

Labor für Elektrowärme I

Versuch T11: Temperaturregelung – stetige Regler -

WS/SS 20.....	Name: Matr.-Nr.:
Versuchsleiter:	Datum: Gruppe:
	Testat:

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Regelungstechnik	1
1.1 Steuerung oder Regelung.....	1
1.2 Die Größen des Regelkreises.....	4
1.3 Systembeschreibung	6
1.4 Regelkreis	10
1.4.1 Regelstrecke	12
1.4.2 Regler	14
1.5 Optimierung.....	25
1.5.1 Störungen	25
1.5.2 Optimierungsverfahren.....	26
2 Versuchsaufbau	28
2.1 Beschreibung des Temperaturregelkreises	28
2.2 Strecke	29
2.3 Regler.....	32
2.4 Datenlogger	34
2.5 Software zur Messdatenverarbeitung	35
3 Versuchsdurchführung T11	36
4 Literaturverzeichnis.....	39

1 Grundlagen der Regelungstechnik

1.1 Steuerung oder Regelung

Die Begriffe „Steuern“ und „Regeln“ werden oftmals sehr unkorrekt verwendet. Deshalb sollen diese klar gegeneinander abgegrenzt werden, bevor mit der Betrachtung von regelungstechnischen Vorgängen begonnen wird. Der Unterschied kann am besten an einem Beispiel erklärt werden. Für die Erklärungen wird die Steuerung bzw. Regelung einer Raumtemperatur gewählt. Dieses Beispiel wird auch oft in der Literatur genannt. Wie im Bild 1.1 zu sehen, wird hier die Außentemperatur gemessen und als Maß für die dem Raum zuzuführende Energie genommen.

Steuerung der Raumtemperatur:

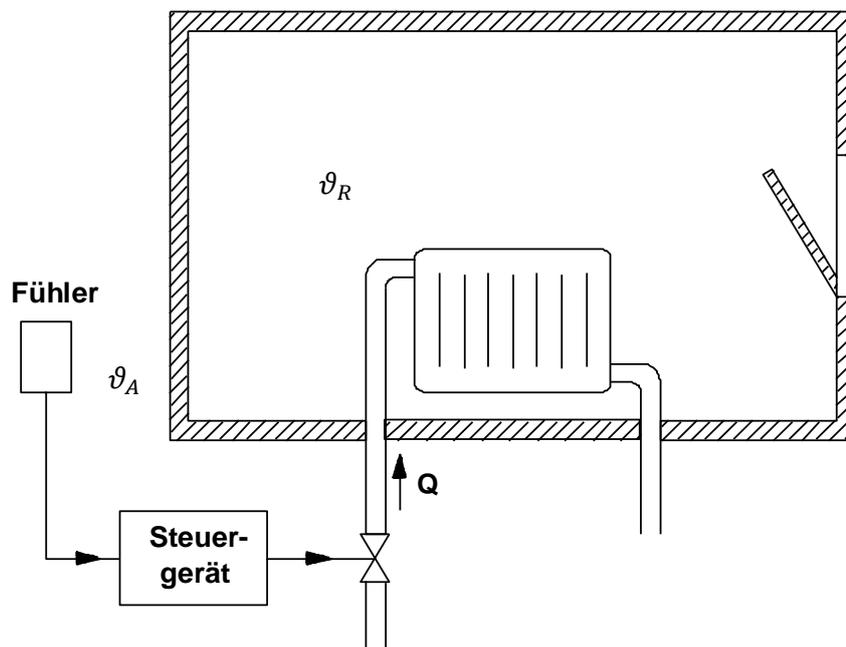


Bild 1.1 Steuerung der Raumtemperatur

Wenn nun auf Grund theoretischer Überlegungen oder durch Versuche die Verlustenergie in Abhängigkeit von der Außentemperatur bestimmt wird, kann das Steuergerät so eingestellt werden, dass die gewünschte Raumtemperatur erzielt wird. Allerdings können Störungen (wie

beispielsweise das Öffnen eines Fensters) dazu führen, dass die Raumtemperatur von der gewünschten abweicht.

Regelung der Raumtemperatur:

Damit auch Störungen keinen Einfluss mehr auf die Raumtemperatur haben, geht man von der einfachen Steuerung zur Regelung über. Bei der Regelung wird die Raumtemperatur gemessen und mit dem Sollwert verglichen (*Bild 1.2*). Ist die Raumtemperatur zu niedrig, öffnet der Regler das Ventil so weit, dass die gewünschte Temperatur erzielt wird. Ist die Raumtemperatur zu hoch, wird das Ventil weiter geschlossen, so dass der Wärmefluss abnimmt.

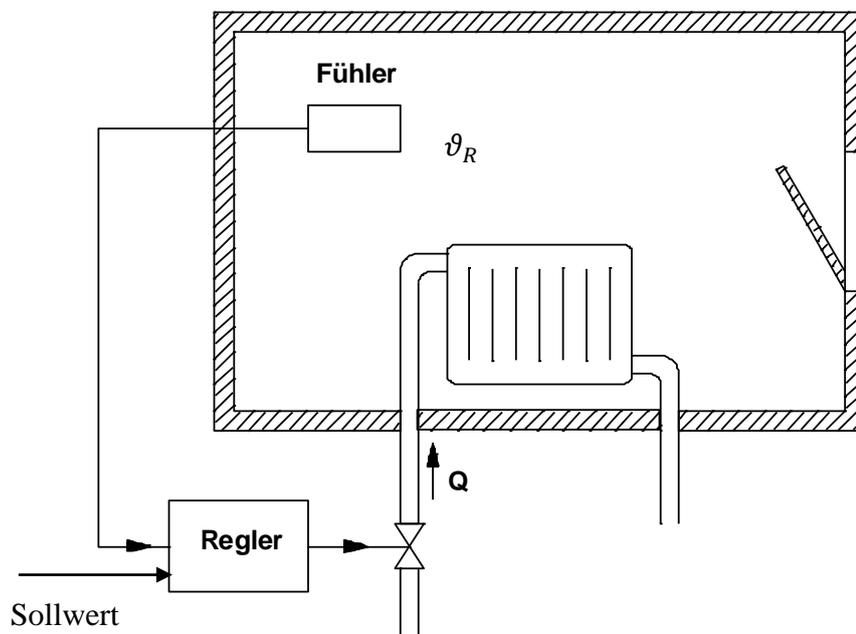


Bild 1.2 Regelung der Raumtemperatur

Vergleich von Steuerung und Regelung:

Den Unterschied ist an den beiden Blockschaltbildern (*Bild 1.3*) zu erkennen. Bei der Steuerung ergibt sich eine sogenannte Steuerkette, die auch offener Wirkungskreislauf genannt wird. Bei der Regelung wird durch die Rückkopplung über den Regler ein geschlossener Wirkungskreislauf gebildet.

