

Elektronische Regler: Prinzipien und Verhalten

1. Einleitung

Mit zunehmender Automatisierung von technischen Anlagen nimmt die notwendige Instrumentierung einen immer grösseren Umfang an. Einen nicht unwesentlichen Teil davon stellen die Regeleinrichtungen dar. Je nach Art der Anlage ist der Anteil an elektronischen Regeleinrichtungen, die meist in Systemen zusammengefasst sind, mehr oder weniger gross. Ein wichtiger Bestandteil dieser Systeme sind die elektronischen Regler, über die hier berichtet werden soll.



DIPL.-ING. M. KLINCK
Philips Forschungslaboratorium
Hamburg GmbH
Hamburg

Die Entwicklung der Automatisierung in den verschiedenen industriellen Anwendungsbereichen verläuft unterschiedlich. Es ist z.B. zu erwarten, dass zukünftige Wasserversorgungsbetriebe in einem grösseren Umfang als bisher automatisiert werden. Hierbei treten viele Probleme bezüglich des Systementwurfs und insbesondere der zugehörigen Instrumentierung auf, die in anderen Bereichen, z.B. in der chemischen oder petrochemischen Industrie, schon mit Erfolg gelöst sind. Die dabei gewonnenen Erfahrungen und verwendeten Technologien können daher vielfach Verwendung finden.

Wichtige Elemente der Automatisierung sind die Regeleinrichtungen, die auf die verschiedenen Regelstrecken der Anlagen einwirken. Häufig vorkommende Regelstrecken in Wasserversorgungsbetrieben sind Durchfluss- und Niveauregelstrecken. Im folgenden soll unter dem Begriff Regeleinrichtung derjenige Teil des geschlossenen Regelkreises verstanden werden, der die aufgabengemässe Beeinflussung der Regelstrecke über das Stellglied bewirkt [1]. Die Regeleinrichtung enthält damit mindestens Geräte zum Erfassen der Regelgrösse, zum Vergleich mit der Führungsgrösse und zum Bilden der Stellgrösse. Die für Durchfluss- und Niveauregelstrecken benötigten Stellglieder sind in der Regel motorisch betätigte Stellklappen oder Stellventile und steuerbare Pumpen. Regeleinrichtungen lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten klassifizieren. Bezogen auf die zum Verstellen des Stellgliedes erforderliche Leistung werden Regeleinrichtungen ohne und mit Hilfsenergie unterschieden. Die bekannteste Einrichtung ohne Hilfsenergie ist die klassische Niveauregelrichtung mittels

Schwimmer und mechanisch betätigtem Ventil. Hierbei wird die Stelleistung über den als Fühler benutzten Schwimmer direkt dem System entnommen.

Bei Regeleinrichtungen mit Hilfsenergie kann eine weitere Unterteilung nach der Art der Hilfsenergie erfolgen. Danach lassen sich pneumatische, hydraulische und elektronische Einrichtungen sowie Kombinationen daraus unterscheiden. Früher waren auch elektromechanische Einrichtungen weit verbreitet.

Pneumatische Regeleinrichtungen werden bevorzugt in Anlagen eingesetzt, in denen ein Explosionsschutz gewährleistet sein muss oder in denen pneumatische Ventile direkt betätigt werden sollen [2, 3].

Der Nachteil pneumatischer Einrichtungen liegt in der geringen Signalübertragungsentfernung und in der mangelnden Flexibilität bei der Signalverknüpfung in komplizierteren Regeleinrichtungen.

Weiterhin werden hohe Anforderungen an die Reinheit der Druckluft gestellt, insbesondere muss der Wasser- bzw. Dampfgehalt sehr gering sein.

Hydraulische Einrichtungen werden vielfach in Anwendungen bevorzugt, in denen grosse Kräfte in kleinem Raum aufgebracht werden müssen. Das ist deshalb möglich, weil die Energiedichte in Hochdruckleitungen sehr hoch sein kann und weil diese Energie in Maschinen sehr kleiner Abmessungen in mechanische Energie umgesetzt werden kann [4].

Ein Nachteil liegt darin, dass ein Hydrauliköl mit sehr geringem Anteil gelöster Gase erforderlich ist und sich im System geringe Leckagen nie ganz vermeiden lassen, so dass Verschmutzungen auftreten können. Ein gewisses Gefahrenmoment stellen auch die hohen Drücke in den Leitungen dar.

Elektronische Regeleinrichtungen weisen insbesondere dann grosse Vorteile auf, wenn umfangreiche Signalverknüpfungen erforderlich sind, die sich mit elektronischen Rechenverstärkerschaltungen leicht realisieren lassen. Bei komplexen Anlagen werden teilweise auch kombinierte Einrichtungen verwendet, d.h. z.B. elektronische und pneumatische nebeneinander. Die Signalanpassung erfolgt dann über elektro-pneumatische bzw. pneumatisch-elektrische Signalumformer.

Bei einem direkten Vergleich zwischen

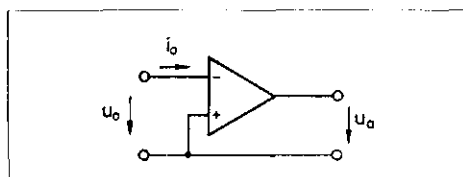
elektronischen und pneumatischen Regeleinrichtungen wird, von speziellen Anwendungen abgesehen, häufig den elektronischen Einrichtungen der Vorzug gegeben. Dabei werden neben der grösseren Flexibilität in der Signalverknüpfung vor allem die grössere Genauigkeit, grössere Signalübertragungsentfernungen und geringere Wartungskosten genannt [5]. Auch für Anwendungen, in denen Explosionsschutz gefordert wird, lassen sich elektronische Einrichtungen einsetzen, wenn die Schaltungen eigensicher aufgebaut sind, d.h., dass die Uebertragungsleistung zu gering ist, um explosive Gasgemische zu zünden.

In gerätetechnischem Sinne kann innerhalb einer Regeleinrichtung dann von einem Regler gesprochen werden, wenn in einer Einheit mehrere Aufgaben zusammengefasst sind. Ein Regler muss jedoch den Vergleich für Führungsgrösse und Regelgrösse sowie mindestens ein weiteres wesentliches Bauglied wie z.B. Verstärker und Zeitglieder enthalten. Häufig ist ausserdem eine Stellmöglichkeit für die Reglerparameter und eine Sollwertvergabe mit Regeldifferenzanzeige vorhanden. Im folgenden sollen die Prinzipien und das Verhalten von elektronischen Reglern näher erläutert werden. Da diese heute in der Regel mit Hilfe von beschalteten Rechenverstärkern realisiert werden, wird kurz über deren Grundzüge berichtet. Dann folgt ein Ueberblick über stetig und un stetig wirkende Regler mit einem anschliessenden Ausblick auf zukünftige Entwicklungen. Abschliessend soll dann noch kurz auf praktische Einstellregeln für Regler eingegangen werden. Zum Verständnis der mathematischen Beschreibung der Regler sind lediglich Grundkenntnisse der komplexen Rechnung, der Differential- und Integralrechnung und der Grundlagen der Elektrotechnik erforderlich.

