückführung (⟶ P-Verhalten), dann gibt sie aber nach, d.h. sie koppelt weniger und weniger gegen. Dadurch kann der Ausgang immer größer werden (⟶ I-Verhalten). Insgesamt entsteht also PI-Verhalten.

c) Verzögerte Rückführung erzeugt PD-Verhalten (Bild 70).

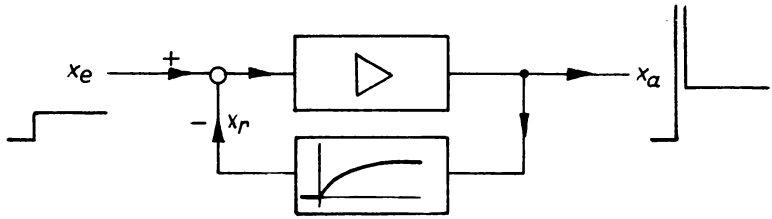


Bild 70

Die verzögert einsetzende Rückführung gibt dem Vorwärtsverstärker die Möglichkeit, ein auftretendes x_e zuerst mit seiner vollen Verstärkung zu verstärken, dann setzt aber die Rückführung ein. Da sie nach Ablauf der Verzögerung wie eine starre Rückführung wirkt, stellt sich schließlich P-Verhalten ein. Insgesamt entsteht also PD-Verhalten.

d) Verzögerte und nachgebende Rückführung erzeugt PID-Verhalten (Bild 71).

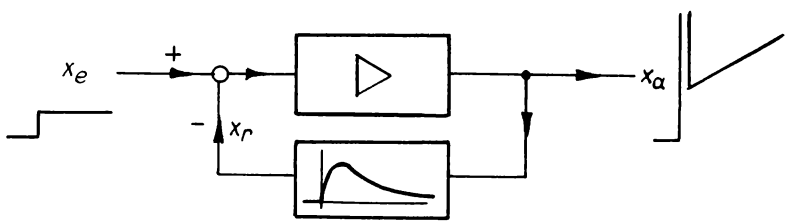


Bild 71

Da die Rückführung verzögert einsetzt, verstärkt der Vorwärtszweig zunächst mit seiner vollen Verstärkung (⟶ D-Anteil). Die einsetzende Rückführung bringt das P-Verhalten. Da die Rückführung aber wieder nachgibt, kann der Ausgang dann ansteigen (⟶ I-Verhalten). Die angegebenen anschaulischen Überlegungen können keinesfalls die Rechnung ersetzen. Der Ingenieur soll aber nicht nur rechnen, sondern auch die Ergeb-

nisse der Rechnung anschaulich qualitativ voraussehen. In dem Sinne wurden die obigen Überlegungen angegeben.

5.6.3. Die gerätemäßige Verwirklichung der verschiedenen Rückführungen

Der Aufbau von Reglern läuft meist auf die Ausrüstung von Verstärkern hoher Verstärkung (Energieschaltern), die eingangsseitig Signale zu mischen gestatten, mit entsprechenden Rückführungen hinaus. Verschiedene Rückführungen ergeben verschiedenes Zeitverhalten und damit die verschiedenen Reglertypen. Als Verstärker kommen vor:

Düse-Prallplatte-System
hydraulische Steuerventile, Strahlrohr
Magnetverstärker, elektrische Maschinenverstärker
elektronische Verstärker usw.

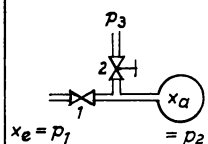
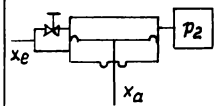
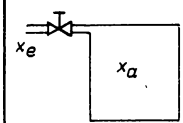
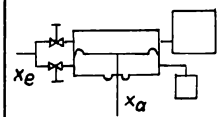
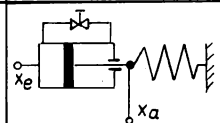
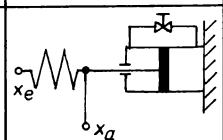
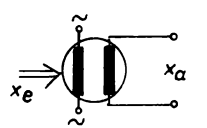
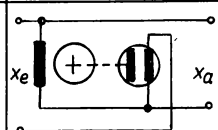
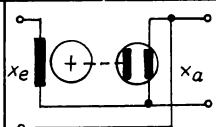
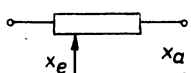
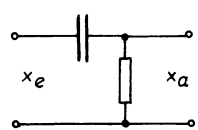
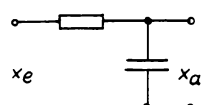
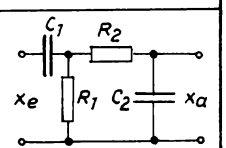
Es sind nun folgende Fragen zu beantworten:

1. Wie verwirklicht man grundsätzlich die verschiedenen Rückführungen, wie erreicht man also pneumatisch, hydraulisch, elektrisch und elektronisch das starre, nachgebende, verzögerte sowie das verzögerte und nachgebende Übertragungsverhalten?
2. Wie sieht das Zusammenarbeiten von Vorwärtsverstärker und Rückführung an Beispielen aus?

Die zweite Frage wird im Abschnitt "Stetige Regler mit Rückführungen" beantwortet. Antwort auf die erste Frage gibt die Tabelle 16, deren Skizzen teils bekannt, teils ohne weiteres verständlich sind.
Zur Erläuterung mögen noch die folgenden Bemerkungen dienen.

Starre Rückführung:
pneumatisch: Druckteilerschaltung. Der Eingang der Rückführung $x_e = p_1$ (das ist der Ausgang des ganzen Reglers) steht mit dem Ausgang der Rückführung $x_a = p_2$ (das ist die Größe x_r des Signalflußbildes Bild 67) in starrer Abhängigkeit. Ändert sich x_e, so ändert sich x_a sofort mit. Es gilt näherungsweise die

Tabelle 16

Rückführungen				
Bezeichnung	starr	nachgebend	verzögert	verzögert und nachgebend
pneumatisch				
mechanisch hydraulisch				
elektrisch				
elektronisch				

Beziehung $\frac{p_1 - p_2}{p_2 - p_3} = \frac{a_2^2}{a_1^2} = k$, also ist $p_2 = \frac{p_1 + k \cdot p_3}{1 + k}$

a_1 = Öffnungsfläche der Drossel 1

a_2 = Öffnungsfläche der Drossel 2

Die Druckteilerschaltung ist ein wichtiges Funktionselement der Pneumatik.

mechanisch-hydraulisch: starrer Hebel. Der Weg x_a ändert sich proportional zum Weg x_e. Diese Rückführung - wie auch die meisten anderen in Tabelle 16 angeführten - werden in späteren Beispielen von Reglern vorkommen.

elektrisch: Mit der Winkelverstellung x_e des Rotors eines induktiven Gebers ändert sich starr gekoppelt die im Stator induzierte Spannung x_a. In gewissen Grenzen gilt $x_a = c_g \cdot x_e$.

elektronisch: Die Verstellung des Widerstandsabgriffes hat sofort (eben starr) eine Widerstandsänderung x_a (bzw. Spannungsänderung) zur Folge.

Nachgebende Rückführung:

pneumatisch: Der Eingangsdruck x_e (man denke an sprungförmiges Auftreten von x_e) herrscht sofort in der unteren Membrankammer 1, in der oberen Membrankammer 2 (Drossel-Speicher-System) baut er sich verzögert auf. Dadurch wirkt auf die Membran (wirksame Fläche A) zunächst eine Ausgangskraft x_a nach oben, die dann aber nachgibt und zu Null wird. Es ist unter Vernachlässigung der kleinen Durchführungsmembran mit $x_e = p_e$:

$$x_a = A \, (p_e - p_2)$$

$$T \cdot \dot{p}_2 + p_2 = p_e$$

Aus der ersten Gleichung folgt $p_2 = p_e - \frac{1}{A} \cdot x_a$. Wird das in die zweite Gleichung eingesetzt, so erhält man

$$T \cdot \dot{p}_e - \frac{T}{A} \dot{x}_a + p_e - \frac{1}{A} x_a = p_e \quad \text{und geordnet}$$

$$T \, \dot{x}_a + x_a = T \cdot A \cdot \dot{p}_e$$

Das ist DT_1-Verhalten, also nachgebendes Verhalten.

mechanisch-hydraulisch: Wird x_e sprungförmig nach rechts verstellt, so wird der ölgefüllte Zylinder nebst Kolben und Umgehungsleitung mit nach rechts genommen. Mit dieser sofort erfolgten sprungförmigen Verstellung von x_a ist die Feder gespannt worden (Federkraft $c \cdot x_a$), das Öl links vom Kolben steht damit unter dem Druck $\frac{c \cdot x_a}{A}$ (A = Kolbenfläche) und strömt durch die Umgehungsleitung auf die andere Seite des Kolbens. Näherungsweise ist das pro Zeiteinheit strömende Ölvolumen $\frac{dV}{dt}$ der Druckdifferenz $\frac{c \cdot x_a}{A} - o$ (der Druck auf der rechten Seite des Kolbens kann als o angesetzt werden) und der Drosseleinstellung d proportional. Indem der Kolben so im Zylinder nach links läuft, wird die Federkraft geringer und damit das pro Zeiteinheit strömende Ölvolumen geringer. Im Ausgleichszustand ist x_a wieder Null. Also: Bei sprunghafter Verstellung des Einganges wird der Ausgang zunächst sprungförmig mitverstellt, gibt dann aber nach und geht auf Null zurück. Es gelten folgende Gleichungen:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c}{A} \cdot x_a \cdot d \quad , \quad x_a = x_e - \frac{V}{A} \quad ,$$ aus denen V leicht eliminiert werden kann, um eine Beziehung zwischen x_e und x_a zu finden.

$$\frac{A^2}{c \cdot d} \cdot \dot{x}_a + x_a = \frac{A^2}{c \cdot d} \cdot \dot{x}_e$$

A = Kolbenfläche
c = Federkonstante
d = Drosselkonstante (einstellbar)

Aus $\frac{dV}{dt} = \frac{c}{A} x_a \cdot d$ folgt, da $\frac{c}{A} \cdot x_a$ ein Druck ist, daß dimensionsmäßig d = Volumen pro Zeit- und Druckeinheit ist.

elektrisch: Die skizzierte Anordnung besteht aus folgenden Bauelementen: Ein Motor, dessen Drehzahl der Steuerspannung proportional ist $(n = c_M \cdot u_M)$, verstellt über ein angebautes Getriebe einen induktiven Geber. Die im Geber induzierte Spannung ist der Winkelverstellung proportional $(u_g = c_g \cdot \alpha)$. Die Geberspannung wirkt der Eingangsspannung entgegen. Dadurch läuft der Motor immer langsamer und kommt so schließlich zur Ruhe. Wenn man

den Spannungsabfall über der Geberwicklung gegenüber dem über der Motorwicklung vernachlässigt, so gilt zwischen Eingangsspannung $x_e = u_e$, im Geber induzierter Urspannung u_g und über dem Motor abfallender Steuerspannung u_M die Beziehung

$u_M = u_e - u_g$.

Mit $n = c_M \cdot u_M$, $u_g = c_g \cdot \alpha$, $\omega = \dot{\alpha} = 2\pi n$ läßt sich der Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang errechnen. Ausgangsgröße bei der Schaltung als nachgebende Rückführung ist die über dem Motor abfallende Spannung $u_M = u_a$. Es wird

$$u_a = u_e - c_g \int 2\pi c_M \cdot u_a \cdot dt \quad , \text{ also } \frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} \dot{u}_a + u_a = \frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} \dot{u}_e$$

elektronisch:

Die den Vierpol beschreibende Gleichung kann man für unbelasteten Ausgang leicht finden. Es ist mit $x_e = u_e$ und $x_a = u_a$: $u_e = u_C + u_a$, $u_C = \frac{1}{C}\int i\, dt$, $u_a = R\, i$. Elimination von u_C und i ergibt $R \cdot C \cdot \dot{u}_a + u_a = R \cdot C \cdot \dot{u}_e$. Das ist nachgebendes Verhalten. Man kann sich das leicht anschaulich deutlich machen. Bei sprungförmiger u_e-Verstellung wirkt der Kondensator wie ein Kurzschluß, im stationären Zustand sperrt er. Über dem Widerstand fällt also zuerst die volle Eingangsspannung ab, dann klingt aber die Spannung über dem Widerstand mit der Kondensatoraufladung ab.

Verzögerte Rückführung:

pneumatisch: Ein Eingangsdruck $p_e = \dot{x}_e$ baut sich im Speicher des Drossel-Speicher-Systems verzögert auf.

$$T\, \dot{x}_a + x_a = x_e$$

Diese Gleichung wurde schon früher abgeleitet.

mechanisch-hydraulisch: Einer sprungförmigen Verstellung des Weges x_e folgt der Weg x_a verzögert. Wird x_e nach rechts verstellt, so wird die Feder gespannt. x_a folgt so, wie das Öl mit der Kolbenkraft $c\,(x_e - x_a)$ durch die Umgehungsleitung gedrückt wird. Mit den bei der nachgebenden hydraulischen Rückführung verwendeten Bezeichnungen gilt:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c\,(x_e - x_a)}{A}\,d \quad , \quad x_a = \frac{V}{A}$$

Also besteht zwischen x_e und x_a die Beziehung

$$\frac{A^2}{c \cdot d}\,\dot{x}_a + x_a = x_e$$

elektrisch: Die Schaltung ist prinzipiell die gleiche wie bei der nachgebenden Rückführung, nur daß jetzt die Geberspannung u_g als Ausgangsspannung herausgeführt wird. Mit den bereits verwendeten Bezeichnungen ist mit $u_g = u_a$:

$$u_a = u_e - \frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g} \cdot \dot{u}_a \quad , \text{ also geordnet}$$

$$\frac{1}{2\pi c_M \cdot c_g}\,\dot{u}_a + u_a = u_e \quad \text{Das ist } T_1\text{-Verhalten mit } T = \frac{1}{2\pi c_M c_g}$$

Der Übertragungsfaktor (der hier 1 ist) läßt sich leicht durch einen angefügten Spannungsteiler noch einstellbar machen.

elektronisch: Der an dieser Stelle der Tabelle 16 skizzierte Verzögerungsvierpol ist bekannt. $R \cdot C \cdot \dot{x}_a + x_a = x_e$ lautet seine beschreibende Gleichung.

Verzögerte und nachgebende Rückführung:

pneumatisch: Der Druck p_1 in der unteren Membrankammer baut sich bei Sprungeingang von $x_e = p_e$ verzögert auf, der Druck p_2 in der oberen Membrankammer baut sich ebenfalls verzögert auf.

$$T_1 \cdot \dot{p}_1 + p_1 = p_e$$

$$T_2 \cdot \dot{p}_2 + p_2 = p_e$$

Es ist $T_2 > T_1$ eingestellt. In der Skizze ist das durch verschieden große Speicher angedeutet. Praktisch geschieht die Einstellung durch unterschiedliche Drosseln. Die nach oben auf die Membran wirkende Kraft x_a wächst verzögert, wird dann aber - noch mehr verzögert - wieder zu Null. Es ist $x_a = (p_1 - p_2).A$ Mit den beiden anderen Beziehungen erhält man die Abhängigkeit:

$$T_1T_2 \cdot \ddot{x}_a + (T_1 + T_2) \cdot \dot{x}_a + x_a = A(T_2 - T_1)\, \dot{x}_e$$

mechanisch-hydraulisch: Es sind solche Anordnungen möglich, aber kaum gebräuchlich. Man denke an eine Hintereinanderschaltung der verzögerten und der nachgebenden Rückführung als mögliches Beispiel.

elektrisch: Die Hintereinanderschaltung der skizzierten verzögerten und der nachgebenden Rückführung ergibt das verzögerte und nachgebende Zeitverhalten.
Auch folgendes ist möglich: Ein Verstärker mit mehreren Eingängen (z.B. Magnetverstärker mit mehreren Eingangswicklungen) kann verzögert (Zeitkonstante T_1) gegengekoppelt und verzögert (Zeitkonstante T_2 mit $T_2 > T_1$) mitgekoppelt werden. Insgesamt ergibt das eine verzögerte und nachgebende Gegenkopplung (Bild 72).

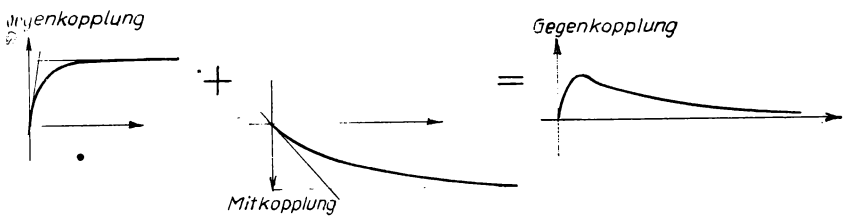


Bild 72

elektronisch: Als beschreibende Gleichung findet man:

$$R_1R_2C_1C_2 \cdot \ddot{x}_a + (R_1C_1 + R_1C_2 + R_2C_2)\, \dot{x}_a + x_a = R_1C_1 \cdot \dot{x}_e$$

Das ist DT_2-Verhalten, also kann der skizzierte Vierpol als verzögerte und nachgebende Rückführung verwendet werden.

5.7. Beispiele stetiger Regler mit Rückführungen

An einigen Beispielen soll das Zusammenwirken Vorwärtsverstärker - Rückführung gezeigt werden. Immer will die Regelabweichung x_w über den Energieschalter eine sehr große Stellabweichung y auslösen, diese Stellabweichung kompensiert aber über die Rückführung die Regelabweichung und es stellt sich der Gleichgewichtszustand ein. Die Kompensation ist eine Kraftkompensation oder auch Wegkompensation, Spannungskompensation, Stromkompensation.
Die folgenden Beispiele sind nach den verwendeten Energieschaltern gegliedert. Es soll damit das Prinzip deutlich werden: Verschiedene Rückführungen ergeben im Zusammenwirken mit ein und demselben Verstärker verschiedenes Zeitverhalten der Gesamtschaltung.

5.7.1. Pneumatische Energieschalter (Düse-Prallplatte) mit verschiedenen Rückführungen

P-Regler (Bild 73), PD-Regler (Bild 74), PI-Regler (Bild 75). Die skizzierten Regler gehören zum GRW-Kombi-System. Die Regelgröße wird in eine proportionale Kraft F_e umgewandelt (Druck über Membranfläche, Strom über Tauchspule, Temperatur über Längenänderung- Federkraft usw.; alle Größen lassen sich in eine proportionale Kraft wandeln). F_e wird mit einer an der Sollwertfeder eingestellten Sollkraft verglichen. Die Differenz bewegt die Prallplatte (Ausschlag $\approx$ o,1 mm), steuert den Ausgangsdruck p_a, dieser wirkt über die Rückführmembran (mit z.B. 5 cm^2 wirksamer Membranfläche) der Eingangskraft entgegen. Es stellt sich Momentengleichgewicht an der Prallplatte ein. Die Federkraft wird so eingestellt, daß für $F_e = F_{Soll}$ der Ausgangsdruck p_a gleich einem mittleren Druck p_{ao} ist (meist o,6 at Ü, das ist die Mitte zwischen o,2 und 1,o at Ü). Der Rückführdruck p_r hat dann auch einen mittleren Wert p_{ro}, der von der Einstellung der Druckteilerschaltung anhängt. Von dieser Gleichgewichtslage aus arbeitet der Regler. Die Federkraft kann als konstant angenommen werden (Prallplattenwege sehr klein).