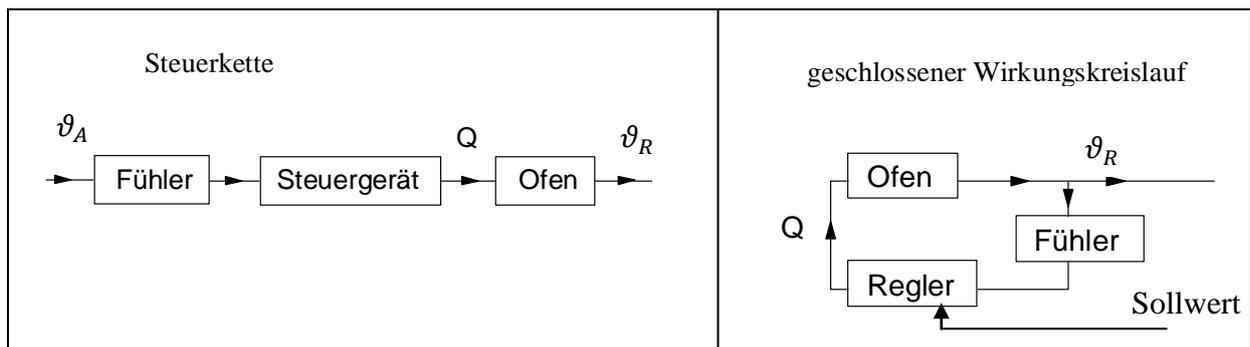


Bild 1.3 Blockschaltbilder - Steuerung und Regelung

Steuerung:

Die Steuerung ist ein offener Wirkungskreislauf, bei dem ein Eingangssignal ein Ausgangssignal beeinflusst, Störgrößen aber nicht ausgefiltert werden.

Regelung:

Kennzeichen für eine Regelung ist der Sollwert-Istwert-Vergleich, der fortlaufend in einem geschlossenen Wirkungskreislauf durchgeführt wird. Bei geeigneter Wahl des Reglers werden Störgrößen ausgeregelt.

1.2 Die Größen des Regelkreises

Die Aufgabe der Regelungstechnik ist es auch, geeignete Methoden und Verfahren bereitzustellen, mit deren Hilfe das Verhalten technischer Systeme untersucht und beeinflusst werden kann.

Unter einem System versteht man die Zusammenfassung miteinander in Beziehung stehender Teile. Das Verhalten eines Systems wird durch die physikalischen Gesetzmäßigkeiten zwischen den einzelnen Größen des Systems bestimmt. Nachdem diese physikalischen Gesetzmäßigkeiten erkannt worden sind, werden gewöhnliche starke Vereinfachungen vorgenommen. Die Systemgrößen werden als deterministische Funktionen aufgefasst und die Beziehungen zwischen ihnen als komprimierte Übertragungsglieder. Das Übertragungsverhalten kann mit Hilfe von linearen Differentialgleichungen beschrieben werden. Diese Übertragungsglieder können in einem Blockschaltbild zu einem Regelkreis, bestehend aus Regelstrecke und Regler, zusammenschaltet werden (*Bild 1.4*).

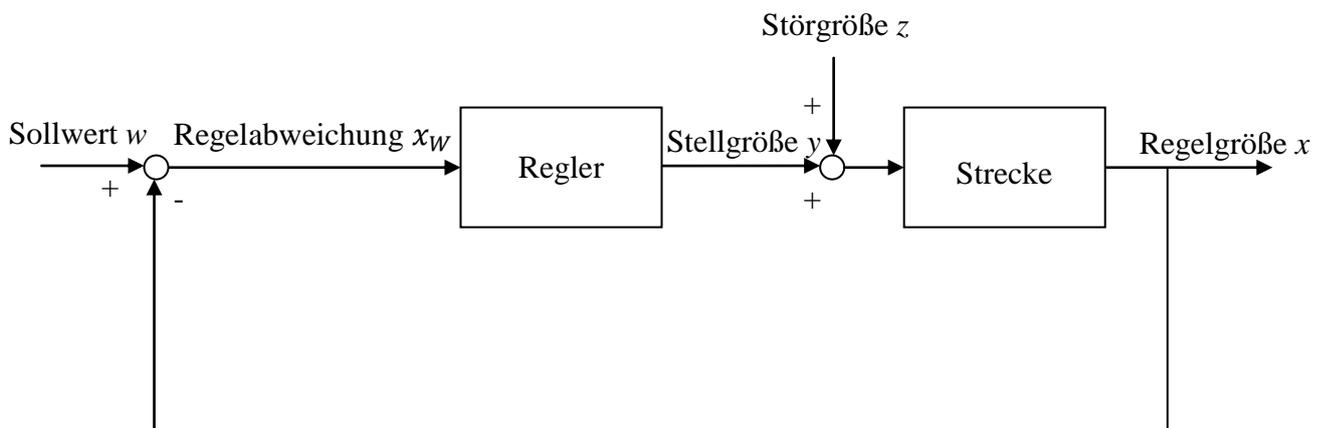


Bild 1.4 Blockschaltbild des Regelkreises

Die Strecke ist der Teil des Regelkreises, in dem eine physikalische Größe geregelt werden soll. Diese Regelgröße x wird gemessen und mit einem vorgegebenen Sollwert (Führungsgröße w) verglichen. Abhängig von diesem Vergleich, also von der Größe der Regelabweichung x_w , beeinflusst der Regler die Stellgröße y so, dass die Regelgröße sich dem Sollwert annähert.

Anhand des Blockschaltbildes ist zu erkennen, wo die Systemgrößen (Stellgröße y , Regelgröße x , Führungsgröße w , Regelabweichung x_W und Störgröße z) am Regelkreis wirken. Störgrößen könnten überall im Regelkreis angreifen, jedoch werden aus Vereinfachungsgründen alle Störungen zu einer zusammengefasst und an der gezeigten Stelle betrachtet.

