

Grundlagen der Hydraulik und Regelung

1. Grundlagen der Rohrnetz- und Pumpenauslegung

- Die Kenntnis folgender Begriffe und Zusammenhänge muss für das Verständnis des Zusammenspiels in hydraulischen Netzen vorausgesetzt werden: Druckverlust in Rohrleitungen, Reihen- und Parallelschaltung von Widerständen, k_v -Wert, hydraulischer Widerstand, Pumpenkennlinie, Netzkennlinie, Betriebspunkt, Grund- und Betriebskennlinie von Regelventilen.
- Die Hydraulik einer geschlossenen Heizungsanlage kann in Analogie zur Elektrotechnik als Reihen- und Parallelschaltung unterschiedlicher hydraulischer Widerstände analysiert werden.
- Analog zum Ohmschen Gesetz der Elektrotechnik kann für die Hydraulik der Zusammenhang zwischen Druckabfall, Volumenstrom und hydraulischem Widerstand angesetzt werden.
- Hydraulische Schaltungen in Heizungssystemen können grundsätzlich in drei Abschnitte gegliedert werden:
 - Wärmeerzeugerteil
 - Wärmeverteilnetz
 - WärmeverbraucherteilÜberschneidungen sind möglich.
- Stellglieder und Regelventile sind wesentliche Bestandteile der Hydraulik, für deren einwandfreie Funktion Grundregeln einzuhalten sind.
- Normalerweise schließen Durchgangsventile aus strömungstechnischen Gründen (Geräuschverhalten, Kräfteverhalten) gegen die Fließrichtung - Ausnahme: Ventile mit Sicherheitsfunktion, z. B. mit elektrohydraulischem Antrieb.
- Einstelldrosseln sind notwendig bei zu hohen Volumenströmen (zu große - falsch ausgelegte Pumpen) um zu verhindern, dass Regelventile, bereits im Auslegungsfall drosseln müssen. Hierdurch verringert sich der Stell- und Regelbereich: das Regelventil arbeitet im Schwachlastbetrieb vermehrt im Bereich des Mengensprunges.
- Folgen einer falsch ausgelegten Hydraulik bzw. eines zu großen Regelventils sind: Temperaturschwankungen, Verschleiß des Stellantriebs.
- Einstelldrosseln zur Entlastung von Regelventilen bzw. zur Anpassung an den Auslegungsvolumenstrom sind im Rohrnetzteil mit konstantem Durchfluss vorzusehen. Durch exakte Dimensionierung von Rohrnetz und Pumpe sind diese möglichst zu vermeiden.
- Ein weiterer Einsatz von Einstelldrosseln dient der Volumenstromanpassung in Mischregelungen, z. B. die Doppelbeimischschaltung

- Fehlströmungen bei Temperaturunterschieden in Anschlussleitungen können vermieden werden durch:
 - geringe Strömungsgeschwindigkeiten
 - Erhöhung des Strömungswiderstandes im kritischen Rohrabschnitt
 - Einbau eines Bogens in der Rohrleitungsführung
 - Einbau einer dicht schließenden Rückflusssperre (zusätzlicher Widerstand!)
- Bemessungsgrundlagen für Stellglieder und Regelventile sind:
 - Nenndruck PN, Betriebsdruck PB, Ruhedruck, Satteldampfdruck PS (PB immer > PS)
 - Max. zulässige Mediumstemperatur
 - Volumenstrom \dot{V}_{100}
 - Druckdifferenz Δp_{v100}
- Die Druckdifferenz Δp_{v100} ergibt sich aus regelungstechnischen Anforderungen (Linearisierung der Kennlinie der Regelstrecke) über die Hilfsgröße Ventilautorität (siehe auch Kapitel 2!).
- Die Hydraulik ist so zu gestalten, dass die Regelstreckenlinearisierung bei möglichst niedrigen Druckverlusten im Regelventil erfolgt. Dies ist erreichbar durch möglichst kleine Widerstände (Druckverluste) in dem Teil der Rohrnetzhydraulik, in dem sich der Volumenstrom durch den Regelventileingriff verändert.
- Die zuletzt genannte Forderung hat Auswirkungen auf die Wahl von hydraulischen Komponenten (hydraulische Weiche, Differenzdruckregler, drehzahlgeregelte Pumpe) bis hin zur Auswahl des eingesetzten Kessels!
- Die einfache Regel: "Ventilautorität $\geq 0,5$ " hat ihre Grenzen und sollte durch die Forderung ersetzt werden: "Gestalte das Rohrnetz so, dass ein Mindestdruckabfall über dem Regelventil zwischen 2 - 6 kPa möglichst nicht überschritten wird".
- Ist bei Einsatz von Dreiwege-Regelventilen (Misch- oder Verteilventilen) der Druckabfall im „volumenstromkonstanten“ Anlagenteil mehr als 2...3 mal so groß als der Druckabfall im volumenstromvariablen Teil, kann auf die Auslegung mittels Ventilautorität verzichtet werden.
- Das Dreiwegeventil sollte dann nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgelegt werden!

2. Wiederholung regelungstechnischer Grundbegriffe

- Unter Regelung versteht man einen Vorgang, bei dem eine physikalische Größe (Regelgröße), z. B. Lufttemperatur, Druck und andere, aufgrund einer Messung fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe (Führungsgröße) verglichen und trotz störender Einflüsse von außen möglichst konstant oder auf vorgeschriebenen Werten gehalten wird.
- Beispiel: Man stelle sich die Temperaturregelung eines Wohnraumes vor, in dem sich ein Heizkörper befindet. Durch äußere Einflüsse, z. B. mehr oder weniger Wärmeverluste durch Fenster und Wände, schwankende Heizmitteltemperatur, Sonneneinstrahlung, mehr Beleuchtung oder Personen usw., wird die Raumtemperatur immer wieder verändert. Diese Einflüsse sind sogenannte Störgrößen z, sie sind es, die eine Regelung erforderlich machen.