Die Abweichungen der Größen von den Mittellagen $F_e = F_{Soll}$, $p_a = p_{ao}$, $p_r = p_{ro}$ werden mit ΔF_e, Δp_a, Δp_r bezeichnet. Die wirksame Membranfläche sei A, das ist die Fläche der großen Membran minus die Fläche der kleinen Membran zur druckdichten Durchführung des kräfteübertragenden Metallstiftes.

P-Regler, starre Rückführung (Bild 73)

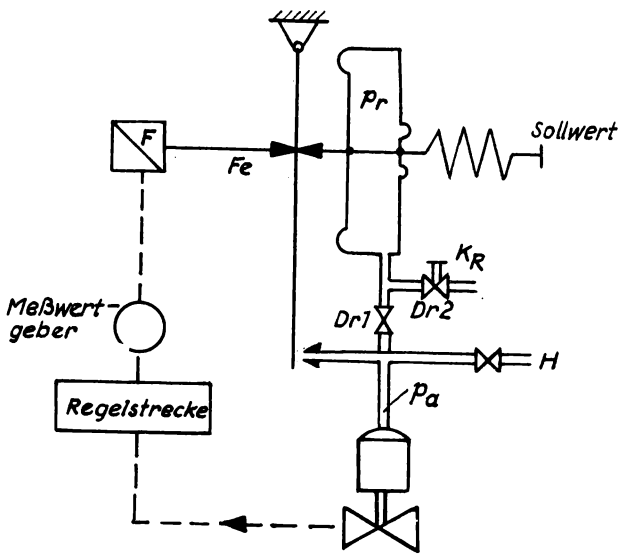


Bild 73

Momentengleichgewicht von Bezugslage aus:

$$\Delta F_e = \Delta p_r \cdot A$$

Druckteilung von Bezugslage aus

$$\frac{\Delta p_a - \Delta p_r}{\Delta p_r - o} = \frac{a_2^2}{a_1^2} = k$$

Elimination von Δp_r ergibt $\Delta p_a = \frac{1 + k}{A} \Delta F_e$.

Das ist die Gleichung eines P-Reglers.

$$K_R = \frac{1 + k}{A} = \frac{1 + \frac{a_2^2}{a_1^2}}{A}$$

Drossel 2 ganz zu (d.h. $a_2 = o$) : $K_R = \frac{1}{A}$

Drossel 2 ganz auf (d.h. $a_2 \longrightarrow \infty$) : $K_R \longrightarrow \infty$

An der Drossel 2 wird der Übertragungsfaktor eingestellt.

PD-Regler, verzögerte Rückführung (Bild 74)

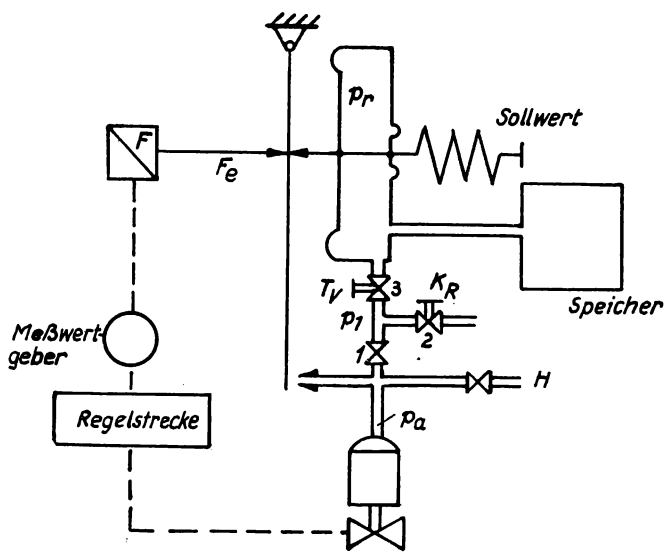


Bild 74

Gegenüber dem P-Regler ist die Drossel 3 und ein Speicher (kinderfaustgroßer Behälter) dazugekommen. Δp_r folgt jetzt dem Δp_a verzögert.

Momentengleichgewicht von Bezugslage aus: $\Delta F_e = \Delta p_r A$

Druckteilung von Bezugslage aus

$$\frac{\Delta p_a - \Delta p_1}{\Delta p_1 - o} = \frac{a_2^2}{a_1^2} = k$$

Das gilt nur angenähert, weil hier keine unverzweigte pneumatische Strömung vorliegt.

Verzögerung von Δp_r mit Δp_1 als Eingang: $T_r \Delta \dot{p}_r + \Delta p_r = \Delta p_1$

Elimination von Δp_r und Δp_1 ergibt:

$$\Delta p_a = \frac{1 + k}{A} (\Delta F_e + T_r \Delta \dot{F}_e)$$

Das ist die Gleichung eines PD-Reglers.

$$K_R = \frac{1 + k}{A} \quad , \quad T_v = T_r$$

<u>PI-Regler, nachgebende Rückführung</u> (Bild 75)

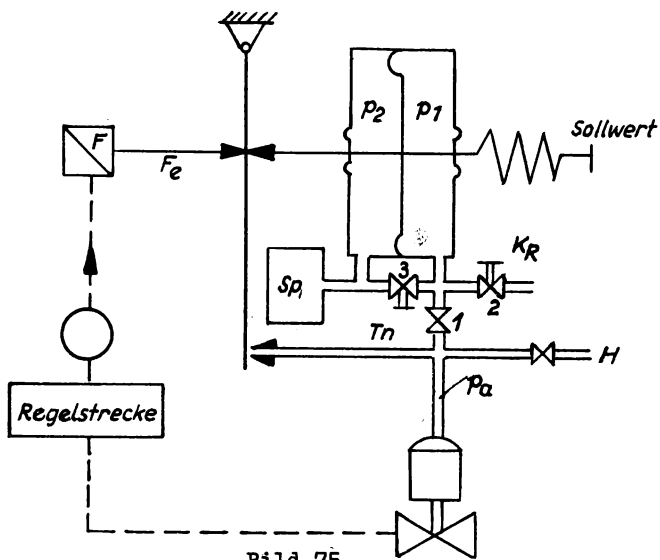


Bild 75

Über Kammer 1 wird starr gegengekoppelt und über Kammer 2 verzögert mitgekoppelt, das ergibt insgesamt eine nachgebende Gegenkopplung.

Momentengleichgewicht von Bezugslage aus: $\Delta F_e = (\Delta p_1 - \Delta p_2)\, A$

Druckteilung von Bezugslage aus: $\dfrac{\Delta p_a - \Delta p_1}{\Delta p_1} = \dfrac{a_2^2}{a_1^2} = k$

Das gilt nur angenähert, weil hier keine unverzweigte pneumatische Strömung vorliegt.

Verzögerung von Δp_2 mit Δp_1 als Eingang: $T_r \Delta \dot{p}_2 + \Delta p_2 = \Delta p_1$

Elimination von Δp_1 und Δp_2 ergibt

$$\Delta p_a = \frac{1+k}{A} \left(\Delta F_e + \frac{1}{T_r} \int \Delta F_e \cdot dt \right)$$

Das ist die Gleichung eines PI-Reglers. $K_R = \dfrac{1+k}{A}$, $T_n = T_r$

<u>PID-Regler, verzögerte und nachgebende Rückführung</u> (Bild 76)

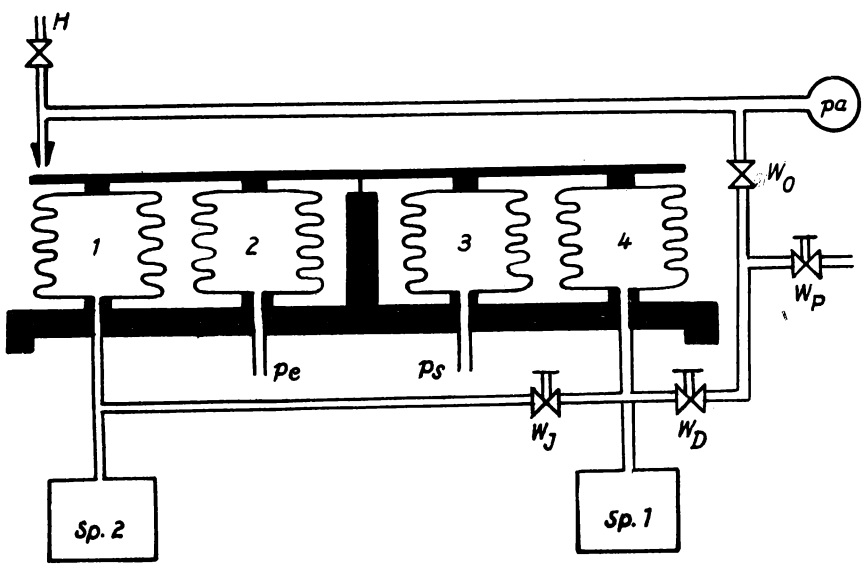


Bild 76

Soll-Istwert-Vergleich über Federbälge 2 und 3. Sollwert wird hier als Druck eingestellt. Verzögerte Gegenkopplung über Federbalg 4, noch mehr verzögerte Mitkopplung über Federbalg 1. Insgesamt: Verzögerte und nachgebende Rückführung ergibt PID-Verhalten.

5.7.2. Hydraulischer Energieschalter (Strahlrohr) mit verschiedenen Rückführungen

P-Regler (Bild 77), PI-Regler (Bild 78). Die skizzierten Regler werden im VEB GRW Teltow hergestellt.

P-Regler (Bild 77)

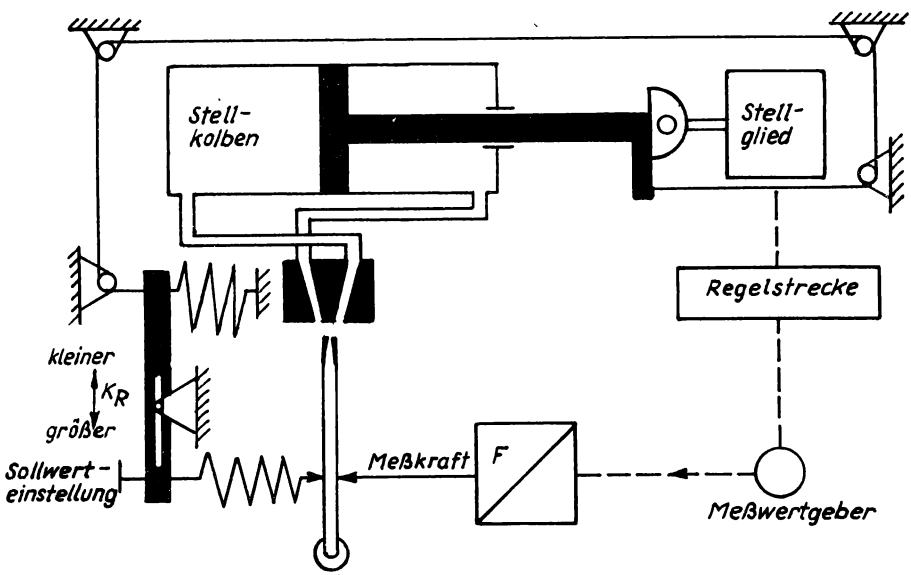


Bild 77

Für das Verstehen der Funktion eines Reglers ist immer wieder das Durchdenken der Reaktion auf einen Sprungeingang günstig.

Ausgangsstellung: Strahlrohr in Mittelstellung, Stellkolben steht. Annahme: die Meßkraft wird plötzlich größer, dann: Druck in linker Druckaufnehmeröffnung wird größer als in rechter - Stellkolben läuft nach links - über Drahtseil wird Hebel bewegt und die Sollwertfeder, die gleichzeitig Rückführfeder ist, wird mehr gespannt - das wirkt der größeren Meßkraft entgegen - Stellkolben läuft so lange, bis Rückführkraft = Meßkraft - dann ist die Kolbenstellungsänderung der Meßkraftänderung proportional - P-Verhalten.
Das P-Verhalten hat hier eine Verzögerung 1. Ordnung, weil das Vorwärtsglied ein I-Verstärker ist. Also auch I-Glieder ergeben mit starrer Rückführung ausgerüstet P-Verhalten.

Beweis: Nach Bild 79 ist $x_a = K_I \int (x_e - x_r)\, dt$ und

$x_r = K_r\, x_a$ Elimination von x_r führt auf

$$\frac{1}{K_I \cdot K_r}\, \dot{x}_a + x_a = \frac{1}{K_r}\, x_e \quad (PT_1\text{-Verhalten})$$

PI-Regler (Bild 78)

Meßkraft größer, Strahlrohr schwenkt nach links, Rückführkolben läuft nach links, schiebt Öl aus 3 in 2, Stellkolben läuft nach links, Rückführkolben spannt Feder 1 bis die Federkraft gleich der größer gewordenen Meßkraft ist, dann steht Strahlrohr wieder in Mittelstellung. Bis hierher ist die Stellkolbenverstellung der Meßkraftänderung proportional (P-Verhalten). Nun ist aber beim Nach-links-laufen des Rückführkolbens die Feder 2 gespannt worden, sie will den Rückführkolben zurückholen. Das würde das Strahlrohr wieder nach links schwenken und damit den Rückführkolben wieder nach links laufen lassen. In dem sich einstellenden Gleichgewicht strömt Öl durch die Umgehungsleitung des Rückführzylinders und verstellt den Stellkolben weiter langsam nach links (I-Verhalten). Das führt über Stellglied - Regelstrecke zu einer Angleichung der Regelgröße an den Sollwert, damit nimmt die als zu groß geworden angenommene Meßkraft ab und das System kommt so zur Ruhe.

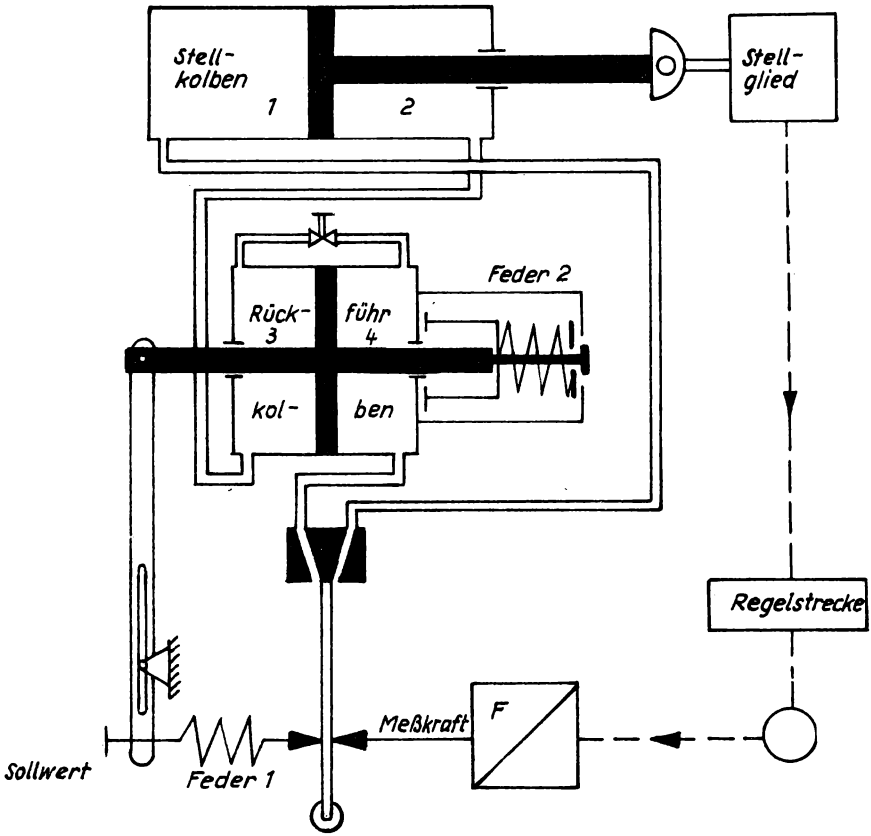


Bild 78

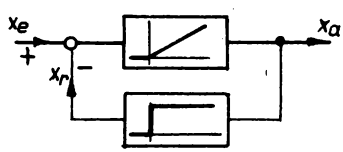


Bild 79

5.7.3. Elektrischer Energieschalter (Verstärker - Motor - Getriebe) mit verschiedenen Rückführungen

Bild 80 zeigt die Ausrüstung der Anordnung: Meßwerk mit mechanischem Ausschlag - induktiver Geber - Verstärker - Motor - Getriebe - Stellglied, die I-Verhalten hat, mit a) einer starren, b) einer nachgebenden und c) einer verzögerten Rückführung. Der Regler bekommt so a) P-, b) PI- und c) PD-Verhalten. Die Sollwerteinstellung kann durch entsprechendes mechanisches Anlenken des induktiven Gebers am Meßwerk erfolgen. Statt induktiver Geber sind auch ohmsche oder andere Geber denkbar. Die Funktion der skizzierten Regler ist nach den bisherigen Erläuterungen, insbesondere denen zu den verwendeten Rückführungen, zu verstehen. Auf die Aufstellung der zugehörigen Gleichungen soll hier verzichtet werden.

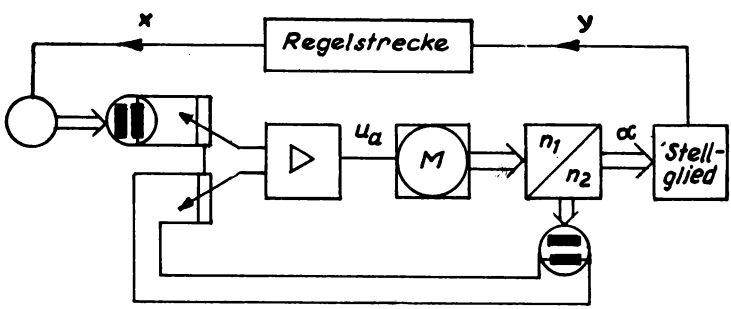


Bild 80 a

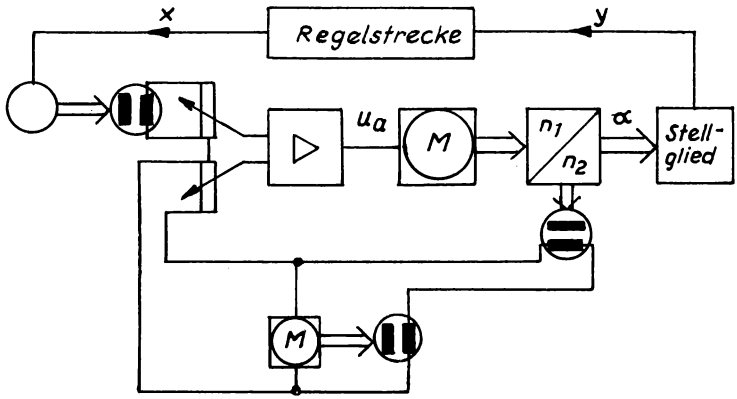


Bild 80 b

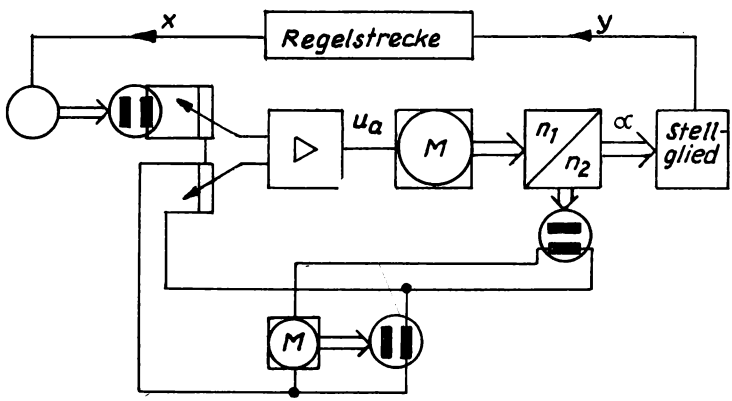


Bild 80 c

5.7.4. Elektronischer Energieschalter (elektronischer Verstärker) mit verschiedenen Rückführungen

Bild 81 zeigt (sehr schematisch) einen elektronischen Verstärker mit a) einer starren Rückführung (P-Verhalten), b) einer nachgebenden Rückführung (PI-Verhalten) und c) einer verzögerten Rückführung (PD-Verhalten).