Trotz der Vereinfachungen wird die „Wirklichkeit“ mit diesem Blockschaltbild recht gut dargestellt. In der Praxis muss nun überlegen werden, welche Größen den Systemgrößen im Blockschaltbild entsprechen.

Es stellen sich also folgende Fragen:

- Was soll geregelt werden (Regelgröße x)?
- Was gehört alles zur Regelstrecke?
- Wie kann sie beeinflusst werden (Stellgröße y)?
- Wie soll die Regelabweichung in die Stellgröße umgearbeitet werden?

1.3 Systembeschreibung

In der Praxis wird versucht die auftretenden Systeme durch mathematische Modelle zu beschreiben, damit ihr Verhalten analytisch erfasst werden kann und so einfache Berechnungen möglich werden.

Dies geschieht je nach Anwendungsfall und Aufgabenstellung auf unterschiedlichste Art und Weise. Jede der nachfolgenden Darstellungen beschreibt das System vollständig und eindeutig, und alle Darstellungsformen sind aus jeder anderen herleitbar. Es sollen hier nur die linearen kontinuierlichen Systeme im Zeitbereich untersucht werden.

HINWEIS:

Das Frequenzverhalten beschreibt das Übertragungssystem für sinusförmige Ein- und Ausgangssignale. Da es jedoch im Rahmen dieses Versuches nicht zur Anwendung kommt, wird auf eine ausführliche Behandlung verzichtet.

Beschreibung im Zeitbereich:

Im Zeitbereich gibt es vier Systembeschreibungen:

- Differentialgleichung
- Zustandsraumdarstellung
- Übergangsfunktion $h(t)$ (Sprungantwort)
- Gewichtsfunktion $g(t)$ (Impulsantwort)

Nachstehend sollen diese vier Systembeschreibungen näher beschrieben werden. Die ersten beiden sind mathematischer Natur. Die Darstellungen durch die Übergangs- bzw. Gewichtsfunktion sind anschaulicher, da sie konkret gemessen werden können und auch graphisch darstellbar sind. Man geht von einer speziellen Eingangserregung aus und ermittelt dann die Ausgangsgröße des Systems.

Differentialgleichung

Aus den physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Systems kann die Differentialgleichung (DGL) abgeleitet werden.

Als Beispiele für mechanische Systeme wären zu nennen:

Der Impuls- und Energieerhaltungssatz sowie das Kräfte- und Momentengleichgewicht.

Beispiele bei elektrischen Systemen:

Die Kirchhoffschen Gesetze und die Maxwellschen Gleichungen.

Beispiele bei thermodynamischen Systemen:

Die Erhaltungssätze der Energie oder Enthalpie sowie die Wärmeleitungsgesetze.

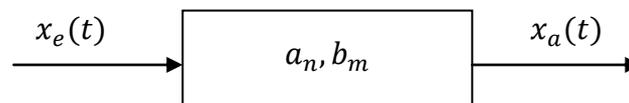


Bild 1.5 System

Bild 1.5 zeigt ein System, das durch die Koeffizienten a_n und b_m charakterisiert wird, und das mit der Systemantwort $x_a(t)$ auf die Systemerregung $x_e(t)$ reagiert. Ein solches System wird durch folgende lineare Differentialgleichung beschrieben:

$$a_n \cdot x_a^{(n)} + a_{n-1} \cdot x_a^{(n-1)} + \dots + a_1 \cdot \dot{x}_a + a_0 \cdot x_a = b_0 \cdot x_e + b_1 \cdot \dot{x}_e + \dots + b_m \cdot x_e^{(m)}$$

Der höchste Grad der Ableitung von x_a gibt die Anzahl der Speicherelemente der Strecke wieder.

Als Beispiel soll ein System zweiter Ordnung dienen, d. h. es existieren zwei Energiespeicher (C und L). Im *Bild 1.6* wird ein elektrisches PT_2 -System gezeigt. Die allgemeine DGL für ein System zweiter Ordnung lautet:

$$\frac{1}{\omega_0^2} \cdot \ddot{x}_a(t) + \frac{2 \cdot d}{\omega_0} \cdot \dot{x}_a(t) + x_a(t) = K \cdot x_e(t)$$

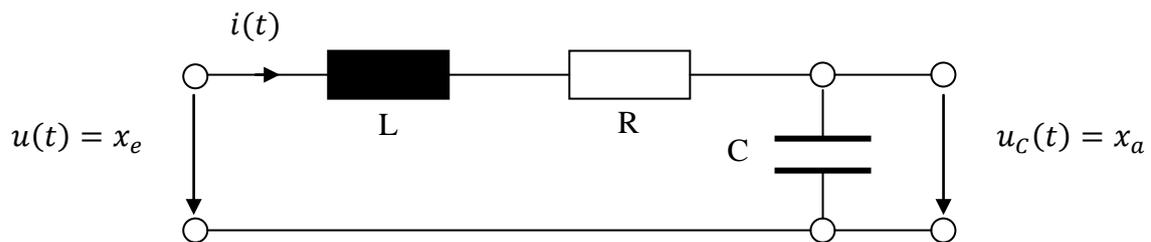


Bild 1.6 Beispiel eines elektrischen PT_2 -Systems

$$\frac{1}{\omega_0^2} = L \cdot C$$

$$\frac{2 \cdot d}{\omega_0} = R \cdot C$$

$$K = 1$$

Zustandsraumdarstellung

Anstelle einer DGL höherer Ordnung n , wird bei der Zustandsraumdarstellung ein System von n Differentialgleichungen erster Ordnung als Darstellungsform gewählt, mit u als Eingangsgröße und y als Ausgangsgröße.

Die Überführung einer systembeschreibenden DGL in die Zustandsraumdarstellung erfolgt durch die Ermittlung der inneren Systemgrößen des Systems, den Zustandsvariablen x_1 bis x_n .

Die **Zustandsvariablen** beschreiben den Energiegehalt der in einem dynamischen System enthaltenden Speicherelemente. Sie bedeuten z.B. Spannung an einem Kondensator, Strom in einer Induktivität oder bei einem Feder-Massesystem die potentiellen kinetischen Energieanteile.