- Regelgröße x ist die konstant zu haltende Größe, im Beispiel also die Raumtemperatur.
- Sollwert nennt man den gewünschten Wert dieser Größe, er wird durch die Führungsgröße w vorgegeben.
- Weicht die Regelgröße von ihrem Sollwert ab, stellt der Regler das durch Messung fest. Regelabweichung x_w : Er verändert darauf die Stellgröße y (hier: Ventilhub) derart, dass der Energiefluss im richtigen Sinn und Maß korrigiert wird.
- Weil diese Verstellung ihrerseits sich auf die Regelgröße auswirkt und vom Regler als Regelgrößenänderung gemessen wird, spricht man von einem geschlossenen Regelkreis. Dieser wird in der Regelungstechnik durch sogenannte Blockschaltbilder (Signalflusspläne) dargestellt.
- Jeder der einzelnen Blöcke stellt ein Regelkreisglied dar. Jedes Glied hat eine Eingangs- und Ausgangsgröße; z. B. ist beim Heizkörper die Eingangsgröße die Menge des Heizwassers und die Ausgangsgröße die abgegebene Wärmeleistung.
- Der gesamt Regelkreis enthält zwei Hauptgruppen:
 - die Regeleinrichtung bestehend aus:
 - Fühler
 - Regler
 - Stellantrieb
 - die Regelstrecke bestehend aus:
 - Stellventil
 - Heizkörper
 - Raum
- Die Führungsgröße w ist eine dem Regelkreis von außen zugeführte Größe, der die Regelgröße x in vorgegebener Abhängigkeit folgen soll. Sie bestimmt in der Regeleinrichtung den einzuhaltenden Sollwert der Regelgröße.
- Die Führungsgröße kann entweder konstant sein oder einen von der Zeit oder anderen Größen abhängigen Wert haben; z. B. Tag/Nachtsollwert der Raumtemperatur oder Sollwert der Vorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur.
- Die Hilfsregelgröße x_h ist eine zusätzliche Größe, die neben der Hauptregelgröße x auf den Regler einwirkt; z. B. Vorlauftemperaturregelung mit zusätzlicher Aufschaltung der Raumtemperatur als Hilfsregelgröße.
- Regelfirma, Gerätehersteller und Installateur teilen sich meist die Lieferung eines Regelkreises, wobei die Trennstellen nicht immer zwischen Regelstrecke und Regeleinrichtung liegen.
- Meist gehört das sogenannte Stellglied (Stellantrieb + Stellventil) zum Lieferumfang der Regelfirma oder des Geräteherstellers.
- Auch Pumpen, Ventilatoren und Brenner können Stellglieder eines Regelkreises sein.
- Von der Regelung zu unterscheiden ist die Steuerung. Hierunter versteht man einen Vorgang in einem System, bei dem eine (oder mehrere) Größen als Eingangsgröße eine andere Größe, die Ausgangsgröße, auf Grund der dem System eigenen Gesetzmäßigkeit beeinflusst. Man spricht dann von einer offenen Wirkungskette. Beispiel: Bei konstantem

Druckdifferenz steuert die Stellung des Ventilkegels die Größe des Durchflusses nach der Gesetzmäßigkeit des Ventils.

- Bei allen Regelkreisen ist es von Bedeutung, wie die Regeleinrichtung bei einer Sollwertabweichung eingreifen soll, z. B. schnell oder langsam, stark oder schwach. Dies hängt von den regelungstechnischen Eigenschaften der Regelstrecke ab, weshalb man das statische und dynamische (von der Zeit abhängige) Verhalten der einzelnen Glieder unterscheidet.
- Das statische Verhalten von Regelstrecken (Kennlinien)
Wenn man den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße für mehrere Zwischenwerte im Beharrungszustand aufnimmt, erhält man die Kennlinie eines Gliedes, beispielsweise die Kennlinie eines Heizkörpers oder Wärmeübertragers. Sie ist nicht linear, sondern mehr oder weniger stark gekrümmt. Am Anfang bewirkt eine geringe Zunahme der Heizwassermenge bereits eine große Wärmeabgabe.
- Weiteres Beispiel für eine Streckenkennlinie: die Durchflusskennlinie von Ventilen bei konstant gehaltenem Druckgefälle, d. h. also die Abhängigkeit des Durchflusses vom Ventilhub.
- Je nach Ausbildung der Sitz-/Kegelpartie eines Ventils erhält man die beiden Grundformen der Ventilkennlinie: linear und gleichprozentig oder davon abweichende Formen.
- Will man bei einem Heizkörper einen linearen Zusammenhang zwischen Ventilhub und Wärmeleistung erzielen, muss das dem Heizkörper vorgeschaltete Stellventil so gewählt werden, dass seine Kennlinien-Krümmung jener des Heizkörpers selbst entgegengesetzt ist. Man erhält dann eine annähernd gerade Kennlinie für die Kombination Stellventil + Heizkörper. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um ein weitgehend lastunabhängig stabiles Verhalten des Regelkreises zu erzielen.
- Die aus diesen Überlegungen abgeleitete Größe für die Kennzeichnung der Regelstrecken im Beharrungszustand ist der sogenannte Übertragungsbeiwert K_S . Allgemein wird der Übertragungsbeiwert eines Regelkreisgliedes definiert durch das Verhältnis:

$$K = \frac{\text{Änderung der Ausgangsgröße}}{\text{Änderung der Eingangsgröße}}$$

- Bezieht er sich auf die gesamte Regelstrecke, so wird der Index S angefügt und die Definitionsgleichung lautet:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

- Da hier Änderungen zwischen zwei Beharrungszuständen betrachtet werden, ist die Größe K_S nichts anderes als die Kennliniensteigung; d. h., sie wird durch die Tangente an die Kennlinie dargestellt.
- K_S nimmt abhängig vom Betriebspunkt (Ventilhub) unterschiedliche Werte an, ist also nur bei wirklich linearer Kennlinie konstant.
- Im (erwünschten) linearen Fall kann die Definitionsgleichung von K_S auch für den ganzen Stellbereich Y_h , z. B. gesamter Hubbereich eines Ventils, angeschrieben werden, und man erhält:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{X_{hS}}{Y_h}$$

Darin ist X_{hS} die maximale Änderung der Regelgröße, sie wird oft als Stellwirkung (Regelbereich der Regelstrecke) bezeichnet.