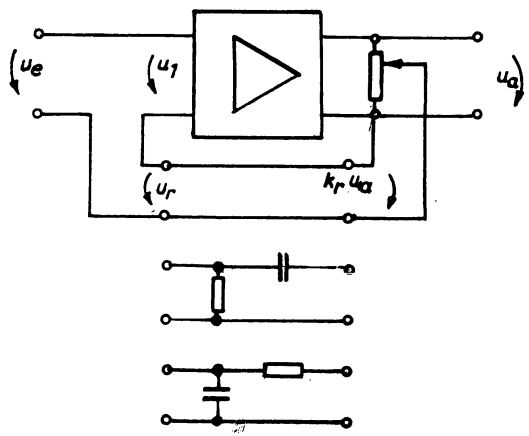


Bild 81

Die Anwendung des Maschensatzes auf den Eingangskreis ergibt $u_e - u_r - u_1 = o$, also $u_1 = u_e - u_r$. Weiter ist $u_a = V\, u_1$. Zusammen mit der vorhergehenden Gleichung erhält man $\frac{u_a}{V} = u_e - u_r$. Für $V \longrightarrow \infty$ muß $u_e = u_r$ sein. Indem man also in der Gleichung der Rückführung u_r durch u_e ersetzt, erhält man die das Gesamtverhalten des gegengekoppelten Verstärkers beschreibende Gleichung.

a) starre Rückführung: $u_r = k_r u_a$

Gesamtverhalten: $u_e = k_r u_a$, also $u_a = \frac{1}{k_r}\, u_e$ (P-Verhalten).

b) nachgebende Rückführung: $T_r \dot{u}_r + u_r = T_r k_r \dot{u}_a$

Gesamtverhalten: $T_r \dot{u}_e + u_e = T_r k_r \dot{u}_a$, also

$$u_a = \frac{1}{k_r} \left(u_e + \frac{1}{T_r} \int u_e \cdot dt \right) \text{ (PI-Verhalten)}$$

c) verzögerte Rückführung: $T_r \dot{u}_r + u_r = k_r u_a$

Gesamtverhalten: $T_r \dot{u}_e + u_e = k_r u_a$, also

$$u_a = \frac{1}{k_r} \left(u_e + T_r \dot{u}_e \right) \text{ (PD-Verhalten)}$$

Wiederholungsfragen zu 5.

W5.1. Nach welchen Gesichtspunkten kann man Regler einteilen?

W5.2. Was ist ein Zweipunktregler? Welche Kennwerte charakterisieren ihn?

W5.3. Nennen Sie Beispiele von Zweipunktreglern!

W5.4. Was ist ein Zweilaufregler? Welche Kennwerte charakterisieren ihn?

W5.5. Was ist der P-Bereich eines Reglers?

W5.6. Was ist die Stellzeit, was der Laufbereich eines I-Reglers?

W5.7. Nennen Sie Beispiele von P-Reglern! Wie findet jeweils der Soll-Istwert-Vergleich statt?

W5.8. Nennen Sie Beispiele von I-Reglern!

W5.9. Welche Nachteile haben Regler ohne Rückführung?

W5.10. Was bezwecken Rückführungen?

W5.11. Wieso linearisiert eine starre Rückführung das Übertragungsverhalten von Gliedern?

W5.12. Welche Regler entstehen durch die starre, die nachgebende und die verzögerte Rückführung an Verstärkern?

W5.13. Machen Sie sich die "Arbeitsteilung" von Vorwärtszweig und Rückführzweig einer Gegenkopplungsschaltung klar! Welche Aufgaben müssen Vorwärtszweig und Rückführzweig erfüllen?

W5.14. Die Rückführung auf den Eingang des Vorwärtsgliedes erfordert die Möglichkeit der Signalmischung. Welche Möglichkeiten der Signalmischung gibt es bei pneumatischen, hydraulischen, elektrischen und elektronischen Verstärkern?

W5.15. Was versteht man unter einem Energieschalter? Geben Sie Beispiele an!

W5.16. Skizzieren Sie aus dem Gedächtnis einige Regler mit Rückführung!

Übungsaufgaben zu 5.

Ü5.1. Ein P-Regler mit Stromeingang (0 bis 20 mA) und Hubausgang (o bis 40 mm) soll für P-Bereiche von 1 mA bis 20 mA einstellbar sein. In welchen Grenzen ist damit sein Übertragungsfaktor einstellbar?

Ü5.2. Ein Motor, der von einem elektronischen Verstärker ausgesteuert wird, verstellt über eine Spindel einen Schlitten. Die maximale Geschwindigkeit betrage 5 $\frac{cm}{s}$, der Stellbereich betrage 30 cm. Welche Stellzeit hat die Anordnung?

Ü5.3. In Bild 63 sei die Regelstrecke der Schlitten einer Werkzeugmaschine (y = Weg, x = Weg). Der induktive Geber forme einen x - Weg von 10 mm in eine Spannung von 2 V um, der Spannungsteiler gestatte eine Einstellung der Spannung von 0 bis auf den vollen Betrag, der Verstärker habe eine Verstärkung von 1000, der Motor habe bei einer Steuerspannung von 10 V eine Drehzahl von 500 $\frac{U}{min}$, das Getriebe habe eine Untersetzung von 1 : 100 und verstelle über eine Spindel mit der Steigung 4 mm den Weg y.

Unter Annahme linearer Verhältnisse ist der Zusammenhang zwischen x und y aufzustellen.

Ü5.4. Ein starr gegengekoppelter elektronischer Verstärker ohne Verzögerung soll als gegengekoppeltes Gesamtsystem Verstärkungen von 1 bis 100 einzustellen gestatten. Es wird an einem elektronischen Energieschalter mit $K_V = 2000$ eine starre Gegenkopplung angebracht, die eine Linearisierung der Verstärkerkennlinie bewirkt.

a) In welchem Bereich muß der Übertragungsfaktor der Rückführung einstellbar sein?

b) Mit wieviel Prozent wirkt sich bei Gesamtverstärkung gleich 1 eine 10%ige Änderung der Energieschalterverstärkung auf die Verstärkung des gegengekoppelten Systems aus?

c) Mit wieviel Prozent wirkt sich bei Gesamtverstärkung gleich 100 eine 10%ige Änderung der Energieschalterverstärkung auf die Verstärkung des gegengekoppelten Systems aus?

Ü5.5. Von den Bauelementen der elektrischen Rückführungen nach Tabelle 16 mögen folgende Zahlenwerte angenommen werden:
Induktiver Geber: Zu einer Winkelverstellung von 10° gehöre eine Spannungsverstellung von 5 V.
Motor und Getriebe: Der Motor habe bei einer Steuerspannung von 10 V eine Drehzahl von 50 $\frac{U}{min}$, das Getriebe habe eine Untersetzung von 1 : 1000.

a) Wie lauten unter Annahme linearer Verhältnisse die Gleichungen der starren, der nachgebenden und der verzögerten Rückführung?

Ü5.6. Für die nachgebende und für die verzögerte hydraulische Rückführung nach Tabelle 16 mögen folgende Zahlenwerte angenommen werden:
Federkonstante $c = \frac{0{,}5\ kp}{mm}$, Kolbenfläche $A = 50\ cm^2$.
Die Umgehungsdrossel möge von ganz zu bis zu einem Durchfluß von 6 l pro Minute und pro at Druckdifferenz einstellbar sein. In welchen Grenzen sind dann unter Annahme linearer Verhältnisse die Zeitkonstanten einstellbar?

6. Regelkreise

6.1. Allgemeines

Nach den Ausführungen über Regelstrecken und Regeleinrichtungen soll nun deren Zusammenwirken im Regelkreis betrachtet werden. Die Bezeichnung der Regelkreise richtet sich nach der verwendeten Regeleinrichtung: Zweipunktregelkreis, P-Regelkreis, I-Regelkreis usw. Grundsätzlich sind unstetige, stetig-ähnliche und stetige Regelkreise zu unterscheiden. Kennzeichen der unstetigen Regelkreise ist die unstetige, sprunghafte Betätigung der Stellgröße auf wenige diskrete Werte und die damit verbundene zyklische Schwankung der Regelgröße. Kennzeichen der stetigen Regelkreise ist die stetige Betätigung der Stellgröße auf jeden möglichen Wert und die damit verbundene stabile Einstellung der Regelgröße. Stetig-ähnliche Regelkreise sind im Prinzip unstetig arbeitende Regelkreise (großer gerätemäßiger Vorteil der einfachen Energieverstärkung in der Regeleinrichtung), die durch Rückführungen und andere Maßnahmen in ihrer Wirkung der Wirkung stetiger Regelkreise (stabile Einstellung der Regelgröße) ähnlich sind und die in der Regelgüte bei bestimmten Regelstrecken (Totzeit z.B.) den stetigen Regelkreisen überlegen sind.

Neben der Unterscheidung nach dem Zeitverhalten der verwendeten Regeleinrichtung werden die Regelkreise nach der Veränderlichkeit der Führungsgröße unterschieden.

Bezeichnung	Kennzeichen
Festwertregelung	Die Führungsgröße (Sollwert) ist konstant.
Folgeregelung	Die Führungsgröße ist eine vorgegebene Funktion einer oder mehrerer Größen (außer der Zeit).
Zeitplanregelung	Die Führungsgröße ist eine vorgegebene Zeitfunktion.

Weiter können die Regelkreise durch Aufschaltung von Hilfsgrößen vermascht sein.

Bezeichnung	Kennzeichen
Störgrößenaufschaltung	Die im Sinne einer Steuerung aufgeschaltete Störgröße löst eine Stellgrößenänderung aus, ohne erst eine Änderung der Regelgröße abzuwarten.
Hilfsregelgrößenaufschaltung	Neben der auf eine Stellgrößenänderung nur sehr verzögert reagierenden Regelgröße wird der Regeleinrichtung noch eine weniger verzögerte Hilfsregelgröße aus der Strecke gemeldet.
Hilfsstellgrößenaufschaltung	Neben der aus verfahrenstechnischen Gründen notwendigen, aber regelungsdynamisch ungünstigen Stellgröße wird von der Regeleinrichtung noch eine regelungsdynamisch günstige Hilfsstellgröße vorübergehend betätigt.

Durch Kombinationen der genannten Möglichkeiten (z.B. Hilfsregelkreis unstetig, Hauptregelkreis als I-Kreis, dessen Führungsgröße von einer anderen Größe verstellt wird, proportionale Aufschaltung der wichtigsten Störgröße usw.) gibt es eine Vielzahl von teils recht komplizierten Regelkreisen, deren dynamisches Verhalten schwer zu erfassen ist, oft am günstigsten durch eine Nachbildung an Modellregelkreisen. Ziel aller Bemühungen bei Regelkreisen ist:

1. ein gutes Störverhalten, d.h. auftretende Störgrößen sollen in ihrer Wirkung auf die Regelgröße durch einen Stelleingriff möglichst schnell und möglichst vollständig kompensiert werden.
2. ein gutes Führungsverhalten, d.h. ein Führungsbefehl soll möglichst schnell und möglichst vollständig befolgt werden.

Um diese Forderungen zahlenmäßig exakt formulieren zu können, sind Kennwerte geschaffen worden (Bild 82).

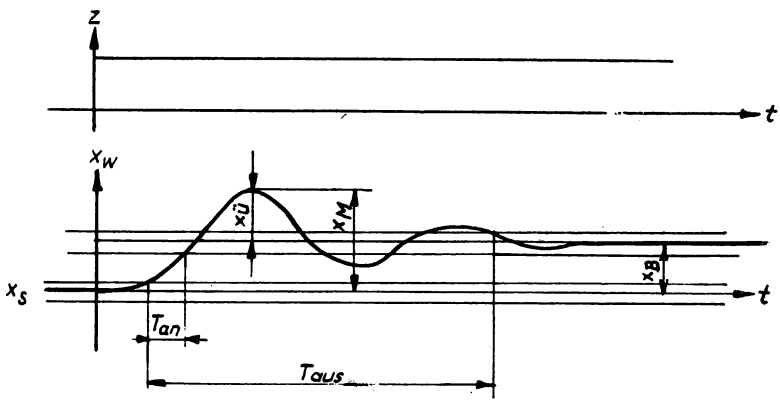


Bild 82

Die Regelabweichung x_w ist die Abweichung des Istwertes der Regelgröße x vom Istwert der Führungsgröße w ($x_w = x - w$). Bei Festwertregelungen ist daher die Regelabweichung die Abweichung des Istwertes der Regelgröße von ihrem Sollwert.
Die bleibende Regelabweichung x_B ist die im Beharrungszustand der Regelgröße vorhandene Regelabweichung.
Die maximale Regelabweichung x_M ist der größte Wert von x_w, der während eines Regelvorganges auftritt.

Die Überschwingweite $x_ü$ ist das Maximum der Differenz zwischen Regelabweichung x_w und bleibender Regelabweichung x_B, das auf den ersten Vorzeichenwechsel dieser Differenz folgt.
Bei sprungförmiger Änderung der Führungsgröße ist die Überschwingweite die Differenz zwischen Maximalwert und Beharrungswert der Regelgröße. Die Überschwingweite wird bezogen auf die Differenz zwischen Anfangs- und Beharrungswert der Regelgröße und ist in Prozent anzugeben.
Maximale Regelabweichung und Überschwingweite sind von Betrag, Zeitverlauf und Angriffsstelle der Stör- und Führungsgrößenänderung abhängig.

Die Ausregelzeit T_{aus} ist diejenige Zeitspanne, die beginnt, wenn die Regelgröße nach einem Stör- oder Führungsgrößensprung ein vereinbartes Toleranzband um die Führungsgröße verläßt, und die endet, wenn sie in dieses Toleranzband zum dauernden Verbleib wieder eintritt.

Die Anregelzeit T_{an} ist diejenige Zeitspanne, die beginnt, wenn die Regelgröße nach einem Stör- oder Führungsgrößensprung ein vereinbartes Toleranzband um die Führungsgröße verläßt, und die endet, wenn sie in dieses Toleranzband erstmalig wieder eintritt.
In Bild 82 sind diese Begriffe für einen Störgrößensprung verdeutlicht.
Von einer guten Regelung fordert man also:

1. Bleibende Regelabweichung x_B möglichst null.
2. Maximale Regelabweichung x_M möglichst klein.
3. Ausregelzeit T_{aus} möglichst klein.
4. Anregelzeit T_{an} möglichst klein.

Dabei soll der gerätemäßige Aufwand möglichst klein sein.
Die Forderungen widersprechen einander teils, so daß immer ein vernüftiger Kompromiß geschlossen werden muß. Dabei ist der Begriff "gute Regelung" relativ und enthält je nach Aufgabenstellung verschiedene erstrangig zu erfüllende Forderungen.

Beispiele:

Forderungen für Temperaturregelung in Kühlschränken: Billig, einfach, robust, Schwankungen der Temperatur um einige grd sind zulässig, Ausregelzeit kann für maximale Störung (Abkühlen von Raumtemperatur) 1 bis 2 Stunden betragen.
Forderungen für Lageregelung an Werkzeugmaschinen: Keine bleibende Regelabweichung, Ausregelzeit (je nach Maschinentyp) entsprechend klein, keine Überschwingung über den einzustellenden Wert, robuster Aufbau usw.
Forderungen für Schwundregelung in Radios: Ausregelzeit sehr klein, bleibende Regelabweichung zulässig usw.

Die Erfüllung der Forderungen an eine Regelung ist möglich durch:

1. Wahl der Struktur der Regelung (einschleifiger Regelkreis, vermaschter Regelkreis, Art der Vermaschung usw.)
2. Wahl des Zeitverhaltens der einzelnen Glieder (P, I, Zweipunkt usw.)
3. Einstellung der Kennwerte der einzelnen Glieder (Übertragungsfaktor, Integralzeit, Differentialzeit, Schaltsprung bei Zweipunktreglern usw.)

Man sieht, daß es eine Fülle von Problemen gibt. Im Folgenden sollen einige grundlegend wichtige Dinge behandelt werden.

6.2. Zweipunktregelkreise

6.2.1. Charakterisierung der Regelstrecke

Da der Zweipunktregler nur $y = o$ oder $y = Y_h$ einstellt, interessiert hier das Verhalten der Strecke nur für diese beiden Werte der Stellgröße. Außer der Stellgröße wirken natürlich Störgrößen auf die Regelstrecke. Ihretwegen wird eine Regelung ja überhaupt erst nötig. Bei den folgenden Überlegungen zur Ableitung von Faust-Formeln für Zweipunktregelungen seien die Störgrößen als konstant gleich Null angenommen. Auch bei $z = o$ führt ein Zweipunktregelkreis ja die für ihn typischen Ein- Aus- Schaltungen durch (Man denke an einen normal ausgelasteten Kühlschrank!). Diese Pendelbewegungen sollen u.a. nach Amplitude und Frequenz abgeschätzt werden.
$z = o$ bedeutet: mittlere konstante Störung. Im wirklichen Betriebsfall kommen positive z (die x größer als x_s machen wollen) und negative z (die x kleiner als x_s machen wollen) vor. Die wirklichen Pendelbewegungen liegen also rechts und links der Pendelbewegungen für $z = o$ und weichen mehr oder weniger von ihnen ab. Die im Folgenden angegebenen Beziehungen stellen Faustformeln für eine angenäherte Abschätzung der bei Zweipunktregelkreisen auftretenden Pendelbewegungen der Regelgröße dar.

Strecke ohne Ausgleich

Beispiel: Behälterstand (Bild 83)

Regelgröße x = Flüssigkeitsstand
Stellgröße y = Zulauf
Störgröße z = unterschiedliche Entnahme durch eine Pumpe

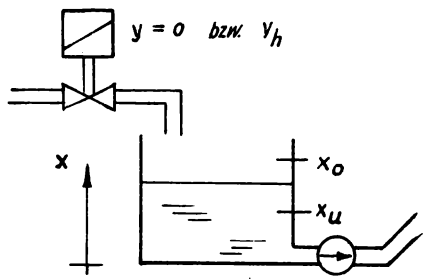


Bild 83

z = o bedeute: mittlere Entnahme, die durch $y = \frac{1}{2} \cdot Y_h$ gerade gedeckt würde. $y = \frac{1}{2} \cdot Y_h$ kann der Zweipunktregler aber nicht einstellen. Das sich ergebende Regelspiel kann man sich nun leicht anschaulich klarmachen. Man denke an einen Hochwasserbehälter mit oberem und unterem Grenzkontakt. Stellgröße: Ein-Aus-Schalten der Brunnenpumpe, Störgröße: unterschiedliche Entnahme. Für z = o (im Beispiel mittlere Entnahme), für $z = z_{max}$ (positiv) (im Beispiel keine Entnahme) und für $z = z_{min}$ (negativ) (im Beispiel Entnahme gleich maximalem Zufluß) wird das Verhalten von Strecken ohne Ausgleich durch die in Bild 84 angegebenen Sprungantworten charakterisiert. Das reale Verhalten von Strecken ohne Ausgleich bei beliebigen Störgrößen liegt zwischen den gestrichelt gezeichneten Sprungantworten, die im allgemeinen noch Totzeit und Verzugszeit haben werden. z_{max} und z_{min} müssen betragsmäßig nicht einander gleich sein. Kurz und gut: z = o gibt den symmetrischen Mittelfall an mit $\dot{x} = \frac{1}{2} K_{IS} Y_h$ für $y = Y_h$ und $\dot{x} = -\frac{1}{2} K_{IS} Y_h$ für y = o .