2. Elektronischer Rechenverstärker

Allgemein gesehen ist ein Verstärker eine Einrichtung, die zur Leistungsverstärkung dient. Beim elektronischen Rechenverstärker bezieht sich die Leistungsverstärkung auf elektrische Signale. Die Eingangsstufe eines Rechenverstärkers ist zur Verringerung der Drift und zur Unterdrückung gleichphasiger Signalanteile in jedem Fall eine Differenzstufe, d.h., dass die zwei Eingangssignale mit unterschiedlichen Vorzeichen bewertet werden [6]. In Abb. 1 ist das Symbol eines Rechenverstärkers dargestellt. Der nichtinvertierende Eingang wird in der Regel auf den gemeinsamen Bezugspunkt gelegt, so dass sich sowohl das Eingangspotential als auch das Ausgangspotential

Abb. 1 - Symbol eines Rechenverstärkers.



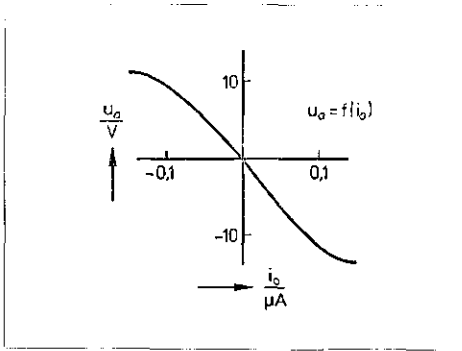


Abb. 2 - Kennlinie eines Rechenverstärkers.

auf einen Bezugspunkt beziehen und der Rechenverstärker als aktiver Dreipol mit Vorzeichenumkehr betrachtet werden kann. Die hervorstechendsten Eigenschaften eines elektronischen Rechenverstärkers, der z.B. in Form eines integrierten Transistorverstärkers (IC) realisiert ist, sind seine hohe Verstärkung (bis 10^6) und seine grosse Breitbandigkeit, d.h. seine Verstärkungsfähigkeit von Gleichspannung bis zum MHz-Bereich. Damit lässt sich durch eine frequenzabhängige Beschaltung des Rechenverstärkers ein bestimmtes dynamisches Verhalten erreichen, dass im interessierenden Betriebsbereich nur noch durch die Beschaltung und nicht mehr durch den Verstärker selbst bestimmt wird.

Der für eine Aussteuerung im linearen Bereich von z.B. $-10\text{ V} < u_a < 10\text{ V}$ benötigte Steuerstrom liegt bei guten Verstärkern in der Grössenordnung von z.B. $-0.1\ \mu\text{A} < i_b < 0.1\ \mu\text{A}$, so dass sich die in Abb. 2 gezeigte Kennlinie $u_a = f(i_b)$ ergibt. Diese Kennlinie kann eine mehr oder weniger ausgeprägte Temperaturabhängigkeit aufweisen. Die zugehörige Steuer-spannung u_0 liegt meist unter 1 mV .

Durch eine Beschaltung im Eingangs- und Rückführungspfad kann ein bestimmtes dynamisches Verhalten erzielt werden. Abb. 3 zeigt einen beschalteten Rechenverstärker mit den allgemeinen Impedanzen Z_1 und Z_2 als Beschaltungselemente. Es gelten die folgenden Zeigergleichungen für den eingeschwungenen Zustand bei sinusförmiger Anregung:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_0}{Z_1}$$

$$I_2 = - \frac{U_a - U_0}{Z_2}$$

$$I_0 = I_1 - I_2$$

I_0 und U_0 können wegen der hohen Verstärkung vernachlässigt werden, sodass sich folgende Gleichung ergibt:

$$\frac{U_a}{U_1} = F(j\omega) = - \frac{Z_2}{Z_1}$$

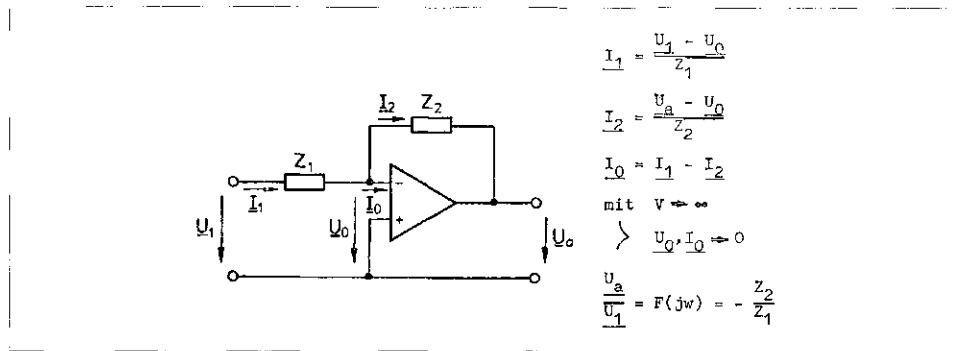


Abb. 3 - Beschalteter Rechenverstärker.

$$I_1 = \frac{U_1 - U_0}{Z_1}$$

$$I_2 = \frac{U_a - U_0}{Z_2}$$

$$I_0 = I_1 - I_2$$

mit $v \rightarrow \infty$
 $\} U_0, I_0 \rightarrow 0$

$$\frac{U_a}{U_1} = F(j\omega) = - \frac{Z_2}{Z_1}$$

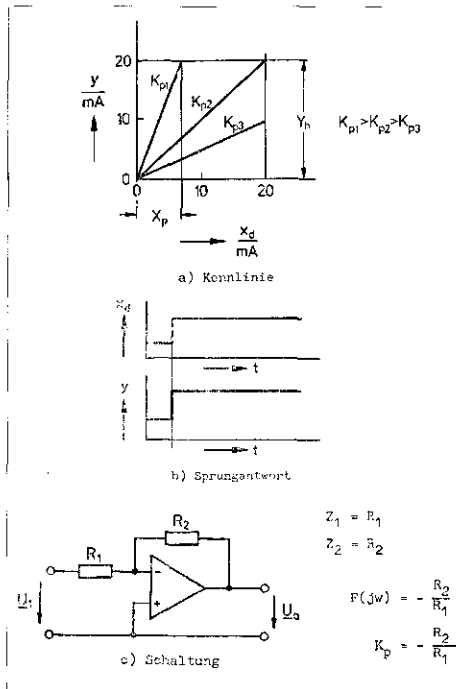


Abb. 4 - Elektronische P-Regler.