- Beispiel: Entspricht der Stellbereich Y_h einem Ventilhub von 3 mm und beträgt die zugehörige Temperaturänderung 12 K, so ist der Übertragungsbeiwert $K_S = 12K/3 \text{ mm} = 4 \text{ K/mm}$.
- Der Kehrwert des Übertragungsbeiwerts der Regelstrecke im Beharrungszustand heißt Ausgleichswert $Q = 1/K_S$.
- Dynamisches Verhalten der Regelstrecke (Übergangsverhalten).

Hierunter versteht man den Zusammenhang zwischen dem zeitlichen Verlauf der Ausgangsgröße und dem zeitlichen Verlauf der Eingangsgröße, welche den Vorgang ausgelöst hat.

- Verstellt man in einer Regelstrecke die Stellgröße y , z. B. den Ventilhub, sprunghaft und registriert man die sich einstellende Änderung der Regelgröße x , z. B. der Raumtemperatur, so erhält man die "Sprungantwort" der Regelstrecke.
- Sie wird meist experimentell ermittelt, ausgehend von einem Beharrungswert und endend wiederum mit einem Beharrungswert.
- Die bei verschiedenen Regelstrecken vorkommenden Sprungantworten sind unterschiedlich. Man unterscheidet:

1. Verzögerungslose Regelstrecke (Strecken nullter Ordnung), in der die Regelgröße der Stellgröße sofort folgt.

Beispiel: Die Durchflussmenge ändert sich hinter einem Ventil unverzögert. Ähnliches trifft für die Mischtemperatur hinter einem Mischventil zu.

2. Regelstrecke 1. Ordnung (Einspeicherstrecke)

Die Regelgröße ändert sich nach einer Ventileinstellung sofort mit einer gewissen Anfangsschwierigkeit, nähert sich danach mit stetig sinkender Geschwindigkeit ihrem Endwert. Dieses Verhalten ist charakteristisch für das Aufladen eines Speichers.

- Beispiel: Lufttemperatur hinter einem kondensatfrei gefahrenen, dampfbeheizten Luftheizer, dessen Metallmasse die (Wärme-) Speicherwirkung erzeugt. Die Lufttemperatur ändert sich hier nach einer Exponentialkurve mit der Gleichung:

$$x = x_0 \left(1 - e^{-t/T} \right)$$

x_0 = Sprung in den Beharrungstemperaturen

t = Zeit

T = Zeitkonstante

- Die Zeitkonstante T ist dabei diejenige Zeit, in der sich die Regelgröße x bei Beibehaltung der anfänglichen Geschwindigkeit über den ganzen Bereich x_0 ändern würde.
- Man kann sie auch nach den Gesetzen der Exponentialfunktion definieren als diejenige Zeit, die vergeht, bis 63,2 % der Differenz Endwert-Anfangswert erreicht werden. Sie ist im linearen Fall unabhängig von der Größe des Sprunges und eine wichtige Zeitkenngröße.

- In der Praxis findet man der Regelstrecke 1. Ordnung oft eine andere Art der Verzögerung überlagert. Sie wird durch die Totzeit T_t beschrieben und ist auf Transportvorgänge in der Regelstrecke zurückzuführen.
- Regelstrecken 2. und höherer Ordnung (Mehrspeicherstrecken). Die Sprungantwort beginnt hier mit einer horizontalen Tangente und hat einen Wendepunkt. Ursache für dieses Verhalten sind Speichervorgänge an zwei oder mehr Stellen in der Regelstrecke.
- Beispiel: Erwärmung des Wassers in einem Speicher durch eine Heizschlange. Speicherelemente sind die Heizschlange und das Wasser im Behälter. Bei dieser Art Sprungantwort unterscheidet man zwei Zeitkenngößen (nach DIN 19226):
 - a) die Verzugszeit T_u vom Zeitpunkt $t = 0$ bis zum Schnittpunkt der Wendetangente mit dem Anfangswert der Regelgröße x
 - b) die Ausgleichszeit T_g als Zeit zwischen Schnittpunkten der Wendetangente mit Anfangs- und Endwert der Regelgröße x .
- In ihrem Zahlenwert hängen diese Zeitkenngößen von verschiedenen Faktoren ab: Transportwege (verursachen echte Totzeiten) und Speicherfähigkeit der einzelnen Glieder, wie z. B. Fühler, Rohrleitung, Heizkörper, Raumbegrenzungsflächen u. a.
- Wichtig für gute Regelung ist das Verhältnis T_u/T_g (Schwierigkeitsgrad $S = T_u/T_g$), das möglichst klein sein soll, etwa 0,1 bis 0,2.
- Je mehr Speicher, desto größer wird T_u/T_g (Strecken höherer Ordnung), desto schwieriger die Regelung; z. B. bei Decken- und Fußbodenheizungen, die großes Speichervermögen haben.
- Läuft nach dem Sprung der Eingangsgröße die Ausgangsgröße x auf einen neuen Beharrungswert ein, so liegt eine Regelstrecke mit Ausgleich (proportionale oder P-Regelstrecke vor).
- Wenn die Sprungantwort nicht mehr in einen Beharrungswert einläuft, handelt es sich um eine Regelstrecke ohne Ausgleich (integrale oder I-Regelstrecke).
- Die meisten Regelstrecken der Heizungs- und Klimatechnik haben die Eigenschaft des Ausgleichs, z. B. die meisten Temperaturregelstrecken.
- Beispiel für eine Regelstrecke ohne Ausgleich: Höhenstand- oder Niveauregelstrecke: nach Öffnen eines Zuflussventils bei unveränderlichem Abfluss steigt der Höhenstand in einem Behälter, bis dieser überläuft.
- Eine Kesseltemperaturregelstrecke mit Kesselwasserdurchfluss ist eine P-Regelstrecke mit Ausgleich. X_{hs} abhängig von der Kesselleistung und dem Durchfluss. Ohne Kesselwasserdurchfluss ist die Kesseltemperaturregelstrecke eine I-Regelstrecke ohne Ausgleich; die Kesseltemperatur steigt bis zum Ansprechen der Regel- bzw. Sicherheitseinrichtung.
- Schwingungsantwort. Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke besteht darin, dass die Eingangsgröße, z. B. der Ventilhub, entsprechend einer sinusförmigen Kurve bewegt wird.
- Die Ausgangsgröße, z. B. die Raumtemperatur, wird dann ebenfalls Schwingungen ausführen. Diese stellen die Schwingungsantwort dar.