Die Größen x_1 bis x_n können frei gewählt werden, müssen aber den „Zustand“ des Systems vollständig beschreiben. Eine genaue Beschreibung des Verfahrens ist unter [6] zu finden.

Übergangsfunktion $h(t)$ (Sprungantwort)

Die Übergangsfunktion $h(t)$ ist die Systemantwort auf die Erregung des Systems mit einem Einheitssprung $e(t)$. Daher auch als Sprungantwort bezeichnet.

$$e(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ 1 & \text{für } t > 0 \end{cases}$$

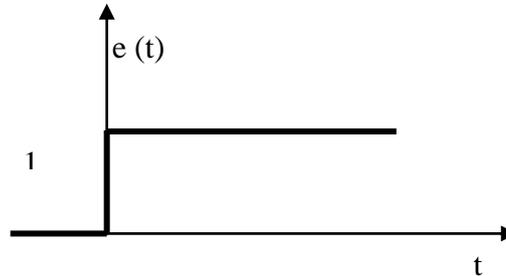


Bild 1.7 Einheitssprung

Für kausale Systeme ist $h(t) = 0$ für $t < 0$. Die Übergangsfunktion lässt sich entweder analytisch als Gleichung angeben oder aber als Zeitfunktion skizzieren. In dem gezeigten Beispiel ergeben sich abhängig von der Dämpfung d verschiedene Übergangsfunktionen (Bild 1.8). Analytisch ließe sie sich so beschreiben:

$$h(t) = K \cdot \left[1 - e^{-d\omega_0 t} \cdot \left(\cos(a \cdot \omega_0 \cdot t) + \frac{d}{a} \cdot \sin(a \cdot \omega_0 \cdot t) \right) \right] \quad \text{mit} \quad a = \sqrt{1 - d^2}$$

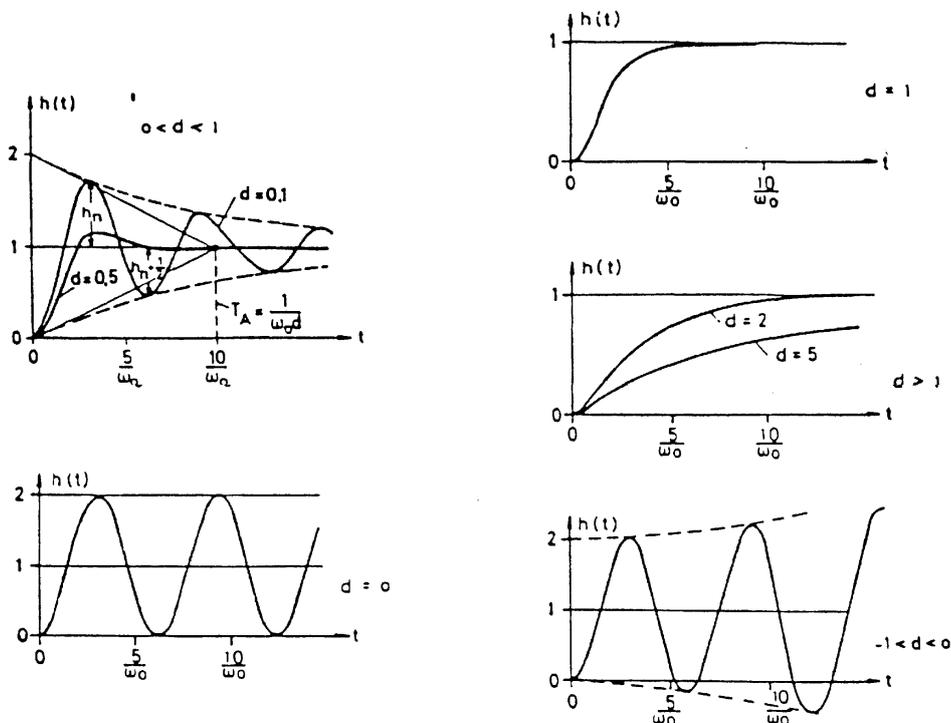
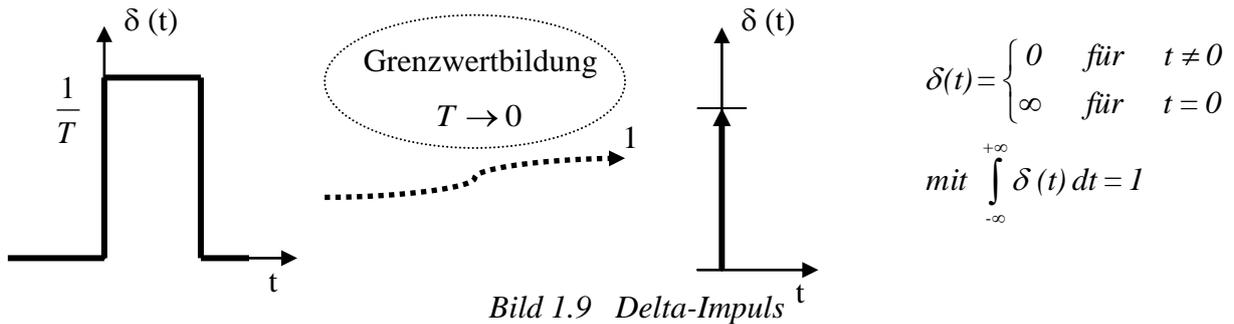


Bild 1.8 Übergangsfunktion eines PT_2 -Systems in Abhängigkeit von der Dämpfung d

Gewichtsfunktion $g(t)$ (Impulsantwort)

Die Gewichtsfunktion $g(t)$ ist definiert als die Antwort des Systems auf den Delta-Impuls. Normalerweise wird der Delta-Impuls als Pfeil der Länge „Eins“ dargestellt, durch die im *Bild 1.9* gezeigte Grenzwertbildung wird der Delta-Impuls angenähert. Durch Differentiation der Übergangsfunktion erhält man die Gewichtsfunktion $g(t) = dh(t)/dt$.



1.4 Regelkreis

Regelkreise können je nach Anwendungsfall sehr unterschiedlich aufgebaut sein. Als Beispiel für einen Aufbau wird hier ein Temperaturregelkreis betrachtet. Der Regelkreis setzt sich aus Stellort, Aufnehmer (Fühler+Messgerät), Messumformer, Vergleicher, Regler und Stellglied zusammen (*Bild 1.10*).