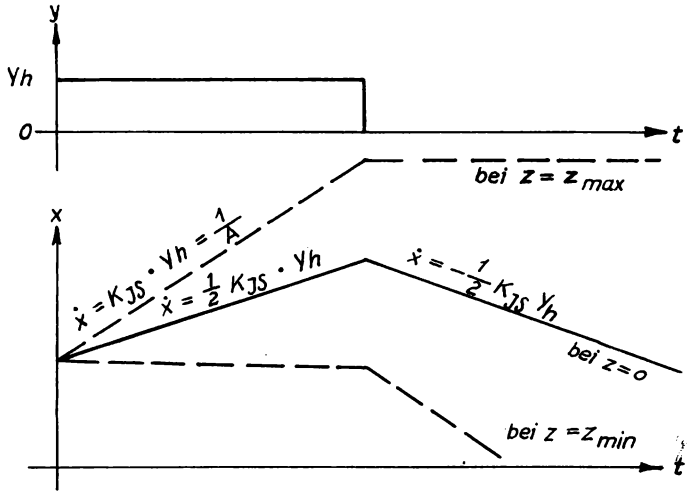


Bild 84

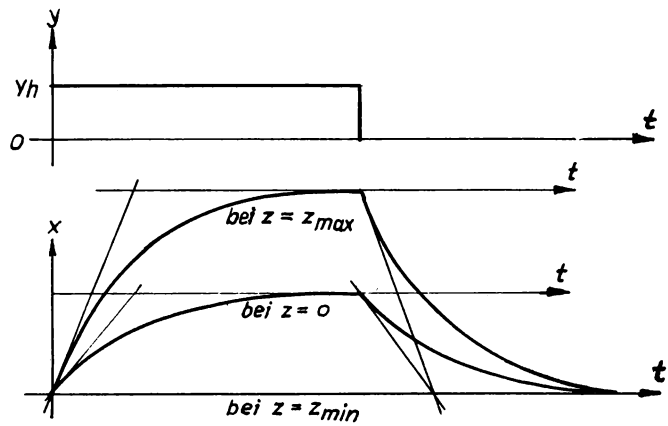


Bild 85

Mit der Definition des Anlaufwertes $A = \frac{1}{(\frac{dx}{dt})_{max}}$ lassen sich diese Steigungen entsprechend anders schreiben.
Die für z = o abzuleitenden Formeln werden alle realen Betriebszustände näherungsweise beschreiben.

Strecken mit Ausgleich:

Beispiel: Reglerbügeleisen, Regelgröße x = Temperatur
Stellgröße y = Heizung (o bzw. Y_h)
Störgröße z = unterschiedliche Wärmeentnahme durch verschiedene (nasse, trockene, kalte usw.) Stoffe.

z = o bedeute: mittlere Wärmeentnahme, die durch $y = \frac{1}{2} Y_h$ gerade gedeckt würde. $y = \frac{1}{2} Y_h$ kann der Zweipunktregler aber nicht einstellen. Es ergibt sich das bekannte zyklische Ein-Aus-Schalten.
Für z = o (im Beispiel mittlere Wärmeentnahme), für $z = z_{max}$ (positiv) (im Beispiel unbenutztes Bügeleisen) und für $z = z_{min}$ (negativ) (im Beispiel Bügeln von feuchtem kaltem Stoff) wird das Verhalten von Strecken mit Ausgleich durch die in Bild 85 angegebenen Sprungantworten charakterisiert. Das reale Verhalten von Strecken mit Ausgleich bei beliebiger Störgrößen liegt rechts und links vom Mittelfall z = o.
Im allgemeinen werden die Sprungantworten noch Totzeit und Verzugszeit haben.

6.2.2. Zweipunktregler an Strecken ohne Ausgleich

Bild 86 zeigt die idealisierte Pendelbewegung der Regelgröße eines aus einem Zweipunktregler mit Schaltdifferenz und einer Strecke ohne Ausgleich mit Totzeit bestehenden Regelkreises. Erreicht die Regelgröße den oberen Schaltpunkt x_{ob}, so schaltet der Zweipunktregler die Stellgröße von Y_h auf o. Die Regelgröße steigt aber für die Dauer der Totzeit noch an. Erst dann fällt sie - wie wir für den Fall z = o annehmen - mit der betragsmäßig gleichen Geschwindigkeit, mit der sie angestiegen ist. Erreicht die Regelgröße den unteren Schaltpunkt x_{un}, so schaltet der Zweipunktregler die Stellgröße von o auf Y_h.

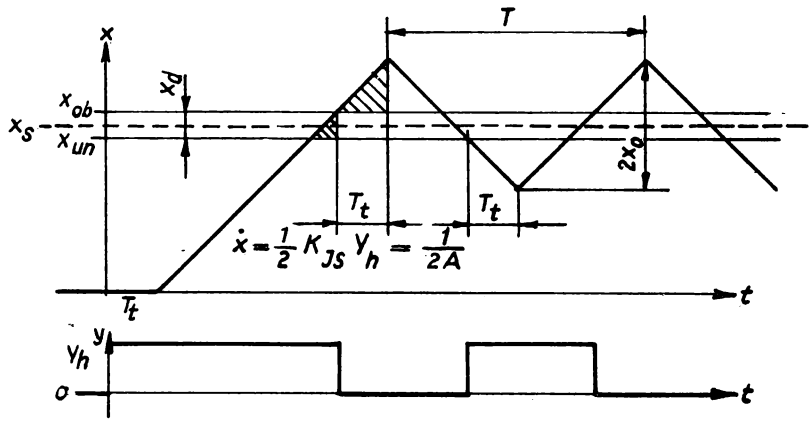


Bild 86

Die Regelgröße fällt aber für die Dauer der Totzeit noch ab. Erst dann steigt sie wieder an und der beschriebene Zyklus wiederholt sich.

Da die Steigung der idealisierten eckigen Pendelkurve bekannt ist, lassen sich über die beiden schraffiert gezeichneten Dreiecke mit $\dot{x} = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}}$ leicht die folgenden Beziehungen für die Schwingungsdauer T und für die Amplitude x_o der Pendelbewegung finden.

$$T = 4\,T_t + 2 \cdot \frac{x_d}{\frac{1}{2} K_{IS} Y_h} = 4\,T_t + 4\,\frac{x_d}{K_{IS} Y_h}$$

$$2\,x_o = 2 \cdot \frac{1}{2} K_{IS}\, Y_h\, T_t + x_d$$

Mit dem Anlaufwert $A = \frac{1}{K_{IS}\, T_h}$ geschrieben lauten die Beziehungen

$T = 4\, T_t + 4\, A\, x_d$
$x_o = \frac{T_t}{2\, A} + \frac{1}{2}\, x_d$

Sie gelten für den der Ableitung zugrunde liegenden Sondermittelfall z = o bei einer Strecke ohne Ausgleich mit Totzeit ohne Verzugszeit. Die real vorkommenden Vorgänge ergeben verrundete Kurven, die um die skizzierte eckige Kurve streuen.

Die abgeleiteten Beziehungen gestatten eine Abschätzung der bei Zweipunktregelungen an Strecken ohne Ausgleich auftretenden Pendelbewegung der Regelgröße.

Zahlenbeispiel:

Oberer und unterer Grenzkontakt eines zylindrischen Flüssigkeitsbehälters von 2 m^2 Querschnitt mögen 50 cm auseinander liegen. Zur Standhaltung im Behälter schaltet ein Zweipunktregler eine Zuförderpumpe (Förderleistung 10 m^3/h) aus bzw. ein. Die Normalentnahme betrage 5 m^3/h. Nach Einschalten der Zuförderpumpe vergehen 10 s bis sich der Flüssigkeitsstand zu ändern beginnt.
Welche Standschwankungen ergeben sich?
Wievielmal wird die Zuförderpumpe pro Stunde ein- und ausgeschaltet?

Lösung: $x_d = 50$ cm , $T_t = 10$ s ,

$$K_{IS} T_h = \frac{10\ m^3/h}{2\ m^2} = 5\ \frac{m}{h} \quad , \quad A = 0{,}2\ \frac{h}{m}$$

Also ist:

$$x_o = \frac{10\ s}{2 \cdot 0{,}2\ h/m} + \frac{1}{2}\ 50\ cm = 0{,}7\ cm + 25\ cm \approx 26\ cm$$

$$x_o \approx 26\ cm$$

$$T = 4 \cdot 10\ s + 4 \cdot 0{,}2\ h/m \cdot 50\ cm \approx 25\ min$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{25\ min} \approx 2{,}4\ \frac{1}{h}$$

Ergebnis: Der Flüssigkeitsstand schwankt um ungefähr $\pm$ 26 cm und die Zuförderpumpe wird pro Stunde etwa 2,4 mal ein und ebensovielmal ausgeschaltet.

6.2.3. Zweipunktregler an Strecken mit Ausgleich

Damit ein Zweipunktregler an einer Strecke mit Ausgleich allen möglichen Störungen begegnen kann, müssen seine beiden Stellwerte o und Y_h entsprechend gewählt werden. Um Störungen nach der einen wie nach der anderen Seite gleichermaßen gut begegnen zu können, muß der Sollwert etwa in der Mitte des Regelgrößenbereiches Δx liegen. Der Bereich Δx wird bei $z = o$ (Normalbetrieb) von $x_{stationär}$ für $y = o$ und $x_{stationär}$ für $y = Y_h$ begrenzt. Δx ist also bei $z = o$ (Normalbetrieb) der Unterschied zwischen dem Wert der Regelgröße, den bei einer Strecke mit Ausgleich ein dauernd geöffnetes Stellglied zur Folge hat und dem Wert, den ein dauernd geschlossenes Stellglied zur Folge hat. Bild 87 zeigt die idealisierte Pendelbewegung der Regelgröße eines aus einem Zweipunktregler mit

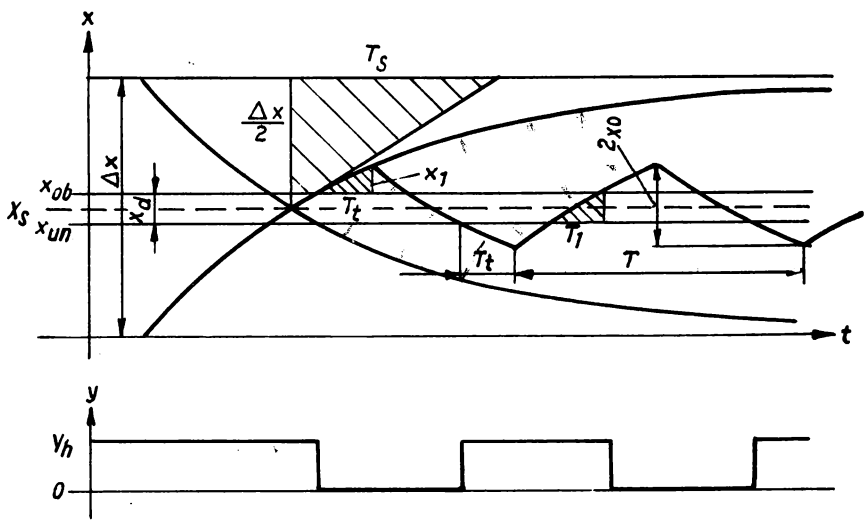


Bild 87

Schaltdifferenz und einer Strecke mit Ausgleich (angenähert durch Totzeit und Verzögerung 1. Ordnung) bestehenden Regelkreises für den Fall, daß der Sollwert x_s in der Mitte des Bereiches Δx liegt. Die Teile der e-Funktion kann man um den Sollwert gut durch Geradenstücke annähern. Da die Steigungen dieser ansteigenden und abfallenden Geradenstücke betragsmäßig einander gleich sind, kann man einfache Faustformeln für die Amplitude x_o und für die Schwingungsdauer T der Pendelbewegung finden. Jede Tangente an die PT_1-Sprungantwort begrenzt vom Punkt der Sprungantwort bis zum Schnittpunkt mit der Ausgleichsgeraden die Zeitkonstante T_S des PT_1-Überganges. Die beiden schraffierten, aneinander liegenden Dreiecke sind einander ähnlich. Es gilt also

$$\frac{x_1}{T_t} = \frac{\frac{\Delta x}{2}}{T_S} \quad \text{und mit} \quad 2\,x_o = 2\,x_1 + x_d \quad \text{ist}$$

$$\boxed{x_o = \frac{T_t}{2\,T_S}\,\Delta x + \frac{1}{2}\,x_d}$$

Weiter ist aus Bild 87 leicht abzulesen $T = 4\,T_t + 2\,T_1$. Das einzelne, schraffierte Dreieck von Bild 87 ist den beiden anderen schraffierten Dreiecken ähnlich. Es gilt also

$$\frac{T_1}{x_d} = \frac{T_S}{\frac{\Delta x}{2}}$$

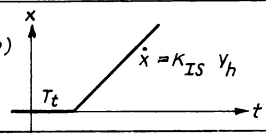
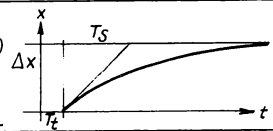
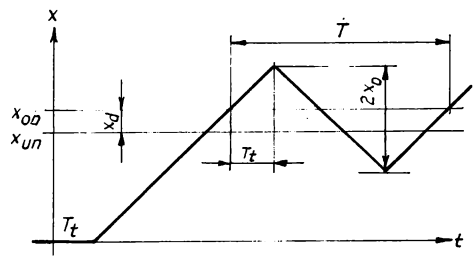
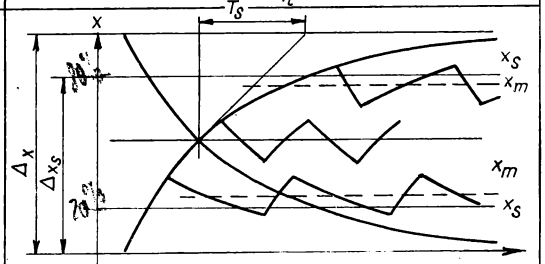
Damit ist

$$\boxed{T = 4\,T_t + 4\,\frac{x_d}{\Delta x}\,T_S}$$

Diese für einen Sonderfall abgeleiteten Beziehungen gestatten eine näherungsweise Abschätzung der bei Zweipunktregelungen an Strecken mit Ausgleich auftretenden Pendelbewegung der Regelgröße, auch wenn der Sollwert nicht in der Mitte des Bereiches Δx liegt und z nicht gleich Null ist.

Die real vorkommenden Vorgänge ergeben verrundete Kurven, die um die skizzierte eckige Kurve streuen. Liegt der Sollwert nicht

Tabelle 17

Zweipunktregler	
an Strecken ohne Ausgleich	*an Strecken mit Ausgleich*
Eingang = Stellglied bei z = o (Normalbetrieb) von ganz zu nach ganz auf verstellt. 	*Eingang = Stellglied bei z = o (Normalbetrieb) von ganz zu nach ganz auf verstellt* 
	
x_d = *Schaltdifferenz, Unterschied zwischen Ein- und Ausschaltwert der Regelgröße*	x_S = *Sollwert*, x_m = *Mittelwert der Pendelbewegung*, Δx *ist bei z = o (Normalbetrieb) der Unterschied zwischen dem Wert der Regelgröße, den bei einer Strecke mit Ausgleich ein dauernd geöffnetes Stellglied zur Folge hat und dem Wert, den ein dauernd geschlossenes Stellglied zur Folge hat.* *Entsprechend:* Δx_S = *Sollwert minus Wert der Regelgröße für Stellglied ganz zu.*
$x_o = \frac{T_t}{2A} + \frac{1}{2} x_d \qquad T = 4\,T_t + 4\,A\,x_d$	$x_o = \frac{T_t}{2T_S}\,\Delta x + \frac{1}{2} x_d \qquad T = 4\,T_t + 4\,\frac{x_d}{\Delta x} \cdot T_S$ $x_s - x_m = \left(\frac{\Delta x_S}{\Delta x} - \frac{1}{2}\right) \frac{T_t}{T_S}\,\Delta x$

in der Mitte des Bereiches Δx, so ist der Sollwert nicht mehr der Mittelwert der Pendelbewegung. Aus dem entsprechenden Bild der Tabelle 17 ist das ersichtlich. Es tritt eine bleibende Regelabweichung auf, die von der Sollwertlage und von den Störgrößen abhängig ist. Von den Störgrößen ist sie abhängig, weil die Störgrößen den Bereich Δx ändern und damit bei festem x_s die Lage von x_s im Bereich Δx. Die Tabelle 17 gibt eine Zusammenfassung und Übersicht der für Zweipunktregelungen wichtigen Kurven und Faustformeln. Es ist auch ohne Ableitung angegeben, wie man den Unterschied zwischen Sollwert und Mittelwert der Pendelbewegung näherungsweise berechnen kann. Um eine einwandfreie Regelung zu gewährleisten, darf der Sollwert in den Bereich von 20 % bis 80 % von Δx gelegt werden.

Zahlenbeispiel:

Die Temperatur in einem Glühofen soll durch einen Fallbügelregler mit einem Meßbereich von 0 bis 1000 °C auf dem Wert x_s = 800 °C gehalten werden. Die Schaltdifferenz des Reglers wurde vom Hersteller mit 0,5 % der Skalenlänge angegeben. Die Aufnahme der Sprungantwort des Ofens ergab bei Dauereinschaltung der vom Regler zu betätigenden Heizung eine Endtemperatur von 1200 °C, die sich mit T_t = 2 min und T_S = 30 min einstellte. Die Erhöhung der Totzeit durch die Tastzeit des Fallbügelreglers sei vernachlässigbar.

a) Mit welchen Schwankungen der Temperatur ist bei der Regelung zu rechnen?
b) Wie groß ist die Periodendauer?
c) Wieviel und nach welcher Richtung weicht der Mittelwert der Pendelbewegung vom Sollwert ab?

Lösung: Δx = 1200 °C − 20 °C = 1180 grd

Δx_s = 800 °C − 20 °C = 780 grd

x_d = 0,5 % · 1000 grd = 5 grd

a) $x_o = \frac{2}{2 \cdot 30}\ 1180\ \text{grd} + \frac{1}{2}\ 5\ \text{grd} = 39{,}3\ \text{grd} + 2{,}5\ \text{grd}$

$x_o = 41{,}8\ \text{grd}$

b) $T = 4.2\ \text{min} + 4 \cdot \frac{5}{1180}\ 30\ \text{min} = 8\ \text{min} + 0{,}5\ \text{min}$

$T = 8{,}5\ \text{min}$

c) $x_s - x_m = (\frac{780}{1180} - \frac{1}{2})\ \frac{2}{30}\ 1180\ \text{grd} = 12{,}6\ \text{grd}$

$x_m = x_s - 12{,}6\ \text{grd} = 800\ ^{\circ}\text{C} - 12{,}6\ \text{grd} = 787{,}4\ ^{\circ}\text{C}.$

6.2.4. Maßnahmen zum Verkleinern der Schwankungsbreite

Häufig ist bei Regelungen das Pendeln der Regelgröße im Rahmen der Aufgabenstellung zulässig, so daß der einfache, billige Zweipunktregler verwendet wird. Wodurch die Amplitude der Pendelbewegung klein gemacht werden kann, ist aus den Faustformeln der Tabelle 17 ersichtlich.