$F(j\omega)$ wird der Frequenzgang der Schaltung genannt und ist das Verhältnis des Zeigers der sinusförmigen Ausgangsspannung U_a zum Zeiger des sinusförmigen Eingangsspannung U_1 im eingeschwungenen Zustand als Funktion der Kreisfrequenz ω für alle Frequenzen im Gültigkeitsbereich der Annahme, dass I_0 und U_0 vernachlässigt werden können und die Phasendrehung durch den Rechenverstärker 180° beträgt. Durch Einsetzen spezieller Impedanzen für Z_1 und Z_2 lassen sich aus der Grundschaltung nach Abb. 3 eine Reihe von Schaltungen mit speziellem dynamischen Verhalten ableiten, von denen die stetigen Regler nur Sonderfälle darstellen.

3. Stetige Regler

Bei stetigen Reglern kann die Ausgangsgrösse im stationären Zustand jeden Wert innerhalb des Stellbereiches annehmen. Im folgenden werden einige der am meisten verwendeten stetigen Regler beschrieben.

Dabei erfolgt die Gliederung nach den charakteristischen Eigenschaften der Regler. Die in der Praxis verwendeten elektronischen Regler sind in der Regel für ein Einheitssystem bestimmt. Das bedeutet, dass sowohl der Eingangs- als auch der Ausgangssignalbereich festgelegt ist und vor- bzw. nachgeschaltete Geräte im selben System arbeiten müssen. Vor allem aus Gründen der Austauschbarkeit von Geräten und Reglern auch mit solchen anderer Hersteller ist dies sehr zweckmässig. Bei den elektronischen Reglern wird überwiegend mit einem eingepprägten Gleichstrom im Bereich von $0 - 20\text{ mA}$ bzw. $4 - 20\text{ mA}$ gearbeitet.

3.1. Proportional-Regler (P-Regler)

Beim P-Regler ist jeder Regeldifferenz aus Führungs- und Regelgrösse ein bestimmter Wert der Ausgangsgrösse zugeordnet. Es gilt damit die folgende Gleichung:

$$y - y_0 = K_P (w - x) = K_P \cdot x_d$$

Darin ist y die Ausgangsgrösse des Reglers, K_P ist die Kenngrösse des P-Reglers, w die Führungsgrösse, x die Regelgrösse, x_d die Regeldifferenz ($w-x$) und y_0 der Wert von y für $x_d = 0$.

In Abb. 4a) ist die Kennlinie des P-Reglers dargestellt, um den Begriff P-Bereich X_P zu erläutern. Dies ist danach der Bereich, um den sich die Regeldifferenz x_d ändern muss, um die Stellgrösse über den Stellbereich (z.B. $Y_h = 20\text{ mA}$) auszusteuern. Häufig wird der normierte P-Bereich in Prozenten angegeben, der sich ergibt, wenn der P-Bereich X_P auf den Regelbereich am Eingang (also 20 mA) bezogen wird. Werte von mehr als 100% bedeuten dabei dass am Eingang mehr als 20 mA nötig wären, um den Ausgang voll auszusteuern. Zur Kennzeichnung des dynamischen Verhaltens einer Schaltung wird neben dem schon erläuterten Frequenzgang häufig auch die Sprungantwort herangezogen. Die Sprungantwort stellt den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgrösse einer Schaltung als Ergebnis einer Sprungfunktion am Ein-

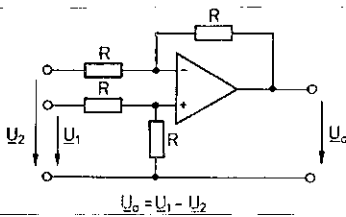


Abb. 5 - Vergleicherschaltung.

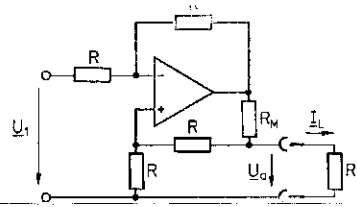
gang dar. In Abb. 4b) ist die Sprungantwort eines P-Reglers wiedergegeben.

Abb. 4c) zeigt einen als P-Regler beschalteten Rechenverstärker mit der Gleichung für den Frequenzgang, bei dem die Kenngröße K_P bestimmt wird durch das Verhältnis der Widerstände, wenn U_1 die Regeldifferenz und U_a die Ausgangsgröße darstellen.

Als Vergleich für die Bildung der Regeldifferenz aus Führungs- und Regelgröße kann eine vorgeschaltete Einheit verwendet werden, wie sie z.B. in Abb. 5 gezeigt ist. Mit einer Ableitung, die ähnlich der für den allgemein beschalteten Rechenverstärker nach Abb. 3 durchgeführt wird, ergibt sich, dass die Ausgangsspannung aus der Differenz der beiden Eingangsspannungen resultiert. Um die eingepprägten Ströme am Eingang bei Verwendung im Einheitssystem in Spannungen umzusetzen, können zwei gleiche Widerstände gegen die Bezugsleitung geschaltet werden, die in ihren Werten niederohmig gegen die Beschaltungswiderstände sind. Dies ist in Abb. 5 nicht eingezeichnet.

Als Ausgangsschaltung ist zusätzlich zu dem Vergleich nach Abb. 5 für den P-Regler nach Abb. 4c) noch eine Spannungs-Stromumsetzung erforderlich, wie sie z.B. in Abb. 6 gezeigt ist. Der Messwiderstand R_M bestimmt in dieser spannungsgesteuerten Stromquelle den Ausgangsstrom I_L , unabhängig vom Lastwiderstand R_L , sofern dieser Widerstand sehr klein ist gegenüber den Beschaltungswiderständen R und solange die Ausgangsspannung U_a im Arbeitsbereich des Rechenverstärkers bleibt. Bei der Serienschaltung der drei Stufen Vergleich, Charakteristik und gesteuerte Stromquelle ergibt sich eine dreifache Vorzeichenumkehr, die sich über alles als einfache Vorzeichenumkehrung auswirkt. Falls dies nicht erwünscht ist, kann eine Kompensation durch die richtige Beschaltung der beiden Eingänge in dem Vergleichler erfolgen.

In einem derartigen Konzept, dass hier hauptsächlich des besseren Verständnisses und der Uebersichtlichkeit wegen gewählt wurde, sind die beiden Stufen Vergleichler und spannungsgesteuerte Stromquelle allen stetiger Reglern gemeinsam. Lediglich die mittlere Stufe bestimmt das charakteristi-

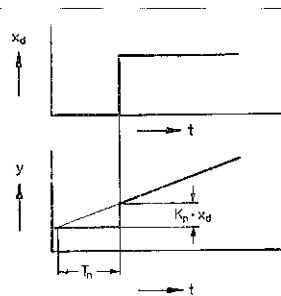


$$\bar{I}_L = - \frac{U_1}{R_M} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_L}{2R}}$$

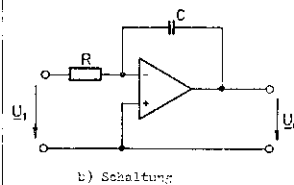
$$R_L \ll 2R$$

$$I_L = - \frac{U_1}{R_M}$$

Abb. 6 - Spannungsgesteuerte Stromquelle.



a) Sprungantwort



b) Schaltung

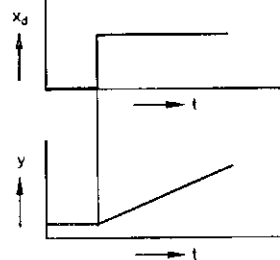
$$Z_1 = R$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C}$$

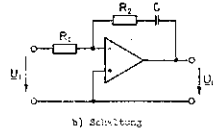
$$F(j\omega) = - \frac{1}{j\omega RC}$$

$$K_I = - \frac{1}{RC}$$

Abb. 7 - Elektronischer I-Regler.



a) Sprungantwort



b) Schaltung

$$Z_1 = R_1$$

$$Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C}$$

$$F(j\omega) = - \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{j\omega R_2 C} \right)$$

$$K_P = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$T_n = R_2 C$$

Abb. 8 - Elektronischer PI-Regler.

sche Verhalten der unterschiedlichen Reglerarten.