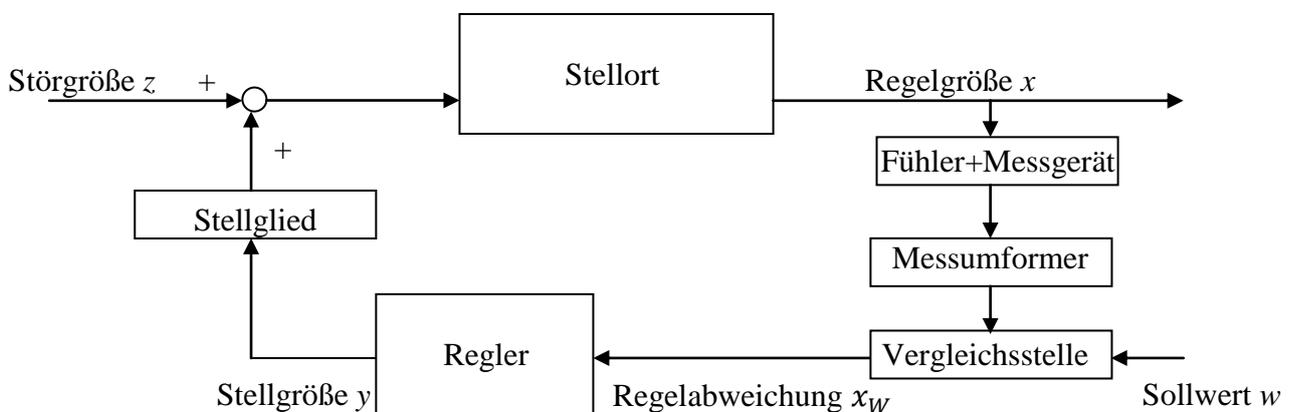


Bild 1.10 Signalflussplan des Regelkreises

Der Messfühler erfasst den Istwert bzw. die Regelgröße x (Temperatur) und führt sie dem Messgerät zu. Die Ausgangsgröße des Messgerätes wird im Messumformer in eine für den Vergleich geeignete physikalische Größe umgewandelt. In der Vergleichsstelle wird der Istwert x mit dem Sollwert, auch Führungsgröße w genannt, verglichen. Ist die Führungsgröße konstant, spricht man von Festwertregelung; ist sie zeitlich veränderlich, wird diese Folgeregelung genannt. Die Ausgangsgröße des Vergleichers ist die Regelabweichung $x_w = w - x$, die dem Regler zugeführt wird. Abhängig von der Größe der Regelabweichung liefert der Regler am Ausgang die Stellgröße y , die das Stellglied beeinflusst und dadurch den Energiefluss der Regelstrecke dosiert. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten die Blöcke zu einem einfachen Regelkreis zusammenzufassen. Für den später beschriebenen Temperaturregelkreis erscheint es am geeignetsten das Stellglied und den Stellort zur Regelstrecke zu zählen. Zum Regler gehören dann der Fühler, das Messgerät, der Messumformer und der Vergleichler.

Es gibt zwei wesentliche Aufgaben des Regelkreises:

- I. Störungen so entgegen zu wirken, dass ein vorgegebener Sollwert eingehalten wird.

⇒ **Festwertregelung (Störgrößenregelung)**

- II. Einem sich zeitlich verändernden Sollwert (Führungsgröße) möglichst schnell und gut zu folgen.

⇒ **Folgeregelung**

Da zur Bewertung einer Regelung nicht alle möglichen Stör- bzw. Führungsgrößen untersucht werden können, hat man sich darauf geeinigt, eine sprungförmige Störgrößen- bzw. Führungsgrößenänderung zu untersuchen. Der sich ergebende zeitliche Verlauf der Regelgröße wird Sprungantwort genannt. Wird die Sprungantwort auf die Größe des Eingangssprunges bezogen, ergibt sich die Störübergangsfunktion bzw. die Führungsübergangsfunktion (*Bild 1.24*) des Regelkreises.

Instabilität des Reglers:

In Regelkreisen kann es durch die Rückführung zur Instabilität kommen, d. h. die Regelgröße klingt dann nicht mehr ab, sondern wächst theoretisch über alle Grenzen. Um dieses zu vermeiden und Instabilitäten schon in der Entwurfsphase eines Regelkreises zu erkennen, gibt es zahlreiche Methoden, von denen hier nur einige aufgezählt werden sollen: Hurwitz-, Routh-, Nyquistkriterium und das Wurzelortkurvenverfahren (WOK-Verfahren).

1.4.1 Regelstrecke

Die Regelstrecke ist das entscheidende Glied im Regelkreis, das genau bekannt sein muss, um eine möglichst hohe Güte des Regelkreises zu erreichen. Dabei ist es nicht unbedingt wichtig, den genauen inneren Aufbau zu kennen, sondern durch einfache Methoden Bewertungskriterien zu bekommen. Wie im Folgenden gezeigt wird, werden Regelstrecken in solche mit linearem und nichtlinearem Verhalten sowie in Regelstrecken mit und ohne Ausgleich eingeteilt.

Lineare Regelstrecken

Regelstrecken, oder allgemeiner Übertragungsglieder, werden als linear bezeichnet, wenn sie das Superpositionsprinzip erfüllen. Nach [5] setzt sich das Superpositionsprinzip aus Überlagerungs- und Verstärkungsprinzip zusammen.

Überlagerungsprinzip:

Sind für beliebige Eingangsgrößen x_1 und x_2 die Ausgangsgrößen y_1 und y_2 bekannt, so ist für lineare Systeme die zur Summe der Eingangsgrößen $x_1 + x_2$ gehörende Ausgangsgröße die Summe $y_1 + y_2$.

Verstärkungsprinzip:

Für eine beliebige reelle Konstante K muss gelten, dass zur Eingangsgröße $K \cdot x_1$ die Ausgangsgröße $K \cdot y_1$ gehört. Die Ein-/Ausgangskennlinie muss also einen geradlinigen Verlauf haben, damit die Regelstrecke linear ist.

Nichtlineare Regelstrecken

Sind die oben aufgeführten Bedingungen nicht erfüllt, wird von nichtlinearen Systemen gesprochen.

Regelstrecke ohne Ausgleich

Bei den Regelstrecken ohne Ausgleich verläuft die Übergangsfunktion bei einer einmaligen Störung ins Unendliche oder bis zu einer systembedingten Grenze (*Bild 1.11*).