1. Verringern der Schaltdifferenz x_d:
   Einfluß meist sowieso gering, konstruktive Maßnahmen am Regler können gewisse Verbesserung bringen, allerdings steigt die Schaltfrequenz, was im Interesse der Lebensdauer der Schaltkontakte nicht immer erwünscht ist.

2. Verkleinern der Totzeit T_t:
   Die Totzeit ist meist durch die Technologie des zu regelnden Prozesses vorgegeben. Verkleinerung durch verzögerungsarme Meßfühler und günstigen Einbau der Meßfühler möglich.
   $T_t = o$ und kleines x_d ergeben sehr große Schaltfrequenzen.

3. Vergrößern der Zeitkonstante T_S:
   Die Zeitkonstante ist meist durch die Technologie des zu regelnden Prozesses vorgegeben. Träge Strecken geben aber auf jeden Fall bessere Zweipunktregelergebnisse als schnelle Strecken. Auf das Verhältnis $T_S : T_t$ kommt es an.

4. Verkleinern von Δx:
   Wird häufig angewendet, bringt wesentliche Verbesserung. Aufteilung: Grundlast und Regellast. Grundlast bleibt

dauernd eingeschaltet. Regler schaltet nur Regellast. Δx muß nur so groß sein, daß allen möglichen Störungen begegnet werden kann.
Beispiel: Temperaturregelung. Sollwert 800 °C. Grundheizung hält dauernd eingeschaltet etwa 600 °C. Regellast würde dauernd eingeschaltet einen Temperaturanstieg auf 1000 °C bewirken. Dann ist $\Delta x = 400$ grd. Würde der Regler die Gesamtheizung schalten, wäre $\Delta x = 1000\ ^{\circ}C - 20\ ^{\circ}C$.

6.3. Zweilaufregelkreise

Der Zweipunktregler kann nur zwei diskrete Werte der Stellgröße (o und Y_h) einstellen. Dadurch ergibt sich die für Zweipunktregelkreise typische Pendelbewegung der Regelgröße. Der Zweilaufregler kann die Stellgröße nur mit 3 diskreten Geschwindigkeiten (voller Rechtslauf, Stillstand, voller Linkslauf) verstellen. Es ist aber innerhalb des Stellbereiches jeder beliebige Wert der Stellgröße möglich und damit kann sich die Regelgröße auf einen Beharrungswert einstellen. Diese stabile Arbeitsweise ist wünschenswert. Der Zweilaufregler besteht aus einem Dreipunktschalter mit dem Ansprechwert a und einem I-Glied mit der Stellgeschwindigkeit $v = \dot{y}$. Als I-Glieder werden meist die robusten und billigen Drehstromkurzschlußläufermotoren verwendet. Die Stellgeschwindigkeit für Rechtslauf sei gleich der Stellgeschwindigkeit für Linkslauf. Durch das Untersetzungsgetriebe ist die Stellgeschwindigkeit v einstellbar. Meist wird von Motor und Getriebe der Stellbereich Y_h und die Stellzeit T_y angegeben. Es besteht der Zusammenhang $v = Y_h : T_y$. Der Ansprechwert a ist im allgemeinen einstellbar (Man denke an einen Fallbügelregler mit unterem und oberem Grenzkontakt). Der Zweilaufregler ist ein I-ähnlicher Regler. Er kann, das wird später noch gezeigt, an I-Strecken nicht verwendet werden.
Bild 88 gibt das Blockschaltbild eines Zweilaufregelkreises mit einer P-Strecke und die auftretenden Kenndaten an. Um ein stabiles Arbeiten des Regelkreises zu gewährleisten, dürfen a nicht zu klein und v nicht zu groß sein. Wie klein a und wie groß v sein dürfen, richtet sich nach den Streckenkennwerten.

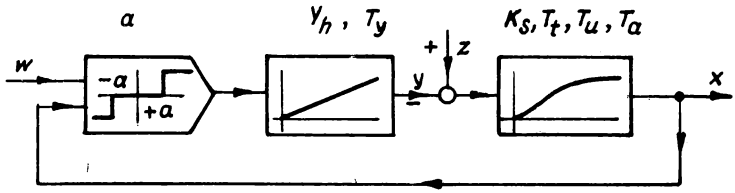


Bild 88

Ansprechwert a klein

Vorteil: große statische Genauigkeit

Nachteil: Die Regelung beruhigt sich langsam oder gar nicht.
Für a = o würde das Stellglied dauernd entweder in Richtung auf oder in Richtung zu betätigt, es käme nicht zur Ruhe, der Kreis wäre instabil.

Stellgeschwindigkeit v groß

Vorteil: kleine Anregelzeit

Nachteil: möglicherweise große Ausregelzeit oder gar instabiles Arbeiten.

Stabiles Arbeiten des Kreises ist durch großen Ansprechwert und durch kleine Stellgeschwindigkeit immer zu erreichen. Das geht aber auf Kosten der statischen Genauigkeit und der Ausregelzeit.
Für die Stabilitätsgrenze gilt näherungsweise:

$$\left(\frac{v}{a}\right)_{krit.} \approx \begin{cases} \dfrac{2}{K_S(T_t+T_u)} & \text{für } \dfrac{T_a}{T_t+T_u} \approx 20 \\ \dfrac{1}{K_S(T_t+T_u)} & \text{für } \dfrac{T_a}{T_t+T_u} \approx 10 \end{cases}$$

Ein für die meisten Regelungsaufgaben guter Kompromiß zwischen guter statischer Genauigkeit und kleiner Ausregelzeit kommt da-

durch zustande, daß man $(\frac{v}{a}) = \frac{1}{2}\,(\frac{v}{a})_{krit.}$ einstellt.

Das ist für a = konstant durch $v = \frac{1}{2}\,v_{krit}$ und für

v = konstant durch $a = 2\,a_{krit.}$ möglich. Also:

Einstellregeln (Faustformeln) für Zweilaufregelkreise:

$$\frac{v}{a} = \begin{cases} \dfrac{1}{K_S(T_t+T_u)} & \text{für } \dfrac{T_a}{T_t+T_u} \approx 20 \\ \dfrac{1}{2K_S(T_t+T_u)} & \text{für } \dfrac{T_a}{T_t+T_u} \approx 10 \end{cases}$$

Zahlenbeispiel:

Die Temperatur eines elektrisch beheizten Ofens mit $K_S = 200\ \frac{grd}{kW}$, $T_t + T_u = 15$ s und $T_a = 6$ min soll mittels Zweilaufregler geregelt werden. Das Stellglied habe einen Stellbereich von 4 kW. Die Temperatur soll auf $\pm$ 5 grd konstant gehalten werden, d. h. der Ansprechwert des zu verwendenden Dreipunktschalters betrage 5 grd.
Welche Stellzeit muß der Regler bei optimaler Einstellung haben?

Lösung:

$\frac{T_a}{T_t+T_u} = \frac{6\text{ min}}{15\text{ s}} = 24$, also gilt die Beziehung $\frac{v}{a} = \frac{1}{K_S(T_t+T_u)}$

Daraus folgt mit $v = \frac{Y_h}{T_y}$

$$T_y = K_S\,(T_t+T_u)\,\frac{Y_h}{a} = \frac{200\ grd}{kW}\ 15\text{ s}\ \frac{4\ kW}{5\ grd} = 40\text{ min}$$

6.4. P-Regelkreise

6.4.1. Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert

Aus der Handlungsgleichung der P-Regeleinrichtung $y = K_R x_w$ ist zu ersehen, daß eine Stellgrößenabweichung y nur bei einer Regel-

abweichung x_w zustande kommt. Im stationären Zustand hat also der P-Regelkreis bei vorhandenen Störgrößen eine bleibende Regelabweichung. Zu jedem x_w wird sofort ein y verstellt (Die meist relativ zu den Streckenverzögerungen geringen Verzögerungen der Regeleinrichtung können oft vernachlässigt werden). Die P-Regeleinrichtung arbeitet also schnell, aber ungenau. Bei großem Übertragungsfaktor K_R gehört ($y = K_R x_w$) zu einer bestimmten Regelabweichung x_w bereits eine große Stellabweichung y ; es wird "hart" eingegriffen. Dieser starke Eingriff könnte zuviel des Guten sein, so daß als Folge davon nach Ablauf der Streckenverzögerung eine Regelabweichung nach der anderen Seite auftritt, diese würde durch den nunmehr erfolgenden Eingriff in der anderen Richtung wieder in ihr Gegenteil verkehrt usw., der Regelkreis wäre instabil. Zu kleines K_R hätte dagegen, weil zu einem zur Kompensierung einer Störgröße nötigem y dann ein größeres x_w gehören würde ($y = K_R x_w$), eine größere bleibende Regelabweichung zur Folge. Es muß also eine zwischen den Extremen liegende günstige Einstellung von K_R geben.

K_R nicht zu groß einstellen, weil der Kreis sonst instabil
(Instabil, wenn $K_R \geq K_{Rkrit.}$)

K_R nicht zu klein einstellen, weil die bleibende Regelabweichung sonst zu groß.

6.4.2. Beschreibende Gleichung

6.4.2.1. P-Regeleinrichtung an P-Strecke

Nach Bild 89 ist $y = K_R x_w$ (PT_0-Regler)

$T_S \dot{x} + x = K_S y_S$ (PT_1-Strecke)

$x_w = x - w$

$y_S = z - y$

Aus diesen Gleichungen der einzelnen Glieder läßt sich durch Eliminieren von x_w , y und y_S angeben, wie die Regelgröße x von

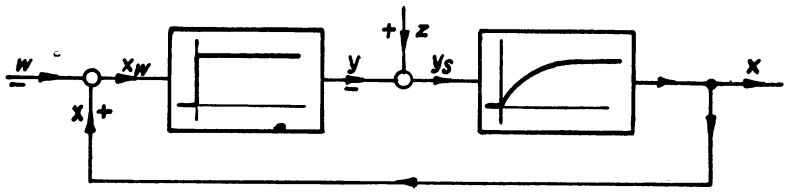


Bild 89

der Führungsgröße w und der Störgröße z abhängt.

$$T_S \dot{x} + x = K_S \left[z - K_R (x - w) \right]$$

$$T_S \dot{x} + (1 + K_S K_R)\, x = K_S\, z + K_S K_R\, w$$

$$\frac{T_S}{1 + K_S K_R}\, \dot{x} + x = \frac{K_S\, z + K_S K_R\, w}{1 + K_S K_R}$$

Bei Strecken mit höheren Verzögerungen würden noch höhere Ableitungen von x auftreten, die den Einschwingvorgang nach Veränderung von z (Störverhalten) bzw. w (Führungsverhalten) charakterisieren. Für den stationären Zustand (Änderungen, d.h. Ableitungen sind zu null geworden) gilt für $z = \text{konstant} = z_o$ und $w = \text{konstant} = w_o$

$$x_{stat.} = \frac{K_S\, z_o + K_S K_R\, w_o}{1 + K_S K_R}$$

Betrachtet man nur das Störverhalten ($w = o$), so ergibt sich die im stationären Zustand bleibende Regelabweichung zu

$$x_B = \frac{K_S\, z_o}{1 + K_S K_R}$$. Sie wird kleiner für größeres K_R.

Abweichung der Regelgröße vom Sollwert ohne Regelung: $x_{Bo} = K_S\, z_o$.

" " " " " mit P-Regeleinrichtung:

$$x_B = \frac{K_S\, z_o}{1 + K_S K_R}$$

$R = \frac{1}{1 + K_S K_R}$ heißt der statische Regelfaktor.

Betrachtet man nur das Führungsverhalten (z = o), so ergibt sich für den stationären Zustand

$$x_{stat.} = \frac{K_S K_R\, w}{1 + K_S K_R} = \frac{w}{1 + \frac{1}{K_S K_R}}$$

Bei größerem K_R wird also ein Führungsbefehl besser ausgeführt.
Die bleibende Abweichung ist:

$$x_B = x_{stat.} - w = \frac{K_S K_R\, w}{1 + K_S K_R} - w = \frac{-w}{1 + K_S K_R}$$

Zahlenbeispiel:

Drehzahlregelung an Motor mit $K_S = \frac{50\ \frac{U}{min}}{V}$ und $T_S = 0{,}1$ s.

Ohne Regelung treten Drehzahlschwankungen bis zu $\pm\ 100\ \frac{U}{min}$ auf.

a) Mit welchem Übertragungsfaktor muß ein P-Regler arbeiten, damit die Drehzahlschwankungen nur noch $\pm\ 10\ \frac{U}{min}$ betragen?

b) Wie lautet die den Regelvorgang beschreibende Gleichung bei sprungförmigem Auftreten einer Drehzahlabweichung von $100\ \frac{U}{min}$?

Lösung zu a): $K_S = \frac{50\ U}{min\ V}$, $K_S\, z_o = \pm\ 100\ \frac{U}{min}$, $z_o = 2$ V

Aus $x_B = \frac{K_S\, z_o}{1 + K_S K_R}$ folgt $K_R = \frac{K_S\, z_o - x_B}{K_S\, x_B} = \frac{z_o}{x_B} - \frac{1}{K_S}$,

also ist

$$K_R = \frac{2\ V}{10\ \frac{U}{min}} - \frac{min\ V}{50\ U} = \frac{9}{50}\ \frac{V}{U/min} = 0{,}18\ \frac{V}{U/min}$$

Lösung zu b): $0{,}1s\,\dot{x} + \left(1 + \frac{50\ U}{min\ V}\,\frac{9\ Vmin}{50\ U}\right) x = 100\ \frac{U}{min}$

$$0{,}1s\,\dot{x} + 10\,x = 100\ \frac{U}{min}$$

$$0{,}01s\,\dot{x} + x = 10\ \frac{U}{min}$$

Der auftretende Ausgleichsvorgang ist nach ungefähr $4 \cdot 0{,}01s = 0{,}04s$ beendet und es bleibt eine Drehzahlabweichung von $10\ \frac{U}{min}$.

6.4.2.2. P-Regeleinrichtung an I-Strecke

Nach Bild 90 ist

$$y = K_R\,x_w \qquad (PT_0\text{-Regler})$$

$$T_S\,\dot{x} + x = K_{IS}\int y_S\,dt \qquad (IT_1\text{-Strecke})$$

$$x_w = x - w$$

$$y_S = z - y$$

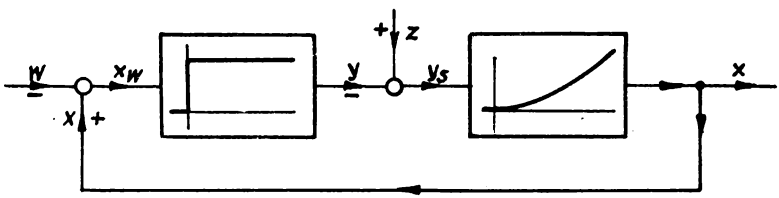


Bild 90

Aus diesen Gleichungen läßt sich durch Eliminieren von x_w, y und y_S angeben, wie die Regelgröße x von der Führungsgröße w und der Störgröße z abhängt.

$$T_S\,\ddot{x} + \dot{x} = K_{IS}\left[z - K_R\,(x - w)\right]$$

$$T_S\,\ddot{x} + \dot{x} + K_{IS}K_R\,x = K_{IS}\,z + K_{IS}K_R\,w$$

$$\frac{T_S}{K_{IS}K_R}\,\ddot{x} + \frac{1}{K_{IS}K_R}\,\dot{x} + x = \frac{z}{K_R} + w$$

Bei Strecken mit höheren Verzögerungen würden noch höhere Ableitungen auftreten, die den Einschwingvorgang nach Veränderung von z (Störverhalten) bzw. w (Führungsverhalten) charakterisieren. Für den stationären Zustand (Änderungen, d.h. Ableitungen sind zu null geworden) gilt für z = konstant = z_o und w = konstant = w_o :

$$x_{stat.} = \frac{z_o}{K_R} + w_o$$

Nur Störverhalten (w = o) : Bleibende Regelabweichung: $x_B = \frac{z_o}{K_R}$

Sie wird kleiner für größeres K_R und ist von den Daten der Strecke unabhängig.

Nur Führungsverhalten (z = o) : $x_{stat.} = w_o$ Ein Führungsbefehl wird also vollständig ausgeführt. Die bleibende Regelabweichung ist null.

Zahlenbeispiel:

Der Wasserstand in einem Druckkessel ändert sich nach einer Spannungsverstellung am Antriebmotor der Speisewasserpumpe von 20 V mit einer Geschwindigkeit von $5 \frac{cm}{min}$. Es treten Dampfentnahmeschwankungen auf, die Spannungsschwankungen von $\pm$ 10 V entsprechen.

Wie muß der Übertragungsfaktor eines P-Reglers eingestellt werden, damit der Stand auf $\pm$ 2 cm konstant gehalten wird.

Lösung: $K_{IS} = \frac{5 \text{ cm/min}}{20 \text{ V}} = 0{,}25 \frac{\text{cm/min}}{\text{V}}$

$$z_o = 10 \text{ V} \quad , \quad x_B = \pm 2 \text{ cm}$$

$$K_R = \frac{z_o}{x_B} = \frac{\pm 10 \text{ V}}{\pm 2 \text{ cm}} = 5 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$

Pro cm Standabweichung muß also die Regeleinrichtung 5 V Spannungsänderung an den Speisepumpenmotor geben.

6.5. I-Regelkreise

6.5.1. Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert

Aus der Handlungsgleichung der I-Regeleinrichtung $\dot{y} = K_{IR} \cdot x_w$ ist zu ersehen, daß das Stellglied nur für die Regelabweichung null zur Ruhe kommt (Stellgeschwindigkeit $\dot{y} = o$ nur für $x_w = o$). Der I-Regler arbeitet also so lange, bis er aufgetretene Regelabweichungen restlos beseitigt hat. Dabei arbeitet er langsamer als der P-Regler. Während beim P-Regler zu jeder Regelabweichung sofort eine Stellabweichung gehört, gehört beim I-Regler zu jeder Regelabweichung eine bestimmte Stellgeschwindigkeit, die erst mit der Zeit eine Stellabweichung bewirkt. Der I-Regler arbeitet langsam, aber genau (keine bleibende Regelabweichung). Wird die Stellgeschwindigkeit groß eingestellt, so verstellt der I-Regler bei Strecken mit größerer Verzögerung (Totzeit, Verzugszeit, erst danach bekommt der Regler die Rückmeldung über die Auswirkung seines Eingriffes!) zu viel und er neigt zu Schwingungen, die sich schlecht oder gar nicht beruhigen. An I-Strecken kann er nicht verwendet werden, weil es dort unabhängig von der Einstellung zu ungedämpften Schwingungen käme. Das wird noch durch Rechnung abgeleitet.

K_{IR} nicht zu klein einstellen, weil der Kreis sonst zu langsam reagiert.
K_{IR} nicht zu groß einstellen, weil der Kreis sonst instabil.