3.2. Integral-Regler (I-Regler)

Beim I-Regler ist jeder Regeldifferenz aus

Führungs- und Regelgröße eine bestimmte Aenderungsgeschwindigkeit der Ausgangsgröße zugeordnet. Die Aenderung der Ausgangsgröße ist damit proportional dem Zeitintegral der Regeldifferenz, sodass sich folgende Gleichung ergibt:

$$y - y_0 = K_I \int (w - x) \cdot dt = K_I \int x_d \cdot dt$$

Darin stellt K_I die Kenngröße des I-Reglers dar und y_0 den Anfangswert der Ausgangsgröße bei $t = 0$. Häufig wird für I-Regler auch die Integrierzeit T_I angegeben, die sich aus dem Reziprokwert von K_I ergibt, wenn sowohl die Ausgangsgröße als auch die Eingangsgröße auf ihren Bereich bezogen werden.

$$T_I = \frac{Y_h}{|K_I| \cdot X_{hr}}$$

Im Einheitssystem sind Y_h und der auf den Regler bezogene Regelbereich X_{hr} gleich 20 mA.

In Abb. 7a) ist die Sprungantwort eines I-Reglers aufgetragen und in Abb. 7b) die Schaltung eines elektronischen I-Reglers dargestellt. Mit der angegebenen Gleichung für den Frequenzgang ergibt sich die Kenngröße K_I aus den Beschaltungselementen.

3.3. Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)

Beim PI-Regler ergibt sich die Ausgangsgröße aus der Addition der Ausgangsgrößen eines P-Reglers und eines I-Reglers. Die folgende Gleichung beschreibt damit das Verhalten eines PI-Reglers:

$$y - y_0 = K_P \cdot x_d + K_I \int x_d \cdot dt = K_P \left(x_d + \frac{1}{T_n} \int x_d \cdot dt \right)$$

Darin sind K_P und K_I bzw. K_P und T_n die Kenngrößen und y_0 repräsentiert die Ausgangsgröße zur Zeit $t = 0$.

Die Nachstellzeit T_n ist damit:

$$T_n = \frac{|K_P|}{|K_I|}$$

Sie lässt sich gut erläutern anhand der Sprungantwort eines PI-Reglers nach Abb. 8a). Danach ist die Nachstellzeit diejenige Zeit, die benötigt wird, um auf Grund der I-Wirkung eine gleichgroße

Ausgangsgrößenänderung zu erzielen wie sie durch den P-Anteil entsteht. Für die Realisierung elektronischer Regler mit kombiniertem Verhalten, wie z.B. beim PI-Regler, gibt es grundsätzlich auf Grund der kennzeichnenden Gleichungen die Möglichkeit, jeden Anteil für sich zu erzeugen und die Ausgangsgrößen zu addieren. Eine derartige Parallelstruktur hat den Vorteil der Uebersichtlichkeit und der auf jeden Fall entkoppelten Einstellbarkeit der Reglerkenngrößen. Der Nachteil ist der erhöhte Aufwand. In Abb. 8b) ist die Schaltung eines elektronischen PI-Reglers angegeben, die nicht als Parallelstruktur ausgeführt ist und dennoch eine entkoppelte Einstellung der Kenngrößen ermöglicht. Dies ist aus der Bestimmung der Kenngrößen durch die Beschaltungelemente auf Grund des angegebenen Frequenzganges zu ersehen. Danach kann die Nachstellzeit T_n durch Verändern der Kapazität C eingestellt werden ohne K_p zu beeinflussen und K_p durch R_1 ohne Einfluss auf T_n .

3.4. Proportional-Differential-Regler (PD-Regler)

Ein Proportional-Differential-Regler wird häufig auch als Proportional-Regler mit Vorhalt bezeichnet. Beim PD-Regler entspricht das Verhalten der Addition der Ausgangsgrößen eines P-Reglers und eines D-Reglers, bei dem der Aenderungs-geschwindigkeit der Regeldifferenz ein bestimmter Wert der Ausgangsgröße zu-geordnet ist. Damit kann das Verhalten eines idealen PD-Reglers beschrieben werden mit:

$$y - y_0 = K_p \cdot x_d + K_D \cdot \frac{dx_d}{dt} = K_p \left(x_d + T_v \cdot \frac{dx_d}{dt} \right).$$

K_p und K_D bzw. K_p und T_v sind die Kenngrößen. Die Vorhaltzeit T_v ist darin:

$$T_v = \frac{|K_D|}{|K_p|}$$

Sie kann aus der Anstiegsantwort nach Abb. 9a) gedeutet werden. Dabei stellt die Anstiegsantwort eines Systems den zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße bei einer Anstiegsfunktion mit konstanter Aenderungs-geschwindigkeit für das Eingangssignal dar. Die Vorhaltzeit ist nun diejenige Zeit, um die die Anstiegsantwort eines PD-Reglers einen bestimmten Wert der Ausgangsgröße früher erreicht als allein mit dem P-Anteil. Realisierbare elektronische PD-Regler weisen stets parasitäre Verzögerungen auf,

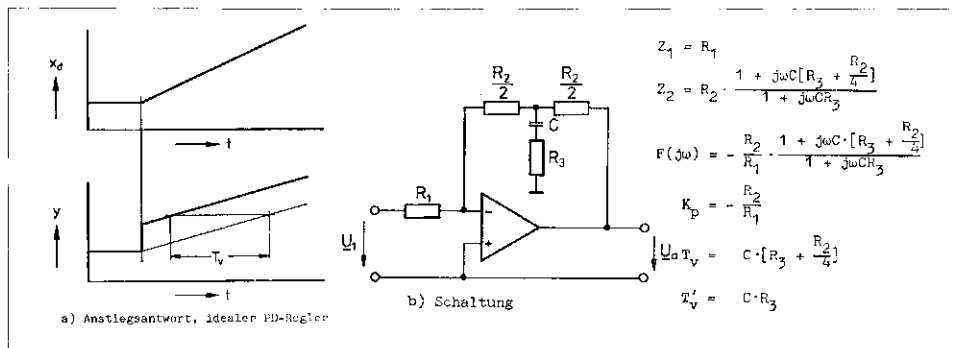


Abb. 9 - Elektronischer PD-Regler.