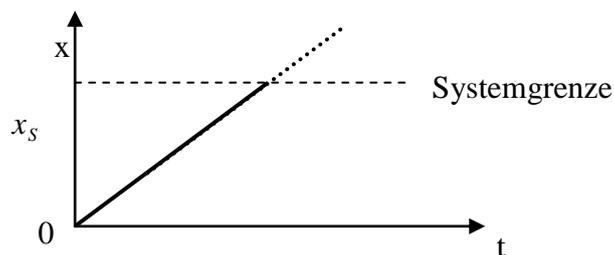


Bild 1.11 System ohne Ausgleich

Beispielsweise kann in einem Behälter mit Zu- und Ablauf der Flüssigkeitsstand nur konstant gehalten werden, solange die gleiche Menge abläuft wie zuläuft. Wenn eine Störung auftritt und die Ablaufmenge nicht mehr der Zulaufmenge entspricht, läuft der Behälter über bzw. entleert sich (systembedingte Grenzen). Es handelt sich um eine instabile Strecke mit integralem Verhalten (I-Strecke).

Regelstrecke mit Ausgleich

Bei Regelstrecken mit Ausgleich verläuft die Regelgröße z. B. wie im *Bild 1.12* gezeigt.

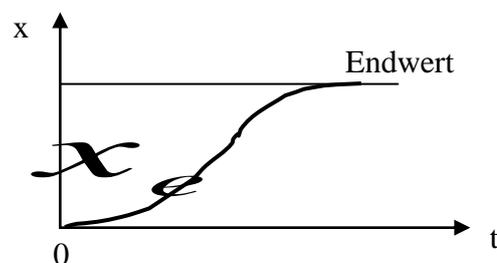


Bild 1.12 System mit Ausgleich

Bei einer Stellgrößenänderung strebt die Regelgröße nicht gegen unendlich, sondern gegen einen neuen Endwert. Bei linearen Regelstrecken ist $\frac{x}{y} = \textit{konstant}$ (für $t \rightarrow \infty$) und wird Verstärkung oder nach [4] auch Stellübertragungsbeiwert V_S genannt. Der Kehrwert von V_S wird Ausgleichswert q genannt und ist ein Maß für den Selbstausgleich einer Strecke. Ist der Ausgleichswert $q = 0$, handelt es sich um eine Regelstrecke ohne Ausgleich.

1.4.2 Regler

Im Gegensatz zur Regelstrecke, die i.Allg. vorgegeben ist, kann der zur Regelung geeignetsten Regler unter einer Vielzahl möglicher Regler ausgesucht werden. Allgemein werden Regler nach stetigen und unstetigen Ausgangswerten unterschieden. Zu den bekanntesten stetigen Reglern zählen der P-, PI, PD- und der PID-Regler. Bei ihnen kann die Stellgröße als Ausgangssignal jeden Wert zwischen technisch bedingten Grenzwerten annehmen (z.B. -15V bis +15V). Bei unstetigen Reglern kann die Stellgröße als Ausgangssignal nur bestimmte feste Werte annehmen. Ein unstetiger Regler mit nur zwei Ausgangszuständen kann z.B. ein- und ausschalten. Bei einer Temperaturregelung kann ein solcher Regler nur die gesamte Heizleistung einschalten oder total ausschalten. Zwischenwerte kann er nicht einstellen. Ein unstetiger Regler mit drei Ausgangszuständen kann z.B. zusätzlich zum Ein- und Ausschalten der Heizleistung bei Bedarf noch einen Ventilator betätigen. Damit ergeben sich drei Zustände: Heizen-Aus-Kühlen.

Einige wichtige Reglertypen sollen im Folgenden näher beschrieben werden:

Stetige Regler:

P-Regler

Unter den linearen Reglern ist der P-Regler der einfachste. Es besteht ein rein proportionaler Zusammenhang zwischen der Ein- und Ausgangsgröße.

$$y(t) = K_P \cdot x_W(t)$$

K_P ist eine reelle Zahl und wird Proportionalbeiwert genannt (auch als K_{PR} bezeichnet, da das K_P auf einen Regler bezogen ist).

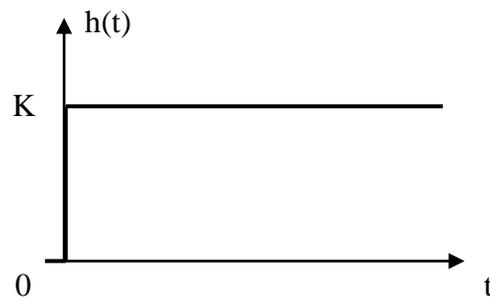


Bild 1.13 Übergangsfunktion des P-Reglers

Setzt man den P-Regler zur Regelung einer Regelstrecke mit PT_2 -Verhalten ein und betrachtet die Störübergangsfunktion, so fällt er durch einen im Vergleich zu den anderen Reglern relativ großen Überschwinger, eine große Ausregelzeit und eine bleibende Regelabweichung auf. Das bedeutet, der P-Regler kann eine sprungförmig auftretende Störung am Eingang der Regelstrecke nicht ausgleichen.

Der Proportionalbereich:

Oft wird der P-Anteil nicht durch den Proportionalbeiwert K_p , sondern durch den Proportionalbereich X_p des Reglers definiert. Der Proportionalbereich ist der Bereich, um den sich die Regeldifferenz ändern muss, damit die Stellgröße über den ganzen Stellbereich Y_h von y_{min} bis y_{max} verändert wird [5]. In diesem Bereich ist der Stellgrad proportional zur Regelabweichung.