6.5.2. Beschreibende Gleichung

6.5.2.1. I-Regeleinrichtung an P-Strecke

Nach Bild 91 ist

$$\dot{y} = K_{IR}\, x_w \qquad (IT_o\text{-Regler})$$

$$T_S \dot{x} + x = K_S\, y_S \qquad (PT_1\text{-Strecke})$$

$$x_w = x - w$$

$$y_S = z - y$$

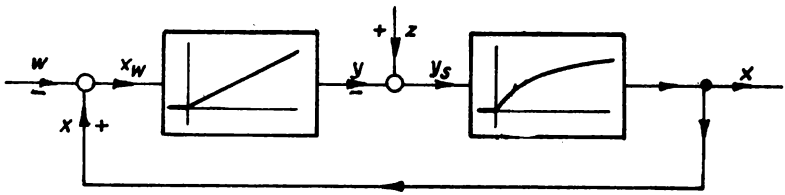


Bild 91

Aus diesen Gleichungen der einzelnen Glieder läßt sich durch Eliminieren von x_w , y und y_S angeben, wie die Regelgröße x von der Führungsgröße w und der Störgröße z abhängt.

$$T_S \ddot{x} + \dot{x} = K_S \left[\dot{z} - K_{IR} (x - w) \right]$$

$$T_S \ddot{x} + \dot{x} + K_S K_{IR} x = K_S \dot{z} + K_S K_{IR} w$$

$$\frac{T_S}{K_S K_{IR}} \ddot{x} + \frac{1}{K_S K_{IR}} \dot{x} + x = \frac{\dot{z}}{K_{IR}} + w$$

Bei Strecken mit höheren Verzögerungen würden noch höhere Ableitungen von x auftreten, die den Einschwingvorgang nach Veränderung von z (Störverhalten) bzw. w (Führungsverhalten) charakterisieren.

Für den stationären Zustand (Änderungen, d.h. Ableitungen sind zu null geworden) gilt für z = konstant = z_o und w = konstant = w_o $x_{stat.} = w_o$.

Nur Störverhalten (w = o): x_B = o , d.h. keine bleibende Regelabweichung, Störungen werden vollständig kompensiert. Das gilt für den Fall von konstanten Störgrößen. Treten linear ansteigende Störgrößen auf (z = c · t), so hinkt der I-Eingriff der immer größer werdenden Störgröße hinterher. Man spricht vom Geschwindigkeitsfehler. Aus der allgemeinen Gleichung folgt für den stationären Zustand mit z = c t : $x_{stat.} = \frac{c}{K_{IR}}$.

Nur Führungsverhalten (z = o) : $x_{stat.} = w_o$, d.h. ein Führungsbefehl wird genau ausgeführt. $x_B = o$.

Zahlenbeispiel:

Nachlaufregelungen mit hydraulischer Hilfsenergie an Werkzeugmaschinen sind I-Regelkreise. Die Stellgeschwindigkeit möge näherungsweise der Abweichung vom Sollwert proportional sein. Es sei die Schlittengeschwindigkeit $2\ \frac{cm}{s}$ bei einer Stellungsabweichung = 5 cm von der befohlenen Lage. Störungen mögen vernachlässigt werden. Wie lautet die den Regelvorgang beschreibende Gleichung?

Lösung: Es ist $K_{IR} = \frac{2\ cm/s}{5\ cm} = \frac{2}{5} \cdot \frac{1}{s}$

$K_S = 1$, weil $x = y_S$.

Also erhält man wegen $\frac{1}{K_S K_{IR}}\ \dot{x} + x = w$ die Gleichung

$\frac{5}{2}\ s\ \dot{x} + x = w$

Damit x = w wird, vergehen annähernd $4 \cdot \frac{5}{2}\ s = 10\ s$ (Dann ist $x = \frac{98}{100}\ w$)

Praktisch werden Regler an Werkzeugmaschinen bewußt so nichtlinear gebaut, daß die Stellgeschwindigkeit mit Annäherung an die befohlenen Lage nicht streng linear abnimmt, sondern die befohlene Lage mit maximaler Geschwindigkeit sehr nahe angefahren und erst dann mit kleinerer Geschwindigkeit die befohlene Lage genau eingestellt wird.

6.5.2.2. I-Regeleinrichtung an I-Strecke

Nach Bild 92 ist

$$\dot{y} = K_{IR}\ x_w \qquad (IT_o\text{-Regler})$$

$$\dot{x} = K_{IS}\ y_S \qquad (IT_o\text{-Strecke})$$

$$x_w = x - w$$

$$y_S = z - y$$

Aus diesen Gleichungen der einzelnen Glieder läßt sich durch Eliminieren von x_w, y und y_S angeben, wie die Regelgröße x von der Führungsgröße w und der Störgröße z abhängt.

$$\ddot{x} = K_{IS}\left[\dot{z} - K_{IR}(x - w)\right]$$

$$\ddot{x} + K_{IS}K_{IR}\,x = K_{IS}\,\dot{z} + K_{IS}K_{IR}\,w$$

$$\frac{1}{K_{IS}K_{IR}}\,\ddot{x} + x = \frac{1}{K_{IR}}\,\dot{z} + w$$

Das ist die Differentialgleichung einer ungedämpften Schwingung, denn es fehlt die dämpfende erste Ableitung der Regelgröße. Eine I-Regeleinrichtung an einer I-Strecke ergibt also unabhängig von den Kenndaten K_{IR} und K_{IS} Dauerschwingungen; das System ist strukturinstabil. I-Regeleinrichtungen dürfen also an I-Strecken nicht eingesetzt werden. Das gilt auch für I-ähnliche Regeleinrichtungen wie die Zweilaufregeleinrichtung.

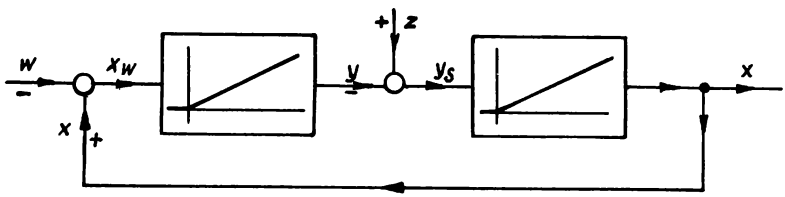


Bild 92

6.6. PI-Regelkreise

Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert

Aus der Handlungsgleichung der PI-Regeleinrichtung $y = K_R\left(x_w + \frac{1}{T_I}\int x_w dt\right)$ ist zu ersehen, daß sich P- und I-Eingriff additiv überlagern. Es vereinen sich also die Eigenschaften des P-Regelkreises mit denen des I-Regelkreises. Der P-Anteil verringert auftretende Regelabweichungen schnell bis auf die

bleibenden Abweichungen und diese beseitigt der I-Anteil langsam ganz.

Auf die Herleitung von Gleichungen möge verzichtet werden. Wie bei der Erfassung des Kreisverhaltens durch Gleichungen vorzugehen wäre, ist nach den Ausführungen zum P- und zum I-Regelkreis ja deutlich.

6.7. Regelkreise mit D-Anteil

6.7.1. Eigenschaften, anschaulich mit Worten erläutert

D-Regler kann es nicht geben, weil sie sich mit ihrem Stelleingriff laut $y = K_D \dot{x}_w$ nur nach der Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung, nicht aber nach der Regelabweichung selbst richten würden. Ein D-Regler würde auf eine konstante Abweichung (x_w = konst., damit $\dot{x}_w = o$) überhaupt nicht reagieren. Es gibt also nur andere Regeleinrichtungen mit D-Anteil (PD, PID vor allem). Der D-Anteil bedeutet eine additive Überlagerung des Stelleingriffes $K_D \dot{x}_w$ zu den anderen (proportionalen, integralen, usw.) Eingriffen. $K_D \dot{x}_w$ bedeutet die Aufschaltung der Geschwindigkeit der Regelabweichung. Ein Regler mit D-Anteil greift bei schneller Änderung der Regelabweichung ($|\dot{x}_w|$ groß) stark ein, selbstverständlich so, daß einem schnellen Absinken, bzw. Ansteigen von x_w entgegengearbeitet wird. Er sagt sich gewissermaßen: Bei großer Geschwindigkeit von x_w würde auch bei vorläufig noch kleinem x_w demnächst eine große Abweichung eintreten, also ist es sinnvoll, vorausschauend schon jetzt stark einzugreifen. Der Regler hat einen Vorhalt. So kann eine möglichst vollständige Beseitigung einer aufgetretenen Regelabweichung schneller erreicht werden. Das muß aber nicht so sein. Hat die Strecke des Regelkreises echte Totzeit und ist deshalb die Regelung schwierig, so verbessert der D-Anteil nichts, denn während der Totzeit ist ja $\dot{x}_w = o$, so daß der D-Anteil ($y = K_D \dot{x}_w$) nicht eingreift. Das Regelverhalten kann sogar schlechter werden. Auch an Strecken mit einer gewissen Unruhe der Regelgröße verschlechtert ein D-Anteil der Regeleinrichtung das Regelverhalten, denn alle kleinen

($|x_w|$ klein) aber steilen ($|\dot{x}_w|$ groß) Flanken der Regelgrößenunruhe werden ja durch das Differenzieren verstärkt.

Ob ein D-Anteil in der Regeleinrichtung sinnvoll ist, läßt sich überschlägig aus der Übergangsfunktion der Regelstrecke ersehen. Regelungen werden ja dann schwierig, wenn das Verhältnis $\frac{T_a}{T_t + T_u}$ der Strecke klein wird. Wird dieses Verhältnis durch Hinzunahme der Geschwindigkeit von x (statt x die Summe $x + K_D \dot{x}$ auftragen und nach T_a, T_t, T_u auswerten) wesentlich besser, so verspricht der D-Anteil im Regler Verbesserung des Regelverhaltens.

6.7.2. Einige Gleichungen

Der D-Anteil wirkt "antiverzögernd". An einem speziellen Fall soll das mit Gleichungen verdeutlicht werden.
Die Hintereinanderschaltung einer PT_1-Strecke mit einem PD-Glied ergibt eine PT_0-Strecke (Bild 93).

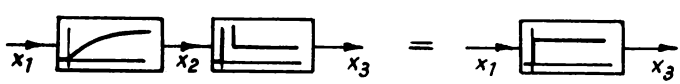


Bild 93

Man kann also mit einem PD-Glied die Verzögerung einer Strecke um eine Ordnung erniedrigen und damit das Verhalten der Strecke regelungsdynamisch verbessern.

Beweis: $T_S \dot{x}_2 + x_2 = K_S x_1$

$x_3 = K_R (x_2 + T_D \dot{x}_2)$

Elimination von x_2 ergibt, wenn $T_D = T_S$ eingestellt wird

$$x_3 = K_R K_S x_1$$

Mehrfacher Vorhalt (PD^2-Regler z.B.) kann nur selten angewendet werden, da unvermeidbare Unruhen der Größen durch das mehrfache Differenzieren zu sehr verstärkt werden.

6.8. Einstellregeln für lineare einschleifige Regelkreise

Die Frage "Welche Regelung ist die beste?" muß relativ beantwortet werden. Als Bezugsgrößen mögen genannt sein: Kosten für die Regeleinrichtung, Einfachheit, Robustheit, bleibende Regelabweichung, maximale Regelabweichung, Anregelzeit, Ausregelzeit. Die Kenndaten der Regeleinrichtung dürfen nicht zu groß, aber auch nicht zu klein eingestellt werden. Die optimale Einstellung ist von der Aufgabe und von dem Stör- und Führungsverhalten der Strecke abhängig. Es gibt Regelungsaufgaben, bei denen größere Abweichungen vom Sollwert zulässig sind, wenn nur der Sollwert nach kurzer Zeit wieder exakt gehalten wird und es gibt Regelungsaufgaben, bei denen größere Abweichungen vom Sollwert auf gar keinen Fall eintreten dürfen, es aber andererseits nichts ausmacht, wenn der Sollwert nicht exakt gehalten wird. Die Frage nach der Güte einer Regelung also pauschal beantworten zu wollen, ist wenig sinnvoll. So gibt es viele auf bestimmte Aufgaben zugeschnittene Gütekriterien. Auf Regelkreise mit I-Anteil (x_w wird für $t \to \infty$ zu null) kann z.B. das einfache Flächenkriterium angewendet werden. Es besagt, daß jene Regelung gut ist, bei der die Fläche zwischen Regelabweichung und Zeitachse möglichst klein ist (Bild 94). $\int x_w \, dt \to$ Minimum.

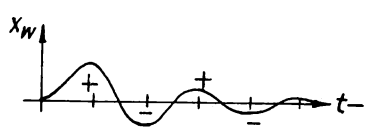


Bild 94

Ohne Zusatzbedingung angewendet würde dieses Kriterium eine Dauerschwingung (Flächen oberhalb der Zeitachse erscheinen unter dem Integral positiv, Flächen unterhalb der Zeitachse erscheinen negativ, beide Flächenanteile heben sich im Inte-

gralwert auf) als besonders gutes Einschwingverhalten einer Regelung stempeln. Das ist offensichtlich unsinnig. Der Ausweg ist deutlich:

Betragskriterium: $\int |x_w|\ dt \longrightarrow$ Minimum

Quadratisches Flächenkriterium:

$$\int x_w^2\ dt \longrightarrow \text{Minimum}$$

Nach solchen Kriterien können Regelungen mathematisch optimiert werden. Die Optimierung kann auch durch vielfältige systematische Versuche und Heraussuchen der besten Ergebnisse erfolgen (Modellregelkreise!). Als variabel zum Zwecke der Optimierung sind anzusehen:

a) die Struktur der Regelung
b) das Zeitverhalten der einzelnen Zweige
c) die Einstellung der einzelnen Glieder

Für einschleifige Regelkreise mit einer bestimmten Regeleinrichtung (P-, I-, usw.) ist nur noch die Einstellung des Reglers variabel. Dafür gibt es Einstellregeln, die nun wiederum von etlichen Dingen anhängig sind:

a) Von der Auswirkung von Regelgrößenschwankungen.
So muß z.B. bei Lageregelungen an Werkzeugmaschinen der Einschwingvorgang aperiodisch sein, während z.B. für die Temperaturregelung des Wärmeträgers für die Erwärmung eines Mediums periodisches Einschwingen der Temperatur möglich ist. Das Schwingen wird sich durch die nachfolgende Speicherwirkung kaum auf das Medium selbst auswirken.

b) Vom zeitlichen Verlauf der Störgrößen.
Treten z.B. im wesentlichen langdauernde Störgrößenänderungen auf, so muß der I-Anteil der Regeleinrichtung groß genug eingestellt werden, um Regelabweichungen möglichst rasch zum Verschwinden zu bringen. Treten aber die Störgrößenänderungen nur kurzzeitig auf, so müssen diese sowieso allein vom P-Anteil der Regeleinrichtung abgefangen werden; die I-Einstellung ist dann verhältnismäßig belanglos.

c) Vom Angriffspunkt der Störgrößen.
Verschiedene Störgrößen wirken verschieden auf die Regelgröße; durch verschiedene Angriffspunkte der Störgrößen hat die Auswirkung der Störgrößen auf die Regelgröße verschiedenen zeitlichen Verlauf. Die Einstellung der Regeleinrichtung muß sich nach der Hauptstörgröße richten.

d) Vom gewünschten Führungsverhalten.
Ein optimales Führungsverhalten verlangt im allgemeinen eine andere Einstellung der Kennwerte als ein optimales Störverhalten.

Die optimale Einstellung von Reglern ist also ein komplexes Problem. Für verfahrenstechnische Regelungen hat man Faustformeln gefunden, die für die meisten Fälle ein gutes Regelverhalten ergeben.

Einstellregeln nach Ziegler und Nichols:

Man gehe bei der optimalen Reglereinstellung so vor:

1. Regler als P-Regler einstellen ($T_v = o$, $T_n = \infty$)
2. K_R solange vergrößern, bis die Regelung gerade ungedämpfte Schwingungen ausführt, sich also an der Stabilitätsgrenze befindet.
3. Den kritischen Übertragungsfaktor K_{Rk} und die Schwingungsdauer T_k dieser Dauerschwingung bestimmen.
4. Die günstigste Einstellung der Regler ist dann:

Regler	K_R	T_n	T_v
P	$0,5\ K_{Rk}$	-	-
PI	$0,45\ K_{Rk}$	$0,85\ T_k$	-
PID	$0,6\ K_{Rk}$	$0,5\ T_k$	$0,12\ T_k$

Andere Einstellregeln gehen von den Daten der Strecke (T_{tS}, T_{uS}, T_{aS}, K_S) aus, wie die in Tabelle 18 angegebenen Faustformeln.

Tabelle 18

Regler	K_R	T_n	T_v
P	$\frac{T_a}{(T_t+T_u)K_S}$	-	-
PI	$0{,}8\ \frac{T_a}{(T_t+T_u)K_S}$	$3(T_t+T_u)$	-
PD	$1{,}2\ \frac{T_a}{(T_t+T_u)K_S}$	-	$0{,}25\ (T_t+T_u)$
PID	$1{,}2\ \frac{T_a}{(T_t+T_u)K_S}$	$2(T_t+T_u)$	$0{,}42\ (T_t+T_u)$

Man sieht aus diesen Formeln den Einfluß der einzelnen Streckenkennwerte auf die Reglereinstellung. Am schnellsten wird ein Regler arbeiten, wenn K_R groß und T_n klein eingestellt werden können. Die Formeln lassen erkennen, bei welchen Strecken das möglich ist. Weiter gibt es Verfahren, nach denen man die sogenannten kritischen Einstellwerte einer Regeleinrichtung berechnen kann. Bei Einstellung der kritischen Werte würde die Regelung gerade Dauerschwingungen konstanter Amplitude ausführen. Für die Bestimmung der kritischen Daten gibt es etliche Stabilitätskriterien, die teils von der Differentialgleichung, teils von der Übergangsfunktion, teils von anderen Beschreibungsmethoden ausgehen.

6.9. Stabilitätskriterien

Nur stabil arbeitende Regelkreise erfüllen ihren Zweck, nämlich gewünschte Zustände herzustellen und aufrechtzuerhalten. Stabilitätsbetrachtungen haben in der Regelungstechnik große Bedeutung. Es gibt Kriterien, mit denen entschieden werden kann, ob ein Regelkreis stabil oder nicht stabil arbeitet.
Liegt die Beschreibung eines Kreises durch eine Differential-

gleichung vor $\ldots + a_3 \dddot{x} + a_2 \ddot{x} + a_1 \dot{x} + a_0 x = f(w,z)$ so braucht diese Gleichung nicht gelöst zu werden, um zu sehen, ob die Regelgröße gedämpft einschwingt oder nicht. Aus den Koeffizienten a_0, a_1, ... ,a_n läßt sich die Stabilitätsfrage nach dem sogenannten Hurwitzkriterium entscheiden.