- Die Ausgangsschwingung ist gegenüber der am Eingang angelegten Schwingung in Amplitude und Phase verändert, was abhängig von der Frequenz in einem Diagramm aufgezeichnet wird (Bode-Diagramm).
- Diese Frequenzgangmethode wird vom Regelungstechniker verwendet, wenn er genauere Resultate erhalten oder schwierige Regelstrecken untersuchen will. In der täglichen Praxis der Reglereinstellung findet diese Methode nur wenig Anwendung.

2.1. Regeleinrichtung

- Die Regeleinrichtung beginnt am Messort und endet am Stellort.
- Sie enthält alle Bauglieder, die zur Beeinflussung der Regelstrecke benötigt werden.
- In der Hauptsache sind es:
 - der Fühler am Messort (z. B. ein Temperaturfühler)
 - der Sollwertgeber (z. B. an einem Bediengerät oder als veränderlicher Sollwert, z. B. bei Außentemperaturgeführter Vorlauf temperaturregelung)
 - der Vergleicher (Vergleich von Ist- und Sollwert) zur Bildung der Regelabweichung: $x_w = x - w$, bzw. der Regeldifferenz: $x_d = w - x$
 - der Stellantrieb am Stellort (Stellventil oder Klappe werden der Regelstrecke zugezählt).
- Ein einfaches mechanisches Beispiel hierfür ist eine Wasserstandsregelung. Das Fühlen übernimmt der Schwimmer, das Vergleichen der Hebel, der auch gleichzeitig das Stellventil betätigt. Ein Stellantrieb ist nicht vorhanden, der Fühler verstellt ohne Hilfsenergie das Stellglied (Regler ohne Hilfsenergie).
- Weiterentwickelte Regeleinrichtungen haben zusätzliche Bauglieder, u. a.:
 - einen Messumformer, der gemessene Werte in ein elektrisches oder pneumatisches Signal umformt, das dem Regler zurückgeführt wird;
 - einen Verstärker, der Signaländerungen verstärkt (die eigentliche Leistungsverstärkung erbringt zumeist der Stellantrieb);
 - einen Sollwertgeber, im Regler oder außerhalb an bedienungstechnisch günstiger Stelle angeordnet.
- Auch bei den Regeleinrichtungen spricht man ähnlich wie bei den Regelstrecken von der Sprungantwort.
- Verändert man die Regelgröße x , z. B. die Temperatur am Messort plötzlich, so ändert sich die Stellgröße y in bestimmter Weise. Das gleiche gilt für eine plötzliche Änderung der Führungsgröße
- Betrachtet man die Beharrungswerte vor und nach der plötzlichen Änderung, so gibt das Verhältnis

$$K_R = \frac{\text{Änderung der Stellgröße } \Delta y}{\text{Änderung der Regelgröße } \Delta x}$$

den Übertragungsbeiwert der Regeleinrichtung wieder. Er wird für Temperaturregelungen angegeben, z. B. in mm Hub/K; bei Hubangabe in % auch in %/K.

- Zur Vereinfachung und in Anlehnung an den Sprachgebrauch der Praxis wird nachstehend das Wort Regler anstelle von Regeleinrichtungen gesetzt.
- Man unterscheidet nach der Regelgröße:
 - Temperaturregler
 - Feuchtreger
 - Druckregler
 - Mengenregler usw.;
- nach der Hilfsenergie Regler ohne Hilfsenergie
 - elektrische (elektronische) Regler
 - pneumatische Regler
 - elektropneumatische Regler;
- nach dem zeitlichen Regelverhalten:
 - unstetige Regler (Schaltende Regler: Zweipunktregler, Mehrpunktregler)
 - stetige Regler wie
 - P-(Proportional-)Regler,
 - I-(Integral-)Regler,
 - PI-(Proportional-Integral-)Regler.
- PID-Regler kommen in der Haustechnik ganz selten vor (D=Differential). Das zeitliche Regelverhalten ist für die Auswahl von Reglern am wichtigsten. Es ist unabhängig von der Art der Regelgröße und der Hilfsenergie. Zweipunkt-Regler bestehen aus Fühler, Schalter und Sollwertsteller. Die Fühler für Temperatur sind in der Regel Bimetalle oder Federrohe mit Flüssigkeitsfüllung (z. B. Petroleum) oder Flüssiggasfüllung (z. B. Butan) oder Kontaktthermometer.
- Die Schalter sind
 - Magnetsprungschalter
 - Mikroschalter (mit Federsprung)
 - Quecksilberschalter.
- Das Stellglied kann nur zwei Stellungen einnehmen, z. B. bei einer elektrischen Heizung Strom "ein" und "aus", so dass die Regelgröße dauernd zwischen zwei Werten pendelt.
- Ein- und Ausschaltzeit liegen nicht beim gleichen Wert der Regelgröße, sondern es besteht eine Schaltdifferenz X_d .
- Die Temperatur steigt innerhalb der Totzeit nach Abschalten des Stroms noch etwas weiter an bis zu einem Maximum und fällt dann sägezahnartig ab.
- Im Regelkreis führt die unstetige Arbeitsweise des Zweipunktreglers zu Schwankungen der Regelgröße x um einen Mittelwert.
- Im Beispiel der Temperaturregelung ergibt sich bei mittlerer Belastung (Einschaltzeit = Ausschaltzeit) und konstanter Schaltdifferenz näherungsweise:

Temperaturschwankungen (Schwingungsbreite)

$$\Delta x = T_t / T \cdot X_h + X_d$$

T = Zeitkonstante der Regelstrecke

(Ausgleichszeit T_g bei Strecken höherer Ordnung)

T_t = Totzeit der Regelstrecke

(Vorzugszeit T_u bei Strecken höherer Ordnung)

X_h = Stellwirkung (max. Temperaturdifferenz) in °C

X_d = Schaltdifferenz des Reglers in °C

Schaltperiode T_0 , d. h. Dauer einer Schwingung ist abhängig von der Belastung $\varphi = x/X_h$.