Es gilt:

$$K_p = \frac{Y_h}{X_p}$$

Bezieht man den Stellbereich Y_h von 0 % bis 100 %, dann gilt:

$$K_p = \frac{1}{X_p} \cdot 100 \% \quad \rightarrow \quad X_p = \frac{1}{K_p} \cdot 100 \%$$

Am folgenden Beispiel wird in der Literatur [2] der Proportionalbereich sehr anschaulich erklärt:

Bild 1.14 zeigt die Kennlinie eines P-Reglers, welcher zum Heizen verwendet wird. (Y-Achse: Stellgrad; X-Achse: Sollwert)

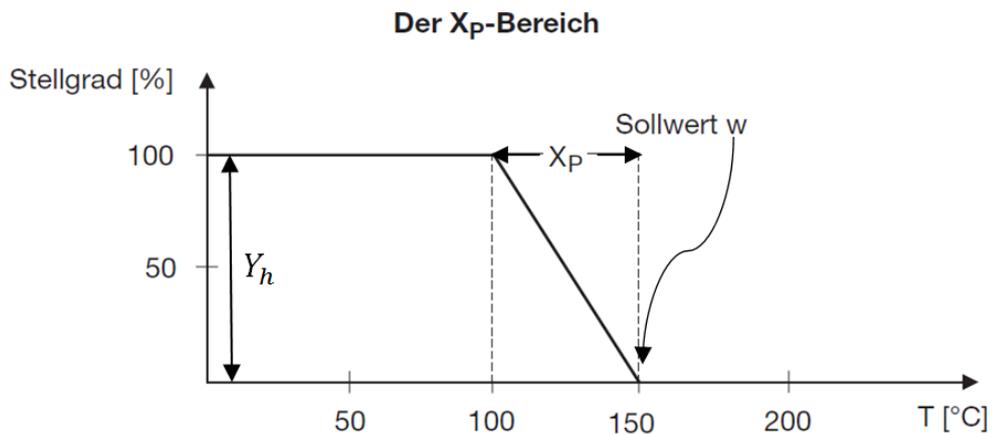


Bild 1.14 Kennlinie eines P-Reglers

In diesem Beispiel ist der Proportionalbereich 50 K, das bedeutet: Bei Regelabweichungen größer als 50 K ist der Stellgrad 100 %. Ist die Regelabweichung niedriger als der Proportionalbereich, wird der Stellgrad proportional zur Regelabweichung verkleinert.

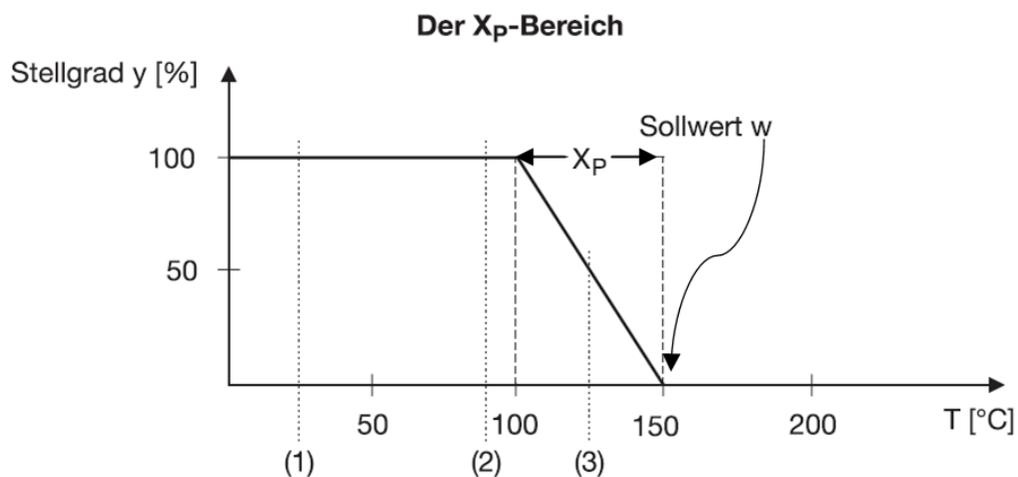


Bild 1.15 Kennlinie eines P-Reglers mit eingezeichnetem Istwert

Im Bild 1.15 sind zusätzlich verschiedene Istwerte durch die Stellen (1), (2) und (3) dargestellt: Zuerst liegt der Istwert bei ca. 25 °C (1), dann ist aus dem Schnittpunkt mit der Kennlinie ersichtlich, dass der Regler in diesem Fall einen Stellgrad von 100 % ausgibt. Der Istwert würde auf Grund des hohen Stellgrades ansteigen und einige Zeit später bei ca. 90 °C liegen (2). Der Stellgrad würde immer noch 100 % betragen und erst ab einem Wert von 100 °C reduziert

werden. Hier beginnt auch der Proportionalbereich (X_P). Liegt der Istwert z. B. in der Mitte des Proportionalbereiches (125 °C), beträgt der Stellgrad noch 50 % (3). Beträgt der Istwert 150 °C, ist keine Regelabweichung vorhanden und der Stellgrad somit bei 0 %. Beim Anfahren an den Sollwert ist durch den Proportionalbereich X_P auf den ersten Blick ersichtlich, wann der Regler den Stellgrad reduziert.

Bleibende Regelabweichung:

Wird im Beispiel ein Istwert von 150 °C erreicht, würde im Falle eines Ofens keine Heizleistung in das mehr Ofeninnere abgegeben werden. Die Temperatur wird kleiner 150 °C und der Stellgrad wieder größer. Der Prozess wird sein Gleichgewicht finden (wenn bei einem Istwert von 125 °C ein Stellgrad von 50 % benötigt wird). Hier ist der Nachteil des reinen P-Reglers zu erkennen: die sich einstellende Regelabweichung. Die bleibende Regelabweichung ließe sich in diesem Fall reduzieren, indem das X_P verringert und somit die Verstärkung erhöht wird. Im genannten Beispiel sollte der Prozess ein Gleichgewicht bei 125 °C Istwert und 50 % Stellgrad erreichen. Wird der Proportionalbereich auf 25 K gestellt, beträgt der Stellgrad nun 100 % und der Istwert würde weiter in Richtung Sollwert ansteigen. Mit kleiner eingestelltem X_P wird der Istwert jedoch immer mehr zum Schwingen neigen:

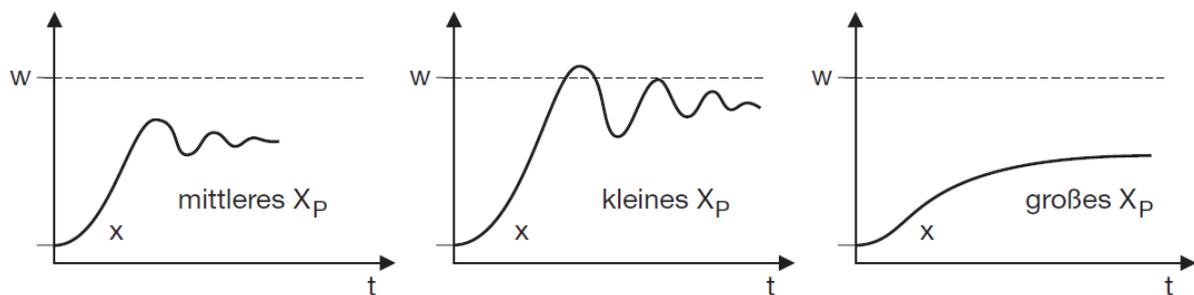


Bild 1.16 Regelverhalten für unterschiedliches X_P

Die großen Schwingungen bei einem kleinen X_P begründen sich damit, dass in diesem Fall beim Eintreten des Istwertes in den Proportionalbereich die Leistung extrem schnell abgebaut wird und somit nicht sofort ein Gleichgewichtszustand erreicht werden kann.