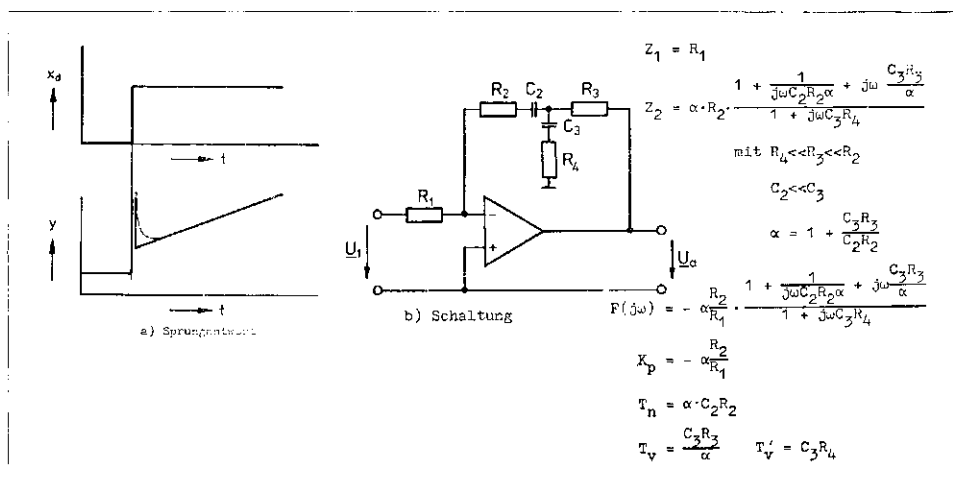


Abb. 10 - Elektronischer PID-Regler.

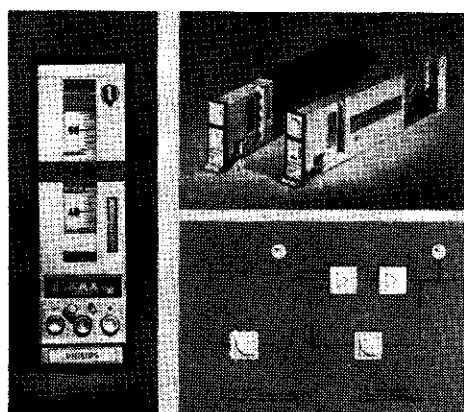


Bild 1 - Beispiel eines industriellen Reglers mit Blockschaltbild.

die zum Teil auf die nichtidealen Eigenschaften der Rechenverstärker zurückzuführen sind. Mindestens eine davon muss berücksichtigt werden. In Abb. 9b) ist eine realisierbare Schaltung für einen elektronischen PD-Regler angegeben. Aus dem angegebenen Frequenzgang ist zu erkennen, dass die Kennwerte eindeutig aus den Beschaltungelementen bestimmt sind. Als zusätzlicher Kennwert ergibt sich die parasitäre Zeitkonstante T_v' , die gegenüber der Vorhaltzeit T_v möglichst klein gewählt werden sollte.

3.5. Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Regler)

Beim PID-Regler setzt sich die Ausgangsgröße zusammen aus den Ausgangsgrößen eines P-Reglers, eines I-Reglers und eines D-Reglers. Die Gleichung für einen idealen PID-Regler lautet:

$$y - y_0 = K_p \cdot x_d + K_I \int x_d \cdot dt + K_D \cdot \frac{dx_d}{dt}$$

oder

$$y - y_0 = K_p \left[x_d + \frac{1}{T_n} \int x_d \cdot dt + T_v \cdot \frac{dx_d}{dt} \right]$$

mit den Kenngrößen K_p , K_I und K_D bzw. K_p , T_n und T_v .

In Abb. 10a) ist die Sprungantwort für einen idealen PID-Regler dargestellt (durchgezogene Kurve).

Mit der realisierbaren Schaltung nach Abb. 10b) ergibt sich ebenfalls eine parasitäre Verzögerung mit der Zeitkonstanten T_v' . Diese Schaltung realisiert den idealen PID-Regler abgesehen von der parasitären Verzögerung nur näherungsweise, da zur Erzielung des notwendigen Frequenzganges einige einschränkende Bedingungen für die Elemente in der Rückführung eingeführt werden müssen. Ueber den in den angegebenen Gleichungen eingeführten Faktor α

• *Vervolg op pagina 425*

• *Vervolg van pagina 420*

führt die Einstellung der Reglerkenngrößen T_n und T_v auch zu einer Beeinflussung der jeweils übrigen Kenngrößen. Die Sprungantwort für den realisierten PID-Regler ist gestrichelt in Abb. 10a) eingetragen. Der PID-Regler ist in der Praxis der am häufigsten realisierte Regler. Das liegt einmal daran, dass mit diesem Regler bei vielen Regelstrecken die besten Ergebnisse erzielt werden. Zum anderen ist es darauf zurückzuführen, dass in der Regel Umschaltmöglichkeiten vorgesehen sind, so dass sich auch die P-, PD- und PI-Funktion einstellen lässt.

Für die Regelstrecken in Wasserversorgungsbetrieben, die mit einem stetig stellbaren Stellglied ausgerüstet sind, lassen sich elektronische PI- oder PID-Regler gut einsetzen. Ein Regler für industrielle und verfahrenstechnische Anwendungen, der sich hierfür eignet, wird in [7a] beschrieben. In Bild 1 ist eine Ausführungsform mit dem zugehörigen Blockschaltbild gezeigt.

4. Unstetige Regler

Zu den unstetigen Reglern werden alle Regler gerechnet, deren Ausgangsgröße nicht stetig ist, d.h. nur zwei oder mehrere definierte Werte annehmen kann. Insbesondere zählen dazu Zweipunkt- und Mehrpunktregler. Aber auch die Schrittregler werden in diese Klasse eingeordnet. Teilweise werden allerdings Regler, deren unstetiges Ausgangssignal einen stetigen Mittelwert aufweist, auch zu den stetigen Reglern gerechnet.

4.1. Zweipunktregler

Zweipunktregler sind dadurch gekennzeichnet, dass ihrer Ausgangsgröße — auch bei stetig veränderlicher Eingangsgröße — nur zwei verschiedene Werte zugeordnet sind. Die Zuordnung dieser Werte bezieht sich im Beharrungszustand auf zwei Wertebereiche des Eingangssignals. Ist bei der Aenderung des Eingangssignals das im Beharrungszustand auftretende Ausgangssignal auch von der Richtung dieser Aenderung abhängig, so wird die Differenz der Eingangssignale, bei denen sich jeweils das Ausgangssignal ändert, Hysterese oder Schaltdifferenz genannt. In Abb. 11 ist die Kennlinie eines Zweipunktreglers mit Schaltdifferenz dargestellt [7, 8]. Darin sind y_1 bzw. y_2 die beiden möglichen Zustände der Ausgangsgröße, v der Sollwert und x_{sd1} die Schaltdifferenz. Diese wird häufig in Prozentwerten angegeben und bezieht sich dann auf den Eingangsbereich, z.B. im Einheitssystem auf 20 mA.