Das Hurwitzkriterium lautet:
Der durch die Differentialgleichung $\ldots a_3 \dddot{x} + a_2 \ddot{x} + a_1 \dot{x} + a_0 x = f(w,z)$ beschriebene Regelvorgang ist stabil, wenn alle a_i (i = o bis n) größer als Null und alle Determinanten der folgenden Reihe positiv sind:

$$D_1 = a_1 \qquad D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} \qquad D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & o \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ a_5 & a_4 & a_3 \end{vmatrix}$$

$$D_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 & o & o \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ a_7 & a_6 & a_5 & a_4 \end{vmatrix}$$

Ein anderes Kriterium, das Stabilitätskriterium von Küpfmüller geht von der Übergangsfunktion des aufgeschnittenen Regelkreises aus. Wird ein Regelkreis irgendwo aufgeschnitten und nimmt man die beiden Enden als Eingang und Ausgang, wobei der Signalfluß in Wirkungsrichtung des Kreises erfolgt, so läßt sich eine Übergangsfunktion aufnehmen und nach den bekannten Methoden graphisch auswerten. Sieht man den Regler als gegenüber der Strecke unverzögert an, so genügt die Aufnahme der Streckenübergangsfunktion. Für die kritischen Einstellwerte des Reglers, das sind die Einstellwerte, bei denen der Kreis gerade Dauerschwingungen konstanter Amplitude ausführt, und für die kritische Schwingungsdauer gelten dann folgende Faustformeln:

Stabilitätsgrenze	kritische Schwingungsdauer T_k
P-Regler an P-Strecke $K_S K_{Rk} \approx 1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_a}{T_t+T_u}$	$2(T_t+T_u)$ wenn $T_t+T_u \gg T_a$ $4(T_t+T_u)$ wenn $T_t+T_u \ll T_a$
P-Regler an I-Strecke $K_{IS} K_{Rk} \approx \frac{\pi}{2} \frac{1}{T_t+T_u}$	$4(T_t+T_u)$ wenn $T_u \ll T_t$ $2\pi\sqrt{T_t T_u}$ wenn $T_u \gg T_t$.
I-Regler an P-Strecke $K_S K_{IRk} \approx \frac{\pi}{2} \frac{1}{T_a+T_t+T_u}$	$4(T_t+T_u+T_a)$ wenn $T_a \ll T_t+T_u$ $2\pi\sqrt{(T_t+T_u)T_a}$ wenn $T_a \gg T_t+T_u$

Zahlenbeispiel zum Hurwitzkriterium:

Beschreibt die folgende Gleichung, in der vom Hinschreiben der Einheiten abgesehen wurde, einen stabilen Regelvorgang?

$$3\dddot{x} + 5\ddot{x} + 4\dot{x} + x = w + \frac{1}{10}\dot{z}$$

Lösung: Für die Stabilitätsbetrachtung sind nur die Koeffizienten der linken Seite der Gleichung maßgebend.

mathematisch: Die homogene Gleichung entscheidet die Frage nach Stabilität oder Instabilität.

physikalisch: Die Frage nach Stabilität oder Instabilität ist unabhängig von den äußeren Einflüssen (w und z). Sie liegt in der Struktur des Systems begründet.

$a_i > o$ ist erfüllt.

$$D_1 = 4 > o \quad , \quad D_2 = \begin{vmatrix} 4 & 1 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} = 20 - 3 = 17 > o$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 4 & 1 & o \\ 3 & 5 & 4 \\ o & o & 3 \end{vmatrix} = 3 \begin{vmatrix} 4 & 1 \\ 3 & 5 \end{vmatrix} = 3.17 > o$$

Der Regelvorgang ist stabil.

6.10. Vermaschte Regelkreise

Auch die leistungsfähigste Regeleinrichtung kann besonders hohe Forderungen hinsichtlich maximal kleiner Überschwingweite, Anregelzeit und Ausregelzeit an Strecken mit Verzögerung höherer Ordnung und Totzeit nicht erfüllen. Eine Abhilfe ist nur durch Verkürzung der Signalwege innerhalb des Regelkreises möglich. Es entstehen so mehrere zusammenhängende geschlossene Wirkungsabläufe (Maschen). Man spricht von vermaschten Regelkreisen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die auch kombiniert werden können.

1. Rückführung (Bild 95)

   Die bereits früher behandelte Rückführung stellt eine Vermaschung dar.

2. Aufschaltung von Störgrößen (Bild 95)

   Die Störgröße, die durch Betrag und Häufigkeit den stärksten Einfluß hat, wird durch einen Fühler erfaßt und dem Regler aufgeschaltet. Der Regler kompensiert durch den dadurch ausgelösten Stelleingriff den Einfluß der Störgröße, er hat dann nur noch weniger bedeutetende Störgrößen zu bekämpfen und kann daher einfacher gestaltet werden. Auch $\dot{z}$, wie auch mehrere Störgrößen können aufgeschaltet werden. Störgrößenaufschaltungen erfolgen im Sinne einer Steuerung, sie ändern nichts am Wirkungskreis Regler - Strecke, gefährden also unter keinen Umständen die Stabilität des Systems, verbessern sie aber auch nicht. Störgrößenaufschaltung dürfen mit keinem integralen Anteil erfolgen, da die Aufschaltung ja mit wieder verschwindender Störgröße zurückgenommen werden soll. Das würde ein I-Anteil nicht tun.

3. Kaskadenregelung (Bild 95)

   Die Strecke wird in zwei Teile aufgespalten, indem zwischen dem Eingang (Stellgröße y) und dem Ausgang (Regelgröße x) eine Zwischengröße x_H durch einen zusätzlichen Fühler gemessen wird. Durch den Regler R_1 wird "auf kurzem Wege"

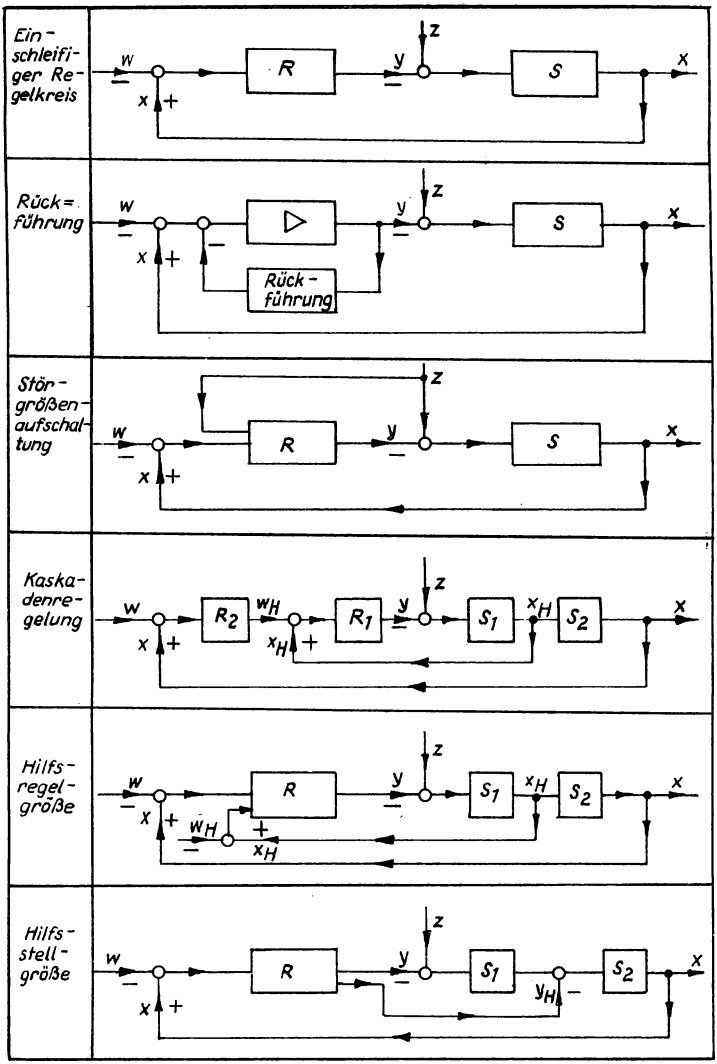

Ein-schleifiger Regelkreis
w
x
R
y
z
S
x
Rück-führung
Rück=führung
Rück-führung
Stör-größen-aufschaltung
Kaskaden-regelung
R_2
w_H
R_1
S_1
x_H
S_2
Hilfs-regel-größe
Hilfs-stell-größe
y_H

Bild 95

der erste Abschnitt S_1 für sich geregelt, so daß die hier wirksamen Störgrößen gar nicht oder zumindest stark reduziert am Ausgang von S_2 bemerkbar werden. R_1 kann, da S_1 weniger Verzögerungsglieder als die ganze Strecke enthält, schneller und stärker eingreifend regeln als ein Regler, der an $S_1 + S_2$ anzupassen ist. Auf den Abschnitt S_2 wirkende Störgrößen, sowie eine durch R_1 verursachte bleibende Abweichung von x_H und damit von x werden dadurch beseitigt, daß der Regler R_2 mit seiner Ausgangsgröße w_H den Sollwert-Einsteller von R_1 betätigt. Der Regler R_2 ist dem Regler R_1 übergeordnet (Kaskade). R_2 gibt R_1 Führungsbefehle w_H .

4. Hilfsregelgröße (Bild 95)

Dem Regler wird nicht nur die Differenz $x - w$, sondern auch die Differenz $x_H - w_H$ (x_H = Hilfsregelgröße) zugeführt. Er sorgt auf "schnellem" Wege über nur S_1 für die Einhaltung von $x_{HSoll} = w_H$ (starker Eingriff ohne Stabilitätsgefährdung möglich) und auf "langem" Wege über $S_1 + S_2$ für die Einhaltung von $x_{Soll} = w$. Durch die Hilfsregelgröße wird vor allem das Störverhalten des Regelkreises verbessert.

5. Hilfsstellgröße (Bild 95)

"Zwischen" dem eigentlichen Stellglied und dem Meßfühler wird noch ein zweites Stellglied (Hilfsstellgröße y_H) angebracht, das von einem zweiten Stellmotor oder auch von einem kompletten zusätzlichen Regler angetrieben wird. Der Hilfsstellgrößeneingriff kann ohne Stabilitätsgefährdung wesentlich stärker eingestellt werden, da für ihn nur die Übergangsfunktion des Streckenabschnittes S_2 maßgebend ist. Man benutzt zwei Stellgrößen y und y_H immer dann, wenn man aus energetischen oder verfahrenstechnischen Gründen den Beharrungszustand durch y einstellen muß, dort aber schlechte regelungsdynamische Verhältnisse vorfindet. Durch die Hilfsstellgröße wird vor allem das Führungsverhalten des Regelkreises verbessert.

Wiederholungsfragen zu 6.

W6.1. Nach welchen Merkmalen kann man Regelkreise einteilen?

W6.2. Was heißt Stör-, was heißt Führungsverhalten eines Regelkreises?

W6.3. Erläutern Sie die Begriffe Regelabweichung, bleibende Regelabweichung, maximale Regelabweichung, Überschwingweite, Ausregelzeit, Anregelzeit!

W6.4. Beschreiben Sie die Arbeitsweise eines Zweipunktregelkreises!

W6.5. Wie kann man beim Zweipunktregelkreis Amplitude und Schwingungsdauer der Pendelbewegung abschätzen?

W6.6. Durch welche Maßnahmen läßt sich beim Zweipunktregelkreis die Amplitude der Pendelbewegung verkleinern?

W6.7. Beschreiben Sie die Arbeitsweise eines Zweilaufregelkreises!

W6.8. Warum arbeitet der Zweilaufregelkreis stabil gegenüber der "kontrollierten" Instabilität eines Zweipunktregelkreises?

W6.9. Warum gibt es im P-Regelkreis eine bleibende Regelabweichung?

W6.10. Warum gibt es im I-Regelkreis keine bleibende Regelabweichung?

W6.11. Wann wird der P-, wann wird der I-Regelkreis instabil?

W6.12. Stellen Sie Vor- und Nachteile von P- und I-Regelkreisen einander gegenüber!

W6.13. Was bewirkt der D-Anteil in einem Regelkreis?

W6.14. Warum kann man nicht ganz allgemein von der optimalen Einstellung eines Regelkreises sprechen? Wovon ist sie abhängig?

W6.15. Wozu gibt es Stabilitätskriterien?

W6.16. Welche Möglichkeiten der Vermaschung von Regelkreisen gibt es?

Übungsaufgaben zu 6.

Ü6.1. Der Hochbehälter einer Wasserversorgungsanlage habe einen Querschnitt von 4 m^2. Die Pumpanlage fördert 0,5 m^3/min. Die Entnahme schwankt. Sie beträgt 0,25 m^3/min $\pm$ 0,25 m^3/min. Der Stand im Hochbehälter soll durch Grenzkontakte überwacht werden. Ehe sich das Einschalten der Pumpe in einer Standänderung bemerkbar macht, vergehen 10 s.

a) Wie weit müssen die Grenzkontakte auseinanderliegen, wenn die Pumpe in 60 min einmal ein- und einmal ausgeschaltet werden soll?

b) Welche Wasserstandschwankungen ergeben sich dann?

Ü6.2. Die Drehzahl eines Motors wird durch Überbrücken und Nichtüberbrücken eines Widerstandes im Ankerkreis annähernd konstant gehalten. Auf die eine von zwei Wicklungen des schaltenden Relais wird die drehzahlproportionale Spannung eines vom Motor angetriebenen Tachodynamos gegeben, auf die andere Wicklung gegensinnig zur Tachospannung eine Führungsspannung. Für dauernd kurzgeschlossenen Widerstand betrage die Drehzahl 3000 U/min, für dauernd nicht kurzgeschlossen im Ankerkreis liegenden Widerstand betrage die Drehzahl 1000 U/min. Nach dem Schalten stelle sich die neue Drehzahl mit T_t = 5 ms und T_S = 0,4 s ein.

a) Welche Schaltdifferenz (in U/min angegeben) muß das Relais haben, damit die Drehzahlschwankungen nicht größer als $\pm$ 20 U/min sind?

b) Wieviel Schaltungen werden dann pro Sekunde ausgeführt?

c) Welche Schaltdifferenz muß das Relais haben, wenn pro Sekunde höchstens 50 Schaltungen (25 mal ein und 25 mal aus) stattfinden sollen?

Ü6.3. Der Zulauf von Schüttgut zu einem Förderband werde mittels eines Getriebemotors verstellt. Der maximale Zulauf betrage 30 kg/s, die Stellzeit 100 s. Bis zur Wägestelle,

an der mittels Zweilaufregler ein konstanter Durchfluß aufrechterhalten werden soll, vergehen durch Laufzeit bedingt 5 s. Welchen Ansprechwert $a_{krit.}$ in kg/s darf der zu verwendende Fallbügelregler höchstens haben, um ein stabiles Arbeiten zu gewährleisten?

Ü6.4. Die Sprungantwort eines elektrisch beheizten Glühofens ist durch folgende Meßwerte gegeben

t/min	0	2	4	6	8	10	12	14	16	20
ϑ/°C	20	22	94	185	280	368	448	525	595	708

22	24	∞
753	790	1000

Dieser Temperaturübergang ergab sich bei Einschalten der vollen Heizleistung von 10 kW.

a) Wie groß sind K_S, T_t+T_u und T_a der Strecke?
b) Wie groß sind der kritische und der günstigst einzustellende Übertragungsfaktor eines P-Reglers?
c) Wie groß ist die bleibende Regelabweichung eines P-Reglers, wenn die auftretenden Störungen ohne Regelung Temperaturschwankungen von ± 50 grd zur Folge hätten?
d) Welche Werte der Amplitude x_o, der Schwingungsdauer T und der Abweichung des Mittelwertes der Pendelbewegung vom Sollwert ergeben sich bei Anwendung eines die volle Heizleistung schaltenden Zweipunktreglers für den Sollwert x_s = 600 °C?

Ü6.5. Der Durchfluß durch eine Rohrleitung soll konstant gehalten werden. Der Solldurchfluß betrage 2 m^3/min, die maximale Störung entspreche einem Durchfluß von ± 0,4 m^3/min. Bei einer Durchflußänderung von 0,6 m^3/min sei der I-Regler (Strahlrohrregler) voll ausgesteuert und der Stellkolben lege dabei in 1 s einen Weg von 15 mm zurück.
Das Ventil habe bei dem maximalen Hub von 10 cm einen Durchfluß von 2,5 m^3/min. Es sollen durchweg lineare Verhältnisse angenommen werden. Zu ermitteln sind:

a) das Blockschaltbild
b) die Gleichungen der einzelnen Glieder
c) die Differentialgleichung des geschlossenen Kreises
d) die Lösung dieser Gleichung für eine sprungförmige Eingangsgröße von z = 0,2 m^3/min.
e) Nach welcher Zeit ist die Störgröße bis auf 5 % Rest kompensiert?

Lösungen der Übungsaufgaben

(Die Antworten zu den Wiederholungsfragen ergeben sich aus dem Text des Lehrbriefes.)

Ü2.1. Es sind überall die Änderungen der Größen zu nehmen und die Ausgangsänderungen durch die Eingangsänderungen zu dividieren. Dieses Verhältnis ist über der Zeit darzustellen (Bilder 96 - 98)

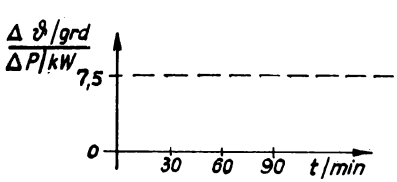


Bild 96

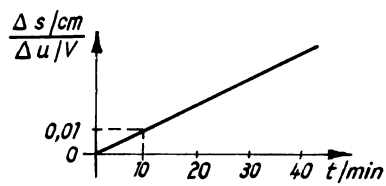


Bild 97

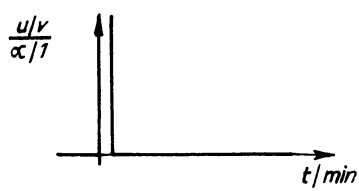


Bild 98

Ü2.2. Unter sonst konstanten Betriebsbedingungen ist möglichst in der Nähe des Arbeitspunktes eine sprungförmige Veränderung der Gaszufuhr vorzunehmen und der resultierende Temperaturverlauf aufzuschreiben.

Ü2.3. $T = RC = 1\ M\Omega \cdot 10\ \mu F = 10\ s$, Gleichung: $10\ s\ \dot{u}_a + u_a = u_e$

Ü2.4. Nach $G = m\ g$ ist $kp = kg\ 10\ m/s^2$.

$$T_2^2 = \frac{m}{c} = \frac{kg\ cm}{0{,}4\ kp} = \frac{kg\ cm\ s^2}{0{,}4\ kg\ 10\ m} = \frac{1}{400}\ s^2$$

$$T_1 = \frac{d}{c} = \frac{0{,}02\ kp\ s\ cm}{cm\ \ 0{,}4\ kp} = \frac{1}{20}\ s$$

Gleichung: $\frac{1}{400}\ s^2\ \ddot{x}_a + \frac{1}{20}\ s\ \dot{x}_a + x_a = x_e$

Ü3.1. $\Delta p = \frac{0{,}2\ at}{10\ grd}\Delta\vartheta = 0{,}02\ \frac{at}{grd} \cdot \Delta\vartheta$

Ü3.2. $\dot{s}_a = \frac{2\ mm/s}{0{,}05\ at} \cdot \Delta p_e$, $s_a = 40\ \frac{mm/s}{at} \int \Delta p_e\ dt$

Ü3.3. $u = \frac{20\ V}{1000\ U/min}\ n = \frac{1}{50}\ \frac{V}{U/min}\ n$, $\omega = \dot{\alpha} = \frac{2\pi}{U}\ n$

$$u = \frac{1}{50}\ \frac{V}{1/min}\ \frac{\dot{\alpha}}{2\pi} = \frac{1}{314}\ V\ min\ \dot{\alpha}$$

Ü3.4. $K = \frac{10\ mm}{50\ grd} = 0{,}2\ \frac{mm}{grd}$

Die Einstellung beim PT_1-Glied ist nach etwa $3T$ abgeschlossen.

Also ist $T \approx \frac{1}{3}\ min$.