- Die Schaltfrequenz ist $f = 1/T_0$. Bei Regelstrecken höherer Ordnung sind statt der Totzeit T_t die Verzugszeit T_u statt der Zeitkonstanten T die Ausgleichszeit T_g zu setzen.
- Bei Raumtemperaturreglern wird eine wesentliche Verbesserung des Regelergebnisses durch einen Rückführwiderstand ermöglicht, wobei dem Fühler durch einen Heizwiderstand während der Einschaltdauer des Reglers eine höhere Temperatur vorgetäuscht wird.
- Der Regler schaltet bereits vor Erreichen der Raum-Solltemperatur ab. Die Temperaturschwankung wird stark verringert, die Schaltfrequenz jedoch erhöht. Außerdem ergeben sich lastabhängig bleibende Regelabweichungen.
- Verwendung als Kesselregler, Sicherheitsregler, Frostschutzregler u. a., Druckschalter bei Luftkompressoren. Nichtelektrische Zweipunktregler sind z. B. Schwimmer in Kondensatableitern.
- Bei elektrischen Dreipunktreglern kann das Stellglied auch eine Zwischenstellung einnehmen, z. B. "aus" - "klein" - "groß" oder "zu" - "halb" - "auf" oder "aus" - "1. Stufe" - "2. Stufe".
- Verwendung z. B. bei zweistufigen Ölbrennern mit zwei Düsen oder bei kleinen Klimageräten zur Umschaltung von Heizung auf Kühlung.
- Auch um einen Stellmotor links oder rechts laufen zu lassen, werden Dreipunktregler verwendet. Z. B. bei einer Druckregelung läuft der Motor rechts oder links, je nachdem, ob der Minimal- oder Maximalkontakt geschlossen hat. In den Zwischenablagen steht der Motor.
- Nachteilig ist die immer vorhandene Schwingung und die bleibende Regelabweichung der Regelgröße x.
- Ähnlich wirken Doppelthermostate mit Folgekontakt, bei denen die Sollwertesteller mechanisch miteinander gekoppelt sind.

2.2. Proportionalregler (P-Regler)

- Bei diesen Reglern besteht im Beharrungszustand eine feste Zuordnung zwischen Regelgröße x und Stellgröße y. Für kleine Änderungen der Regelgröße gilt immer

$$\Delta y = K_R \cdot \Delta x \quad \text{oder} \quad K_R = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Hierin ist K_R der Übertragungsbeiwert des Reglers.

- Bei linearen P-Reglern kann man auch schreiben

$$K_R = Y_h / X_p$$

mit Y_h = Stellbereich, d. h. ganzer Ventil- oder Klappenhub.

- Die Größe X_p ist der Proportionalbereich (P-Bereich) des Reglers. Er stellt den Betrag der Regelabweichung dar, bei der die Stellgröße den ganzen Stellbereich Y_h durchläuft. Der P-Bereich wird beispielsweise in K oder in Prozent des Regelbereichs X_h angegeben. Er ist bei den meisten Reglern einstellbar. Ein P-Bereich von $2 K$ bedeutet, dass der gesamte Stellbereich Y_h bei einer Regelabweichung von $2 K$ vom Sollwert durchfahren wird.
- Infolge der festen Zuordnung der Stellgröße zur Regelgröße entstehen im Regelkreis mit P-Reglern bleibende Regelabweichungen. Diese sind um so größer, je größer der P-Bereich ist und je mehr der momentane Betriebspunkt vom Eichpunkt (Arbeitspunkt) des Reglers abweicht. Das ist ein Nachteil aller P-Regler, der unter bestimmten Bedingungen deren Verwendung ausschließt.
- Bei sehr kleinem P-Bereich nähert sich der P-Regler in seiner Arbeitsweise dem Zweipunktregler, so dass die Regelgröße Schwingungen ausführt. Die bleibenden Regelabweichungen können deshalb durch Verkleinerung des P-Bereiches nicht in beliebigem Maße herabgesetzt werden.
- Wichtig für die Stabilität (Schwingungsfreiheit) der Regelung ist die sogenannte Kreisverstärkung, gebildet aus den Übertragungsbeiwerten K_S für die gesamte Regelstrecke und K_R nur für den Regler:

$$V_0 = K_R \cdot K_S = \frac{Y_h}{X_p} \cdot \frac{X_h}{Y_h} = \frac{X_h}{X_p}$$

V_0 ist hiernach im linearen Regelkreis das Verhältnis des Regelbereichs (Stellwirkung) X_h zum P-Bereich X_p .

- Bei großer Kreisverstärkung V_0 (kleinem X_p):
genaue Regelung, aber Schwingungen;
bei kleiner Kreisverstärkung V_0 (großem X_p):
Stabilität, aber ungenau.
- Beispiel: Regelbereich $X_h = 12 K$, P-Bereich $X_p = 3 K$ ergibt $V_0 = 4$.
- Der richtige V_0 -Wert hängt von der regelungstechnischen Kenngröße der Regelstrecke, beispielsweise also von der Totzeit T_t und der Zeitkonstanten T ab.
- Angenähert beträgt der optimale Wert für die Kreisverstärkung

$$V_{0opt} \approx T / T_t$$

- Damit ist der günstigste Proportionalbereich

$$X_{popt} = X_h / V_{0opt} = X_h \cdot T_t / T$$

- Bei Strecken höherer Ordnung sind statt T und T_t angenähert die Größen T_g und T_u einzusetzen.