Elektronische Zweipunktregler haben in der Regel Eingänge für stetige Signale, im Einheitssystem also für eingepreßte

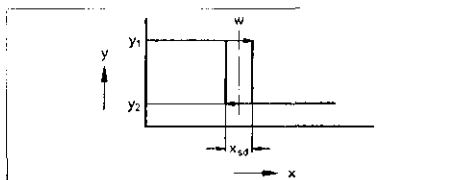


Abb. 11 - Kennlinie eines Zweipunktreglers.

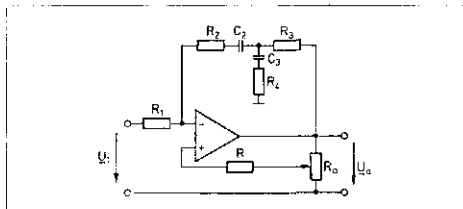


Abb. 12 - Elektronischer Zweipunktregler mit PID-Beschaltung.

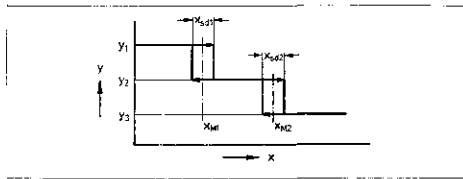


Abb. 13 - Kennlinie eines Dreipunktreglers.

Gleichströme, und am Ausgang ein elektromechanisches Relais oder einen zwei-stufigen Spannungs- oder Stromausgang. Der Einsatzbereich von Zweipunktreglern liegt im wesentlichen bei trägen Regelstrecken in der Verfahrenstechnik — insbesondere alle Temperaturregelungen —, bei denen schaltende Stellglieder wie z.B. Schaltschütze oder Magnetventile verwendet werden.

Wird ein Zweipunktregler an Regelstrecken mit Totzeit eingesetzt, so ergeben sich Regelschwingungen um den Sollwert. Durch eine zusätzliche elektronische Rückführung im Regler lassen sich diese Schwankungen vermindern. Von der Funktion her werden häufig PD- bzw. PID-Reglerstrukturen verwendet, wie sie von den stetigen Reglern bekannt sind. In Abb. 12 ist ein Beispiel für einen Zweipunktregler mit PID-Beschaltung angegeben. Ueber die Widerstände R und R_s können der Schaltungspunkt und die Schaltdifferenz festgelegt werden.

4.2. Dreipunktregler

Im Prinzip gilt für Dreipunktregler dasselbe wie für Zweipunktregler. Beim Dreipunktregler werden drei Wertebereichen des Eingangssignals im Beharrungszustand drei feste Werte der Ausgangsgröße zugeordnet.

In Abb. 13 ist die Kennlinie für einen Dreipunktregler angegeben. Darin sind y_1 , y_2 bzw. y_3 die drei möglichen Zustände des Ausgangssignals, x_{sd1} und x_{sd2} die Schaltdifferenzen an den beiden Schalt-

punkten x_{M1} und x_{M2} . Der Abstand $x_{M2} - x_{M1}$ zwischen den beiden Schaltpunkten wird tote oder neutrale Zone genannt, wenn der zugehörige Ausgangswert eine Ruhelage darstellt.

Die Anwendung von Dreipunktreglern erfolgt häufig in den Fällen, in denen z.B. ausser einer Energiezufuhr auch eine Energieabfuhr erforderlich ist. Das kann z.B. bei Temperaturregelungen auftreten, bei denen ausser Heizen auch Kühlen notwendig ist. Dann würde z.B. die Ausgangsgröße y_1 nach Abb. 13 Heizen 'EIN' bedeuten, y_2 Heizen 'AUS' und Kühlen 'AUS' sowie y_3 Kühlen 'EIN'.

Das Verhalten von Dreipunktreglern lässt sich ebenfalls in bestimmten Anwendungen durch elektronische Rückführungen verbessern, die häufig als PD- oder PID-Beschaltung ausgeführt sind.

Neben der Anwendung als echte Regler werden Zwei- und Dreipunktregler ohne Rückführung auch benutzt für Ueberwachungs- und Signalaufgaben.

4.3. Dreipunkt-Schritt-Regler

Der Dreipunkt-Schritt-Regler ist ein Dreipunktregler mit einer Kennlinie nach Abb. 13 und einer elektronischen Rückführung. Er wird stets in Verbindung mit Stellantrieben benutzt. Dann haben die Werte der Ausgangsgröße z.B. die folgende Bedeutung.

- y_1 : Motor Rechtslauf
- y_2 : Motor Stillstand
- y_3 : Motor Linkslauf

Liegt die Regeldifferenz also innerhalb der neutralen Zone, so behält der Stellantrieb seine Stellung bei, während in den beiden anderen Fällen das Stellglied vom Stellantrieb mit einer mittleren konstanten Geschwindigkeit in die eine oder andere Richtung bewegt wird.

Durch die elektronische Rückführung erhält der Regler so ein Zeitverhalten, dass der angeschlossene Motor schrittweise betätigt wird und zwar in Abhängigkeit von den eingestellten Kenngrößen und der aufgetretenen Regeldifferenz. Für die Kombination aus Motor und Dreipunkt-Schritt-Regler ergibt sich durch die integrale Wirkung des Motors ein PI-Verhalten. Damit kann diese Kombination für die Auslegung von Regelkreisen näherungsweise betrachtet werden wie ein stetiger PI-Regler [9].

In Abb. 14 ist die Sprungantwort für eine Regler-Motorkombination angegeben. Der Proportionalbeiwert K_p und die Nachstellzeit T_n sind genauso definiert wie bei stetigen PI-Reglern, wenn der zeitliche Mittelwert der Stellgröße herangezogen wird. Als Stellgröße y^1 wird die Position des Stellantriebers betrachtet. Am Ausgangs-

signal y des Reglers ist die Schaltfunktion zu erkennen. Zur Realisierung des P-Verhaltens ist dabei am Anfang ein langer Impuls erforderlich, der dann von regelmässigen kürzeren Impulsen abgelöst wird. In der Stellgrösse y^1 sind die zugehörigen Zeiten mit konstanter Geschwindigkeit zu erkennen. Statt der Geschwindigkeit wird für Stellantriebe häufig die Stellzeit T_y angegeben. Das ist die Zeit, die erforderlich ist, um einmal durch den gesamten Stellbereich zu laufen. Der Dreipunkt-Schritt-Regler findet überall dort Anwendung, wo direkt schaltbare Stellantriebe mit konstanter Stellgeschwindigkeit eingesetzt werden. Dreipunkt-Schritt-Regler lassen sich auch vorteilhaft ohne elektronische Rückführung einsetzen, wenn sie in Verbindung mit proportionalen Strecken — wie z.B. Durchflussstrecken mit kurzer Entfernung zwischen Stell- und Messort — arbeiten. Der Stellantrieb wird dann bis zur Ausregelung mit maximaler Stellgeschwindigkeit betätigt.