Gleichung: $0{,}3\ min\ \dot{h} + h = 0{,}2\ \frac{mm}{grd}\ \vartheta$

Ü3.5. $\omega = \frac{1}{2T_2^2}\sqrt{4T_2^2 - T_1^2}$, $T_2^2 = \frac{1}{400}\ s^2$, $T_1 = \frac{1}{20}\ s$

$$\omega = \frac{200}{s}\sqrt{\frac{1}{100} - \frac{1}{400}} = 10\sqrt{3}\ \frac{1}{s}$$

$\omega = 2\pi f = 2\pi\frac{1}{T}$ daraus folgt $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{10\sqrt{3}}\ s = 0{,}36\ s$

Ü3.6. $T_2^2\ \ddot{x} + T_1\ \dot{x} + x = K\ i$, $K = \frac{10\ mm}{0{,}5\ A} = 20\ \frac{mm}{A}$

$$\omega = \frac{1}{2T_2^2}\sqrt{4T_2^2 - T_1^2} = 2\,\frac{1}{s} \quad , \quad \delta = \frac{T_1}{2\,T_2^2}$$

$$\frac{x_1}{x_2} = 4 = e^{\frac{\pi\delta}{\omega}}$$

Man erhält (mit allen Zeiten in s) zur Bestimmung von T_1 und T_2^2 folgendes Gleichungssystem:

$$\ln 4 = \frac{\pi T_1}{4\,T_2^2} \quad , \quad 4\,T_2^2 = \sqrt{4\,T_2^2 - T_1^2} \quad ,$$

dessen Lösung $T_1 = 0{,}37$ und $T_2^2 = 0{,}21$ ergibt.

Die gesuchte Dgl. lautet also:

$$0{,}21\ s^2\,\ddot{x} + 0{,}37\ s\,\dot{x} + x = 20\,\frac{mm}{A}\,i$$

Ü3.7. $T_t = \frac{10\ m}{0{,}5\ m/s} = 20\ s$, Gleichung $x_a = x_e(t-20s)$

Ü3.8. $K = \frac{2\ V/s}{5V/10s} = 4$, $T_D = 5\ s$

Ü3.9. $K = -2$, $T_I = 10\ min$

Ü3.10. Siehe Bild 99 auf Seite 161

Ü3.11.

$$T_1\,\dot{x}_{a1} + x_{a1} = K_1\,x_e$$
$$T_2\,\dot{x}_a + x_a = K_2\,x_{a1}$$

Elimination von x_{a1} ergibt

$$T_1T_2\,\ddot{x}_a + (T_1+T_2)\,\dot{x}_a + x_a = K_1K_2\,x_e$$

Ü3.12.

$$T\,\dot{x}_{a1} + x_{a1} = K\,x_e$$
$$\dot{x}_{a2} = K_I\,x_e$$
$$x_a = x_{a1} + x_{a2}$$

Elimination von x_{a1} und x_{a2} ergibt

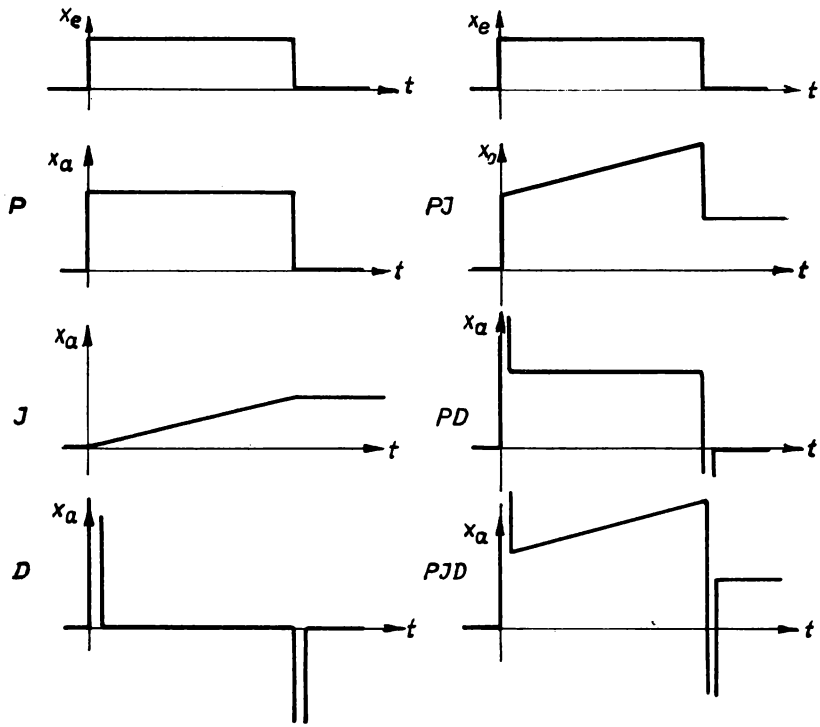


Bild 99

$$T\,\dot{x}_a + x_a = (K + K_I\,T)\,x_e + K_I \int x_e\,dt$$

$$= (K + K_I T)\,\left(x_e + \frac{1}{T + \frac{K}{K_I}} \int x_e\,dt\right)$$

Gesamtübertragungsfaktor = $K + K_I T$

Integralzeit = $T + \frac{K}{K_I}$

Ü3.13. $\dot{x}_a = K_v\,x_{ev}$, $x_{ar} = K_r\,x_{er}$, $x_{er} = x_a$, $x_{ev} = x_e - x_{ar}$

Elimination von x_{ev} , x_{ar} , x_{er} ergibt

$$x_a = K_v (x_e - K_r x_a) = \frac{1}{K_r + \frac{1}{K_v}} x_e$$

$$\text{Gesamtübertragungsfaktor} = \frac{1}{K_r + \frac{1}{K_v}}$$

Ü3.14. $\dot{x}_a = K_{Iv} x_{ev}$, $\dot{x}_{ar} = K_{Ir} x_{er}$, $x_{er} = x_a$,

$x_{ev} = x_e - x_{ar}$

Elimination von x_{ev} , x_{ar} , x_{er} ergibt

$\dot{x}_a = K_{Iv} (x_e - K_{Ir} \int x_a \, dt)$, also:

$\ddot{x}_a + K_{Iv} K_{Ir} x_a = K_{Iv} \dot{x}_e$ (Schwingungsdifferentialgleichung)

Ü3.15. a) Siehe Bild 100



Bild 100

b) Motor: $0{,}5 \text{ s } \dot{n} + n = \frac{10 \text{ U/min}}{20 \text{ V}} u$

Spindel: $\dot{h} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{U}} n$ = Spindelhubgeschwindigkeit

Ventil: $\dot{G} = \frac{3 \text{ kg/s}}{5 \text{ mm}} h$

Elimination von n und h ergibt

$0{,}5 \text{ s } \ddot{G} + \dot{G} = 1{,}2 \frac{\text{kg/s}}{\text{min V}} \int u \, dt$

c) Die Anordnung hat IT_1-Verhalten

Der Durchfluß wurde mit $\dot{G}$ bezeichnet, weil er ja tatsächlich die Ableitung der Menge nach der Zeit ist.

Ü4.1. a) $K_S = \frac{190\ \text{grd}}{80\ \text{W}} = 2{,}38\ \frac{\text{grd}}{\text{W}}$, $q = \frac{1}{K_S} = 0{,}42\ \frac{\text{W}}{\text{grd}}$

Durch Aufzeichnen findet man

$T_t \approx 2{,}5$ min , $T_u \approx 2{,}5$ min , $T_a \approx 90$ min

b) $\frac{T_a}{T_t + T_u} \approx 18 > 10$, die Strecke ist also gut regelbar.

Ü4.2. $K_S = \frac{120\ \text{mm WS}}{50\ 1/\text{min}} = 2{,}4\ \frac{\text{mm WS}}{1/\text{min}}$

Ü4.3. Siehe Bild 101

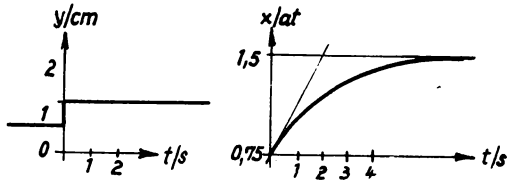


Bild 101

Ü4.4. a) $\dot{x} = \frac{40\ \text{cm}}{20\ \text{s}} = 2\ \frac{\text{cm}}{\text{s}}$

$A = \frac{1}{\dot{x}} \frac{y_o}{Y_h} = \frac{1}{2\ \text{cm/s}} \frac{5\ \text{m}^3/\text{h}}{15\ \text{m}^3/\text{h}} = \frac{1}{6}\ \frac{\text{s}}{\text{cm}}$

b) $K_I = \frac{6\ \text{cm/s}}{15\ \text{m}^3/\text{h}} = 0{,}4\ \frac{\text{cm/s}}{\text{m}^3/\text{h}}$

Ü5.1. $K_R = \frac{Y_h}{X_P} =$, $K_{R1} = \frac{40\ \text{mm}}{1\ \text{mA}} = 40\ \frac{\text{mm}}{\text{mA}}$

$K_{R2} = \frac{40\ \text{mm}}{20\ \text{mA}} = 2\ \frac{\text{mm}}{\text{mA}}$

K_R einstellbar zwischen 40 $\frac{\text{mm}}{\text{mA}}$ und 2 $\frac{\text{mm}}{\text{mA}}$.

Ü5.2. $T_y = \frac{Y_h}{\dot{y}_{max}} = \frac{30\ \text{cm}}{5\ \text{cm/s}} = 6\ \text{s}$

Ü5.3. $u_1 = \frac{2\ V}{10\ mm}\ x \quad , \quad u_2 = c_t \cdot u_1 \quad , \quad u_3 = 1000\ u_2 \quad ,$

$n_1 = \frac{500\ U/min}{10\ V}\ u_3 \quad , \quad n_2 = \frac{1}{100}\ n_1 \quad , \quad \dot{y} = 4\ \frac{mm}{U} \cdot n_2$

$\dot{y} = 4\ \frac{mm}{U}\ \frac{1}{100}\ \frac{500\ U}{10\ min\ V}\ 1000\ c_t\ \frac{2\ V}{10\ mm}\ x$

$\dot{y} = \frac{400}{min}\ c_t\ x \quad , \quad y = \frac{400}{min}\ c_t \int x\ dt$

Ü5.4. $K = \frac{1}{\frac{1}{K_v} + K_r}$

a) $1 = \frac{1}{\frac{1}{2000} + K_r} \quad \curvearrowright \quad K_r = \frac{1999}{2000}$

$100 = \frac{1}{\frac{1}{2000} + K_r} \quad \curvearrowright \quad K_r = \frac{19}{2000}$

K_r einstellbar zwischen $\frac{1999}{2000}$ und $\frac{19}{2000}$

b) $\frac{\Delta K}{K} = \frac{1}{1 + K_r K_v}\ \frac{\Delta K_v}{K_v} = \frac{1}{1 + 1999}\ 10\ \% = \frac{1}{200}$

c) $\frac{\Delta K}{K} = \frac{1}{1 + 19} \cdot 10\ \% = \frac{1}{2}\ \%$

Ü5.5. Es sind $c_M = \frac{n}{u_M} = \frac{\frac{50}{1000}\ U/min}{10\ V} = 5 \cdot 10^{-4}\ \frac{U}{min.V}$

$c_g = \frac{u_g}{\alpha} = \frac{5\ V}{10^{\circ}} = \frac{5\ V}{\frac{2\pi}{360^{\circ}} \cdot 10^{\circ}} = \frac{90}{\pi} \cdot V$

$T = \frac{1}{\frac{2\pi}{U}\ c_M \cdot c_g} = \frac{min.V\ \pi}{2\pi 5 \cdot 10^{-4}\ 90V} = \frac{100}{9}\ min = 11{,}1\ min$

Gleichung der starren Rückführung:

$$u_g = c_g \alpha = \frac{90}{\pi}\ V\ \alpha = 28{,}6\ V \cdot \alpha$$

Gleichung der nachgebenden Rückführung:

$$11{,}1min \cdot \dot{u}_a + u_a = 11{,}1min \cdot \dot{u}_e$$

Gleichung der verzögerten Rückführung:

$$11{,}1min \cdot \dot{u}_a + u_a = u_e$$

Ü5.6. Zeitkonstante $T = \frac{A^2}{c \cdot d}$,

$$d = \frac{6\ l}{min\ at} \quad \text{bis} \quad \frac{o\ l}{min\ at}$$

$$T = \frac{25 \cdot 10^2\ cm^4}{\frac{5\ kp}{cm} \cdot \frac{6 \cdot 10^3\ cm^3}{60\ s\ kp/cm^2}} = 5\ s$$

T ist einstellbar von 5 s an aufwärts.

Ü6.1. a) $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{max} = \frac{0{,}5\ m^3/min}{4\ m^2} = \frac{1}{8}\ \frac{m}{min}$, $A = 8\ \frac{min}{m}$

Aus $T = 4\ T_t + 4\ A\ x_d$ folgt mit $T = 6 min$, $T_t = 1 os$, $A = 8 \frac{min}{m}$

$x_d = \frac{89}{48}\ m = 1{,}86\ m$

b) $x_o = \frac{T_t}{2\ A} + \frac{1}{2}\ x_d$, $x_o = 0{,}94\ m$

Ü6.2. a) Aus $x_o = \frac{T_t}{2\ T_S} \Delta x + \frac{1}{2}\ x_d$ folgt mit $x_o = 20$ U/min,

$T_t = 5$ ms , $T_S = 0{,}4$ s , $\Delta x = 2000$ U/min

$x_d = 15$ U/min

b) Aus $T = 4\ T_t + 4 \frac{x_d}{\Delta x}\ T_S$ folgt $T = 32$ ms

Also ist die Anzahl der Schaltungen pro s

$f = 2 \cdot \frac{1}{32\ ms} = 62{,}5\ \frac{1}{s}$

c) Mit $T = \frac{1}{25}$ s erhält man $x_d = 25$ U/min.

Ü6.3. $K_S = 1$, $T_t = 5$ s , $T_u = o$, $T_a = o$

$\frac{T_a}{T_t + T_u} = o$, damit gilt näherungsweise die Beziehung

$$\left(\frac{v}{a}\right)_{krit.} = \frac{1}{K_S (T_t + T_u)} \cdot v = \frac{Y_h}{T_y} = \frac{30\ kg/s}{100\ s} = 0{,}3\ \frac{kg/s}{s}$$

$$a_{krit.} = K_S\ (T_t + T_u)\ v = 5\ s\ 0{,}3\ \frac{kg/s}{s} = 1{,}5\ kg/s$$

Dieses Ergebnis ist leicht anschaulich zu verstehen. Angenommen, die Förderbandabgabe ist um 1,5 kg/s zu niedrig, dann spricht der Zweilaufregler an und die Zugabe wird pro s um 0,3 kg/s erhöht. An der Meßstelle wirkt sich aber jeder Eingriff erst nach 5 s aus, d.h. nach 5 s liegt die Abgabe gerade wieder innerhalb der Ansprechwerte. Bis dahin wurde aber die Zugabe inzwischen um 5.0,3 kg/s = 1,5 kg/s erhöht. Es wäre also alles wieder in Ordnung. Was geschieht, wenn der Ansprechwert a kleiner, bzw. größer als $a_{krit.}$ ist, läßt sich leicht überlegen.

Ü6.4. a) $K_S = \frac{980 \text{ grd}}{10 \text{ kW}} = 98 \frac{\text{grd}}{\text{kW}}$ · Das Aufzeichnen und Auswerten der Sprungantwort ergibt $T_t+T_u = 2{,}5$ min, $T_a = 21$ min

b) $K_{Rgünstig} = \frac{T_a}{(T_t+T_u)K_S} = 86 \frac{W}{\text{grd}}$

$K_{Rkrit.} = 2 \cdot 86 \frac{W}{\text{grd}} = 172 \frac{W}{\text{grd}}$

c) $x_B = \frac{K_S \cdot z}{1 + K_S K_R} = \frac{\pm 50 \text{ grd}}{1 + 98 \frac{\text{grd}}{\text{kW}} 86 \frac{W}{\text{grd}}} = \pm \frac{50}{9{,}43} \text{ grd}$

$x_B = \pm 5{,}3$ grd

d) $x_o = 58$ grd , $T = 10$ min , $x_s - x_m = 10{,}5$ grd .

Löst man die Teile b) und c) der Aufgabe mittels des Stabilitätskriteriums von Küpfmüller, so erhält man:

b) $K_S K_{Rkrit} = 1 + \frac{\pi}{2} \frac{T_a}{T_t + T_u}$

$K_S K_{Rkrit} = 1 + \frac{3{,}14}{2} \frac{21}{2{,}5} = 14{,}2$

$K_{Rkrit} = \frac{14{,}2 \cdot 1000 \text{ W}}{98 \text{ grd}} = 145 \frac{W}{\text{grd}}$

$K_{Rgünstig} = 72 \frac{W}{\text{grd}}$

c) $$x_B = \frac{\pm\ 50\ \text{grd}}{1 + 98\ \frac{\text{grd}}{\text{kW}}\ 0{,}072\ \frac{\text{kW}}{\text{grd}}} = \pm\ \frac{50}{8}\ \text{grd}$$

$$x_B = \pm\ 6{,}2\ \text{grd}$$

Wie man sieht, unterscheiden sich die Ergebnisse gegenüber dem anderen Lösungsweg um etwa 10 bis 20 %. Das sind die Genauigkeiten, die man mit den Näherungsformeln erreichen kann.

Ü6.5. a) Siehe Bild 102

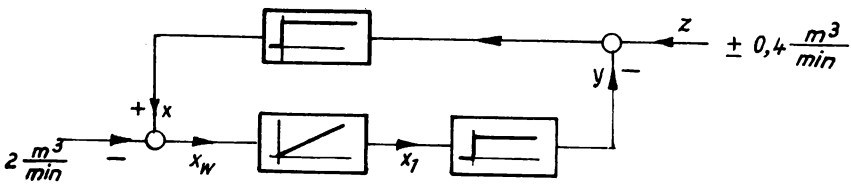


Bild 102

b) Regler: $\dot{x}_1 = \frac{15\ \text{mm/s}}{0{,}6\ \text{m}^3/\text{min}}\ x_w$

Ventil: $y = \frac{2{,}5\ \text{m}^3/\text{min}}{10\ \text{cm}}\ x_1$

Strecke: $x = z - y$

Vergleichsglied: $x - 2\ \text{m}^3/\text{min} = x_w$

c) $$\dot{x} = \dot{z} - \frac{2{,}5\ \text{m}^3/\text{min}}{10\ \text{cm}}\ \frac{15\ \text{mm/s}}{0{,}6\ \text{m}^3/\text{min}}\ (x - 2\ \text{m}^3/\text{min})$$

Geordnet erhält man:

$$1{,}6\ \text{s}\ \dot{x} + x = 2\ \text{m}^3/\text{min} + 1{,}6\ \text{s}\ \dot{z}$$

$$1{,}6\ \text{s}\ \dot{x}_w + x_w = 1{,}6\ \text{s}\ \dot{z}$$

d) $z = 0{,}2\ m^3/min$, $x_w(o) = 0{,}2\ m^3/min$

$1{,}6\ s\ \dot{x}_w + x_w = o$, Lösung: $x_w(t) = 0{,}2\ m^3/min\ e^{-\frac{t}{1{,}6\ s}}$

e) Nach $3T = 3.1{,}6\ s = 4{,}8\ s$ ist die Störgröße bis auf 5 % Rest kompensiert.