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

- Der P-Regler greift bei Störungen im Regelkreis sofort ein, kann aber deren Auswirkung nicht vollständig beseitigen (bleibende Regelabweichung). Beim I-Regler tritt im ausgeregelten Zustand keine Regelabweichung auf, aber die Korrekturen erfolgen nur langsam. Im PI-Regler sind das rasche Eingreifen des P-Reglers und die vollständige Beseitigung der Regelabweichung des I-Reglers vereinigt.
- Die Sprungantwort des PI-Reglers bei sprunghafter Veränderung der Regelgröße besteht aus zwei Teilen, dem P- und dem I-Anteil. Es erfolgt zunächst eine der Regelabweichung proportionale Verstellung des Stellgliedes, daran anschließend eine weitere Verstellung mit einer einstellbaren Geschwindigkeit.
- Die Zeit, die der I-Regler allein brauchen würde, um die gleiche Verstellung wie der P-Anteil sofort zu bewirken, nennt man Nachstellzeit T_n .
- Sie ist neben dem Proportional-Bereich X_p die zweite Kenngröße des P-Reglers. Die Nachstellzeit ist bei den meisten PI-Reglern einstellbar, hat aber bei einfachen Bauformen oftmals nur einen (festen) Wert.
- Für die optimale Einstellung des PI-Reglers gelten folgende Richtlinien:

$$X_{popt} = X_n \cdot T_t / T_{bw} = X_n \cdot T_u / T_g$$

$$T_n = (2 \dots 3) \cdot T_t \text{ bzw. } = (2 \dots 3) \cdot T_u$$

- Elektrische PI-Regler werden mit thermischer Rückführung oder elektronisch mit RC-Gliedern ausgeführt.

3. Regelung und Hydraulik in Wärme- und Energieerzeugungsanlagen

- Heizungssysteme können grundsätzlich hydraulisch in die drei Abschnitte gegliedert werden: Wärmeerzeugerteil, Wärmeverteilnetz, Wärmeverbraucherteil.
- Im Wärmeerzeugerteil ergeben sich aus den Betriebsbedingungen für den eingesetzten Wärmeerzeuger Anforderungen an die hydraulischen Schaltungen und den Einsatz ggf. eigener Kesselkreispumpen. Dies trifft im besonderen für Heizkessel größerer Leistung sowie für Wärmeerzeuger mit Sonderfunktionen, wie z. B. nachgeschalteten Abgaswärmeübertragern und bei Mehrkesselanlagen zu.
- Eine grundsätzliche Gliederung hydraulischer Schaltungen ergibt folgende Gruppen:
 - hydraulische Schaltungsteile, bei denen die Volumenströme entsprechend der geforderten Leistung im Teillastgebiet verändert werden (Mengenregelung),
 - hydraulische Schaltungen, bei denen durch Einsatz einer Pumpe die Volumenströme möglichst konstant gehalten werden, beispielsweise zur Vorlauf temperaturregelung oder zur stetigen Rücklaufanhebung für Wärmeerzeuger,
 - Schaltungen, bei denen Volumenströme unterschiedlicher Temperatur durch Einsatz von Beimischpumpen auf eine geforderte Solltemperatur gemischt werden.

- Um den Volumenstrom auf der Wärmeerzeugerseite konstant zu halten, haben sich vier typische Grundschaltungen durchgesetzt:
 - die Einhaltung eines Mindestvolumenstroms durch Einsatz einer Kesselbeimischpumpe (hiervon sollte zukünftig abgeraten werden),
 - der Einsatz einer zentralen Kesselkreispumpe mit Übergabe an die Verbraucher über ein Überströmventil (häufig eingesetzte Lösung bei atmosphärischen Gaskesseln mit Anforderungen an einen Mindestdurchfluss),
 - der Einsatz eines hydraulischen Entkopplers, durch den eine vollständige Entkopplung zwischen Wärmeerzeuger- und Wärmeverteiler- bzw. Verbrauchernetz erfolgt,
 - Einsatz von Kesseln ohne jegliche Anforderungen an einen Mindestvolumenstrom.
- Eine Vielzahl neuer hydraulischer Schaltungen ermöglicht die wirtschaftliche Einbindung der Warmwasserbereitung im Zusammenspiel mit der Heizung.
- Der beigefügte Fachaufsatz gibt Hinweise zur Regelung und Hydraulik von Ein- und Mehrkesselanlagen.

4. Regelung und Systeme

- Die bisher typische Regelung der Heizenergiezufuhr erfolgte entweder als Vorlauftemperaturregelung nach der Außentemperatur oder als Raumtemperaturregelung.
- Die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Vorlauftemperatur (Auslegungstemperaturen); Rücklauftemperatur, Volumenstrom sowie dem Einfluss dezentraler Regelung durch Volumenstromveränderung ist für das Verständnis der Heizungsregelung von Bedeutung.
- Die Außentemperatur ist nur noch sekundär Führungsgröße für den Vorlauftemperatursollwert.
- In zunehmendem Maße bestimmen bei Gebäuden mit sehr guter Wärmedämmung (Niedrigenergiehäuser) das dynamische bzw. instationäre Verhalten durch räumlich bzw. zeitlich eingeschränkten Heizbetrieb, durch den wachsenden Anteil des Lüftungswärmebedarfs und durch den hohen Anteil an Solarwärmegewinnen und inneren Wärmequellen die Auslegung aller Komponenten einer Heizungsanlage.
- Auch die Regelung muss entsprechend flexibel direkt auf die Heizlastanforderung reagieren.
- Die stationäre Heizlast (witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung) bzw. der Wärmebedarf nach DIN 4701 wird deshalb an Bedeutung im zukünftigen Niedrigenergiehaus verlieren.
- Ein angepasstes Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung dynamischer Lasten liegt als gültige technische Regel bisher noch nicht vor.
- Ansätze sind im internationalen Normenwerk zu finden.
- Zukünftig werden sich Regelsysteme durchsetzen, welche den Vorlauftemperatursollwert nach der Heizlast bzw. nach dem aktuellen Wärmebedarf führen.
- Die Anpassung des Leistungsangebots über die Vorlauftemperatur - nicht über den Volumenstrom - wird durch selbsttätige Regelalgorithmen vorgenommen.