4.4. Digitale Regler

Digitale Regler lassen sich je nach Anschauung zu den stetigen oder un stetigen Reglern rechnen. Auf Grund ihrer digitalen Struktur haben sie un stetige Ausgangssignale, die aber häufig wegen der meist grossen Anzahl von Stufen als quasistetig bezeichnet werden können. Hier sollen sie wegen ihrer digitalen Struktur bei den un stetigen Reglern eingeordnet werden. Im Prinzip lassen sich alle Regelfunktionen digital realisieren, wenn an Eingang und Ausgang entsprechende Analog-Digital-Wandler bzw. Digital-Analog-Wandler vorgesehen werden. Dies wird z.B. praktiziert, wenn Prozessrechner als Regler im sogenannten DDC-Verfahren (Direct Digital Control) eingesetzt werden [10]. Dabei ist der Vorteil, dass ein Rechner viele Regelkreise im Zeitmultiplex, also nacheinander, bedienen kann und dabei beliebig komplizierte Regelfunktionen realisiert werden können.

Häufig wird auf DDC-Verfahren aus Gründen der Betriebssicherheit verzichtet und statt dessen der Prozessrechner zur Führungswertvorgabe für konventionelle Regler benutzt. Diese Regler sind dann so aufgebaut, dass sie bei Ausfall des Rechners solange mit dem zuletzt ausgegebenen Sollwert weiterarbeiten bis der wieder in Betrieb gesetzte Rechner einen neuen Sollwert ausgibt oder auf die reglerinterne Sollwertvorgabe umgeschaltet wird. Der jeweilige Betriebszustand wird dabei angezeigt. Eine andere Art digitaler Regler zeigt eine Reihe von Vorteilen bei Einsatz in Systemen, in denen Frequenzen als signaltragende

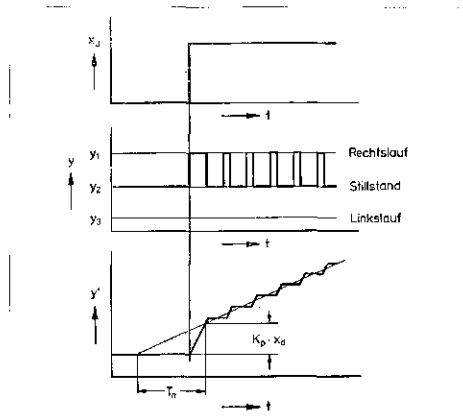


Abb. 14 - Sprungantwort eines Dreipunkt-Schritt-Reglers mit Stellantrieb.

Sprungantwort der Strecke	Regelgrösse	Regler
	Niveau	P, PI
	Kurs Lage Neutronenfluß	P, PD, PID
	Durchfluß	I, PI
	Zuteiler Förderband Mischung	I
	Druck Spannung Drehzahl	P, I, PI
	Temperatur	P, PI, PID

TABELLE I - Zuordnung Regler - Regelstrecken.

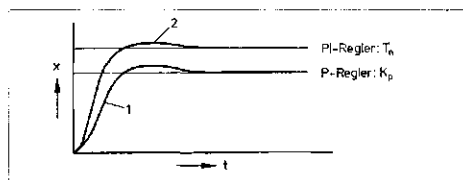


Abb. 15 - Sprungantworten zur Ermittlung der optimalen Einstellung eines PI-Reglers.

Grössen verwendet werden [11, 12, 13]. Diese Regler sind besonders gut geeignet sowohl für die Sollwertführung als auch für die Kenngrösseneinstellung durch Prozessrechner, da diese Werte digital vorgegeben werden können und keine Wandlung erforderlich ist. Das Ausgangssignal dieser Regler kann dann entweder nahezu stetig sein oder pulsdauermoduliert. Letzteres ist besonders geeignet für die Betätigung von Stellantrieben. Von den un stetigen Reglern ist der Drei-

punkt-Schritt-Regler mit und ohne Rückführung für alle mit schaltbaren Stellantrieb ausgerüsteten Regelstrecken in Wasserversorgungsbetrieben gut einsetzbar. Für allgemeine Anwendungen haben sich aus der Praxis für bestimmte Arten von Regelstrecken nur bestimmte Regler als brauchbar erwiesen. Eine Uebersicht ist in Tabelle I zusammengestellt [14]. Wesentlich für die Auswahl der Regler ist das Zeitverhalten. Dabei kann die Ausgangsgrösse stetig oder un stetig bzw. quasistetig sein, je nachdem welcher Art das Stellglied ist.

Einige Hinweise auf die Untersuchung von geregelten Wasseraufbereitungsanlagen finden sich in [15, 16, 17, 18]. Dabei wird besonders auf die Modellbildung für verschiedene Elemente einer Trinkwasseraufbereitungsanlage zum Zweck des Entwurfs der Regelung eingegangen.

5. Praktische Einstellung von Reglern

Es sind eine grosse Anzahl von Einstellregeln für die Optimierung von Regelkreise bekannt. Die überwiegende Anzahl von Verfahren arbeitet mit numerischen oder graphischen Hilfsmitteln und setzt eine weitgehende Kenntnis der Struktur und der Parameter der Regelstrecke voraus. Auf diese Verfahren soll hier nicht eingegangen werden. Es wird dazu auf das Schrifttum verwiesen, insbesondere auf [3], in dem noch weitere Hinweise zu finden sind.

Für den häufig auftretenden Fall der Einstellung eines PI-Reglers soll ein experimentelles Verfahren angegeben werden, mit dem der Proportionalbeiwert K_p und die Nachstellzeit T_n ohne genaue Kenntnis der Daten der Regelstrecke bestimmt werden können [3, 6]. Dies Verfahren liefert dann gute Ergebnisse, wenn die Regelstrecke als Verzögerungsglied mit einer grossen Zeitkonstante und einer oder mehreren kleine Zeitkonstanten dargestellt werden kann, wie es für Strecken in der Verfahrenstechnik häufig vorkommt.

Die Einstellung erfolgt in zwei aufeinander folgenden Schritten. Im ersten Schritt wird der Regler als reiner P-Regler eingesetzt. Nun wird der Proportionalbeiwert K_p so lange verändert, bis sich eine Sprungantwort für den geschlossenen Kreis mit geringem Ueberschwingen von ca. 4 % entsprechend der Kurve 1 in Abb. 15 einstellt. Im zweiten Schritt wird die Nachstellzeit T_n des mit PI-Regler geschlossenen Kreise unter Beibehaltung der Einstellung des Proportionalbeiwertes K_p so lange verändert, bis sich wieder eine Sprungantwort als Reaktion auf einen Führungsgrössensprung mit einem geringen Ueberschwingen von ca. 4 % einstellt. Die Kurve 2 in

Abb. 15 zeigt diese Sprungantwort. Die sich auf diese Weise ergebende Einstellung der Kenngrößen ist im Sinne des sogenannten Betragsoptimums optimal.