- Das Prinzip der FUZZY-Regelung wird bereits für kleinere Anlagen angeboten.
- Entsprechende Verfahren werden sich auch für größere Anlagen bewähren.
- In vielen Anwendungsfällen ist es sinnvoll, die zentrale Vorregelung der Wärmeerzeuger und Heizkreise durch Zonen- und Einzelraum-Regelsysteme zu ergänzen.
- In Kombination mit Zeitprogrammen lässt sich die wohnungsweise Regelung bzw. die Einzelraumregelung den Nutzungsverhältnissen optimal anpassen.
- Das Leistungsangebot bei Einzelraumregelung und wohnungsweiser Regelung muss durch variable Vorlauftemperaturen, nicht durch variable Volumenströme realisiert werden.
- Die Wärmeübertragerkennlinie, d. h. die Abhängigkeit des Wärmestroms von dem Volumenstrom bei konstanter Vorlauftemperaturen ist weitgehend auch in Fachkreisen unbekannt.
- Die Kenntnis der Wärmeübertragerkennlinie, die auch für Heizkörper gilt, führt jedoch allein zu der richtige Antwort für das dynamische Heizen.
- Hinsichtlich des Einspareffektes von zeitlich programmierten Heizpausen ist zu beachten, dass in Gebäuden mit sehr guter Wärmedämmung und in Massivbauweise der Einspareffekt immer geringer wird.
- Die Wirtschaftlichkeit von Einzelraumregelsystemen sollte in jedem Fall überprüft werden.
- Für die zukünftige Regelgerätetechnik muss die Forderung nach einfachster Bedienbarkeit bei möglichst überschaubarem Funktionsumfang an erster Stelle stehen.
- Beim Einsatz von Systemen der Gebäudeautomation, insbesondere im Verwaltungsbau ist wie bei der integrierten Gesamtplanung eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aller beteiligten Gewerke erforderlich.
- Es werden zwei Alternativen gesehen, um die Möglichkeiten von Gebäudeautomations-systemen zukünftig voll auszuschöpfen.
 1. Einstellung qualifizierten Fachpersonals durch den Betreiber, das sowohl in der Anlagentechnik als auch in der DDC/MSR-Technik versiert ist. Die Erfolgshonorierung für erzielte Einsparungen durch Einsatz von Gebäudeautomationssystemen könnte das Bedienpersonal anreizen, zum engagierten Einsparexperten im Betrieb zu werden.
 2. Ist es aus Kosten- oder anderen Gründen nicht möglich, fachlich qualifiziertes Personal einzusetzen, bleibt die Alternative des Abschlusses eines Pflege- oder Wartungsvertrages oder eine Fernüberwachung durch dafür spezialisierte Ingenieurbüros. Die kontinuierliche Überwachung und Anpassung der Regelparameter an den Prozess sowie fortlaufende Optimierungsschritte werden hierdurch gewährleistet.
- Betreibermodelle dieser Form (Performance Contracting) werden sich sicherlich mittel- und langfristig im öffentlichen, industriellen und Verwaltungsbereich durchsetzen.
- Digitale Regelkonzepte setzen sich in größeren Anlagen, zunehmend auch in Kleinanlagen stärker durch.

- Digitale MSR-Technik, DDC-Technik, GLT-Technik und damit die übergreifende Gebäudeautomation mit einer Vielzahl von Mess-, Regelungs- und Steuerungsaufgaben sind heute durch eine dezentrale bzw. verteilte Automationsstruktur mit Aufteilung in geschlossene Teilprozesse für Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen gekennzeichnet.
- Die zentrale Leitebene dient der übergeordneten Betriebsführung, Betriebsüberwachung, Störmeldung und Datenprotokollierung, während die Teilprozesse in DDC-Unterstation autark optimiert werden.
- Gebäudeautomation stellt die Summe aller Automatisierungsmaßnahmen in Gebäuden bzw. an Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung und darüber hinaus der Sicherheitstechnik, der Transporttechnik, der Elektrotechnik und der Energieversorgung dar.
- Entwicklungen der letzten Jahre zielen auf ausbaubare Gesamtkonfigurationen von einzelnen digitalen Automatisierungsstationen bis zu integrierten Systemen, welche die gesamte Gebäudeautomation integrieren.
- Integrierte Planung neuer Gebäude- und Energiesysteme als Zusammenwirken von Architekt, Bauingenieur, Versorgungsingenieur und Automatisierungsingenieur gewinnt in allen Planungsphasen zunehmend an Bedeutung.
- Die Kostendegression in der Mikroprozessortechnik hat dazu geführt, dass vorrangig dezentrale Systeme mit eigener Intelligenz zum Standard geworden sind.
- Modularer Aufbau gestattet spätere Erweiterungen bei hoher Verfügbarkeit und Flexibilität der Systeme.
- Begriffswelt und Definitionen der digitalen Gebäudeautomation sind für den Neuling zunächst einmal sehr abstrakt und werden erst dann mit Inhalt gefüllt, wenn man sich an die konkrete Planungs- und Ausführungsaufgabe mit einem zugeordneten Gebäudeautomationssystem begibt.
- Die rasche Entwicklung der Software- und Mikroprozessortechnik und die fast unbegrenzten Möglichkeiten der Verbindung (BUS) und Kommunikation einzelner Komponenten lenkt z. T. von den weiteren wesentlichen Aufgaben ab, die ebenfalls als wichtiger Bestandteil zur Gebäudeautomation gehören. Hierzu zählen:
 - optimal aufeinander abgestimmte Planung und Auslegung aller Komponenten einer Anlage der Technischen Gebäudeausrüstung,
 - saubere Rohrnetz- und Regelventilauslegung, bei der neue Erkenntnisse der wirtschaftlichen Auslegung zu berücksichtigen sind,
 - korrekte und wirtschaftliche Pumpenauswahl und -Regelung.
- Auswahl und Auslegung von Gebäudeautomationssystemen beispielsweise für eine heiztechnische Anlage hängen nicht nur von den spezifischen Bedingungen auf der Wärmeerzeuger-, Wärmeverteiler- und Wärmeverbraucherseite ab, sondern wesentlich auch von den Einsatzkriterien und Anforderungen in verschiedenen Gebäudetypen.
- Die Anforderungen an Regeleinrichtungen und -funktionen sind in Krankenhäusern, Hotels oder Bildungseinrichtungen sicherlich sehr unterschiedlich.
- Die in den z. Zt. in Bearbeitung befindlichen Richtlinien VDI 2068: "Auswahl- und Anwendungskriterien für Mess-, Regel- und Überwachungsgeräte in heiztechnischen Anlagen" und VDI 2073 "Hydraulische Schaltungen in heiz- und raumluftechnischen Anlagen" auf-