Ein zweites experimentelles Verfahren soll kurz skizziert werden. Es ist das klassische Verfahren von Ziegler und Nichols [19]. Dabei wird der Regelkreis zunächst mit reinem P-Anteil des Reglers geschlossen und der Proportionalbeiwert K_P so lange verändert, bis das System anfängt zu schwingen, also instabil wird. Der zugehörige Wert wurde mit K_{PK} bezeichnet und gleichzeitig die Schwingungsdauer T_K bestimmt. Dann ist die günstigste Einstellung der verschiedenen Regler:

- P-Regler $K_P = 0,5 \cdot K_{PK}$
- PI-Regler $K_P = 0,45 \cdot K_{PK} \quad T_n = 0,85 \cdot T_k$
- PID-Regler $K_P = 0,6 \cdot K_{PK} \quad T_n = 0,5 \cdot T_k$
 $T_v = 0,12 T_k$

Bezüglich der Regelstrecke gelten die gleichen Voraussetzungen wie beim ersten Verfahren, sodass auch diese Methode auf den überwiegenden Teil der Strecken in der Verfahrenstechnik anwendbar ist. Der Nachteil bei diesen Verfahren ist, dass zur Bestimmung der kritischen Werte das System zum Schwingen gebracht werden muss. Das ist aus technologischen Gründen nicht bei allen Strecken zulässig.

6. Zusammenfassung

Nach einer Abgrenzung gegenüber anderen Reglerarten wird eine Uebersicht über elektronischer Regler gegeben. Da der Grundbaustein dieser Regler die elektronischen Rechenverstärker sind, wird kurz auf deren Verhalten insbesondere auch bei allgemeiner Beschaltung eingegangen. Anschliessend werden die verschiedenen Typen von stetigen Reglern erläutert. Nach der Beschreibung von Zwei- und Dreipunktreglern erfolgt ein Hinweis auf digitale Regler und die Einsatzmöglichkeit von Prozessrechnern für Regelzwecke. Abschliessend wird noch kurz auf zwei praktische Verfahren zur Einstellung von Reglern hingewiesen.

Literaturverzeichnis

1. Regelungstechnik und Steuerungstechnik: Begriffe und Benennungen, Deutsche Normen, DIN 19226, Mai 1968, Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30 und Köln.
2. Leonhard, W., Einführung in die Regelungstechnik, Vieweg Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1969.
3. Oppelt, W., Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge, Verlag Chemie, Weinheim, 1964.
4. Gille, J. C., Pelegrin, M., Decaulne, P., Lehrgang der Regelungstechnik, Band II, Oldenbourg Verlag, München, 1963.
5. De Lancy, M. M., A Chemical Company's survey gives Erge to Electronic Instruments,

Control Engineering, 8 (1961), nr. 10, S. 82-84.

6. Xander, K., Enders, H. H., Regelungstechnik mit elektronischen Bauelementen, Werner Verlag, Düsseldorf, 1970.
7. Withof-Hauptkatalog 1974, Bausteine der Automation, Fa. Withof, Kassel; Philips Elektronik Industrie, Gesamtkatalog 1974; PCS, Complete Process Control, Philips-Brochure.
- 7a. Mengel, W., Der PCS-Regler I, ein Regler für industrielle und verfahrenstechnische Prozesse, Manuskript eines Vortrages auf Einladung des RKW-Berlin am 22.4.1970, Akademischer Verein Hütte, Berlin (Fa. Withof, Kassel, ein Philips-Unternehmen).
8. Kenngrößen für Regler, VDI/VDE Richtlinie Nr. 2189, Blatt 1 VDE-Verlag, Berlin.
9. Neumann, B., Dreipunktregler, Energie und Technik, Oktober 1968, S. 327-330.
10. Amrehn, H.: Direkte digitale Regelung, Regelungstechnische Praxis, Teil I: 1968, H. 1, S. 24-31; Teil II: 1968, H. 2, S. 55-57.
11. Klinck, M., Ein digitaler Einzelregler für frequenzanaloge Messwerte ETZ-B, 24 (1972), H. 13, S. 328-330.
12. Lemmrich, J., Frequenzanaloge Universalregler, Regelungstechnische Praxis, 16 (1974) H. 10, S. 249-254.
13. Kalis, H., Klinck, M., Landvogt, G., Lemmrich, J., Schröder, G., Frequenzanalogen Prozessführungssystem, Elektronik, 1974, H. 10, S. 361-364.
14. Merz, L., Grundkurs der Regelungstechnik, R. Oldenbourg Verlag, München, 1963.
15. Klinck, M., The input/output behaviour of a level-controlled rapid sand filter. Proceedings of the IFAC Symposium on: Control of Water Resource Systems, Haifa, Israel, 17. - 21. Sept. 1973.
16. Klinck, M., The start-up model of a rapid sand filter. Proceeding of the conference: Computer Uses in Water Systems, Reading, UK, 25. - 27. Sept. 1973.
17. Klinck, M., Simulation aided design of the dynamic behaviour for some elements of a surface water treatment plant. Proceedings of the IFIP Working Conference: Modelling and Simulation of Water Resources Systems, Gent, Belgien, 30. Juli - 2. Aug. 1974.
18. Klinck, M.: Simulation aided design of the automatic control concept for a water treatment plant. Proceedings of the AICA Symposium on: Hybrid Computation in Dynamic Systems Design, Rom, Italien, 11. - 14. Nov. 1974.
19. Ziegler, J. G., Nichols, N. B., Optimum settings for automatic controller, Trans. ASME 64 (1942) 759.

T_v	Vorhaltzeit
T_v'	parasitäre Zeitkonstante
T_y	Stellzeit
u	Spannung
U	Wechselspannungszeiger
w	Führungsgrösse
x	Regelgrösse
x_d	Regeldifferenz
X_n	Regelbereich
X_{nR}	Regelbereich am Eingang des Reglers
X_M	Schaltpunkt
X_P	Proportionalbereich
X_{sd}	Schaltdifferenz
y	Stellgrösse
y^1	Position eines Stellantriebes
Y_n	Stellbereich
Z	Impedanz
α	Faktor
ω	Kreisfrequenz



Formelzeichen

C	Kapazität
dt	Zeitdifferential
F(j ω)	Frequenzgang
i	Strom
I	Wechselstromzeiger
j	imaginäre Einheit, j ² = -1
K_D	Differenzierbeiwert
K_I	Integrierbeiwert
K_P	Proportionalbeiwert
K_{PK}	kritischer Proportionalbeiwert
R	Widerstand
t	Zeit (laufend)
T_I	Integrierzeit
T_K	kritische Schwingungsdauer
T_n	Nachstellzeit