geführten hydraulischen Schaltungen und regelungstechnischen Vorschläge sind beispielsweise Grundlage eines optimierten lastabhängigen Regelung der Brenner- und Kesselstufenfolge bei Mehrkesselanlagen.

- Häufig wird die Frage gestellt, ob Planung und Ausschreibung der MSR-Technik als eigenes Gewerk erfolgen soll.
- Die Planung und Ausführung von Anlagen der Gebäudeautomation erfordern in hohem Maße interdisziplinäres Fachwissen.
- In den meisten Fällen wird es unumgänglich sein, die Gebäudeautomation als gewerkeübergreifendes System zu planen und entsprechend auszuschreiben.
- Unabhängig hiervon sind Wege zu finden, die Kosten für den hohen Planungs- und Softwareaufwand zur Erstellung und Programmierung entsprechender Gebäudeautomationsysteme in der Kalkulation und Abrechnung entsprechend zu berücksichtigen.
- Die Kommunikation zwischen den Elementen einer Gebäudeautomationsanlage spielt heute eine große Rolle.
- Sogenannte Feldbusse, wie der EIB-Bus oder der LON-Bus, die Sensoren, Aktoren, dezentrale Regler und Automatisierungsgeräte miteinander kommunizieren lassen, werden wachsende Bedeutung gewinnen. Der von staatlichen und kommunalen Verwaltungen (AMEV) forcierte firmenneutrale Datenbus (FND) hingegen hat bisher keine große Bedeutung erreicht.
- Ein praktischer und finanzieller Nutzen firmenneutraler Datenübertragung für die Gebäudeautomation konnte bisher nach Ansicht vieler Fachleute nicht nachgewiesen werden.
- Bemängelt wird der eingeschränkte Funktionsumfang als Schnittmenge der Funktionen verschiedener Systeme.
- In vielen Anwendungsfällen kann der Einsatz von Einzelraumregelsystemen in Ergänzung zu zentralen Vorregelsystemen sinnvoll sein.
- In Kombination mit Zeitprogrammen lässt sich die Einzelraumregelung Nutzungsverhältnissen anpassen.
- Es ist zu beachten, dass im zukünftigen Gebäude mit sehr guter Wärmedämmung der Einspareffekt durch Heizpausen immer geringer wird.
- In jedem Fall ist der Wirtschaftlichkeitsnachweis beim Einsatz von Einzelraumregelsystemen zu führen.
- Den Bedienmöglichkeiten von Gebäudeautomationssystemen und DDC-Einheiten ist erste Priorität bei der Auswahl, Planung und Ausführung eines Systems zuzuordnen.
- Ein bisher nicht gelöstes Problem besteht bei den meisten Systemen in der bedienerfreundlichen Änderung von Regelparametern zur besseren Anpassung an das Gebäude und an den Prozess.
- Auch hochqualifiziertes Personal ist ohne eingehende und regelmäßige wiederkehrende Schulung nicht in der Lage, die technischen Möglichkeiten der Systeme mit den vorhandenen Bedienoberflächen voll auszuschöpfen.

- Regelgerätehersteller und Anlagenbaufirmen mit MSR-Ausführung installieren das Gebäudeautomationssystem, überlassen es dann jedoch in vielen Fällen dem Betreiber, der bei der nachträglichen Veränderung von Parametern und Anpassungsalgorithmen weit überfordert ist.
- Die meisten heute am Markt angebotenen Automationssysteme bieten eine Vielzahl von Erweiterungen in Optimierungs- und Energiemanagementprogrammen.
- Auch hier gilt das vorher gesagte: "Je besser die Benutzerführung und die Bedienoberflächen des Systems, umso mehr werden die Potentiale der Energieeinsparung ausgeschöpft".
- Durch die rasche Entwicklung der Software, der Funktionsprogramme und der Mikroprozessortechnik werden ständig leistungsfähigere Anlagensysteme angeboten.
- Vertriebs-, Service- und Installationspersonal können mit der Entwicklung der verschiedenen Systeme im Entwicklungslabor des Geräteherstellers nicht mithalten.
- Es besteht die Gefahr, dass bei der Erstinbetriebnahme dem Kunden alle möglichen und denkbaren Funktionen angeboten werden, von denen ein großer Teil nicht genutzt wird.
- Aus Wettbewerbsgründen wird häufig zuviel versprochen, wobei das Angebot dann manchmal nur aus reiner "Laborsoftware" besteht. Der Kunde ist hierbei häufig das Versuchskaninchen. Grundsätzlich sollte bei der Ausschreibung und Installation eines Gebäudeautomationssystems die alte Regel gelten "manchmal ist weniger mehr".
- Die konsequente Ausschreibung und Planung eines Automationssystems nach der neuen VDI-Richtlinie 3814, Bl. 2 bietet die Chance, ein herstellunabhängiges Verfahren bei der Planung entsprechend dem Leistungsbereich 0721 des GAEB-Standard-leistungsbuches vorzusehen.

Quelle: Datenpool IfHK, FH Wolfenbüttel