Der Regler aus Bild 1.14 mit einem X_P von 50 K würde einem Regler mit einem K_P von 2 %/K entsprechen. Ist der Stellbereich nicht von 0 % bis 100 % angegeben, sondern z.B. von -5 V bis 10 V, dann ergibt sich:

$$K_P = \frac{Y_h}{X_P} = \frac{15 V}{50 K} = 0,3 \frac{V}{K}$$

Üblicherweise wird der „Proportionalbereich X_P “ als „bezogener Proportionalbereich $X_{P\%}$ “ angegeben [7]. Er besagt, um wie viel Prozent vom Regelbereich bzw. Messbereich X_h des Reglers sich die Regeldifferenz ändern muss, um den vollen Stellbereich Y_h zu durchfahren. Der bezogene Proportionalbereich ist eine dimensionslose Größe und wird in % angegeben.

$$X_{P\%} = \frac{X_P}{X_h} \cdot 100\%$$

Meist werden bezogene Größen verwendet, die aber oft nicht besonders gekennzeichnet sind.

I-Regler

Dieser Regler führt eine Integration der Eingangsgröße durch, wobei T_I als Integralzeit bezeichnet wird.

$$y(t) = \frac{1}{T_I} \int x_w(t) dt$$

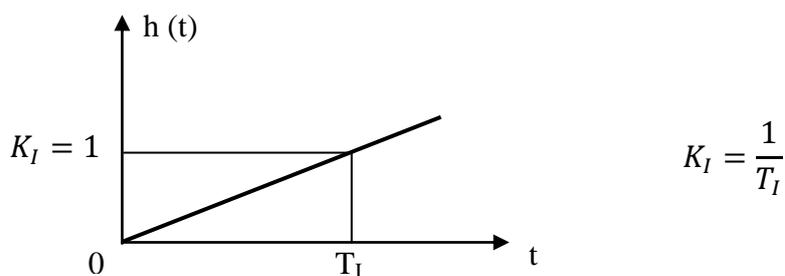


Bild 1.17 Übergangsfunktion des I-Reglers

Die Integrierzeit (T_I):

Mit der Integrierzeit kann die Geschwindigkeit des I-Reglers verändert werden. Das bedeutet: je kleiner T_I ist, umso schneller baut der I-Regler seinen Stellgrad auf. T_I ist gerade die Zeit, die der Regler benötigt, um seinen Stellgrad um die Größe der vorliegenden Regelabweichung zu erhöhen (ohne Betrachtung der Dimension).

Mathematisch gesehen bildet der I-Regler die Flächen, welche von Regelabweichung und Zeitachse über die Zeit eingeschlossen werden (*Bild 1.18*) [2]:

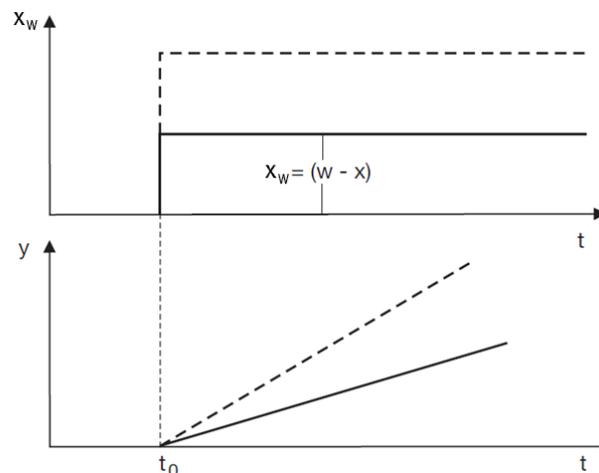


Bild 1.18 Sprungantwort des I-Reglers

Bei gleicher Regelstrecke besitzt der I-Regler, aufgrund des langsam einsetzenden I-Verhaltens, einen noch größeren Überschwinger als der P-Regler. Dafür hat der I-Regler allgemein den Vorteil, dass er die Regelabweichung beseitigt.

Gut veranschaulichen lässt sich der I-Regler im geschlossenen Regelkreis (*Bild 1.19*):

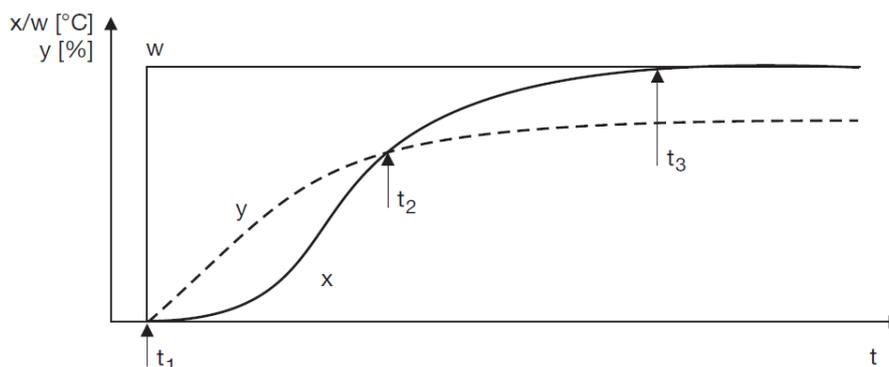


Bild 1.19 Der I-Regler im geschlossenen Regelkreis

- t_1 : Ein Sollwert wird neu definiert, der Stellgrad wird durch den I-Regler sofort vergrößert, eine Änderung des Istwertes erfolgt erst nach einiger Zeit.
- t_2 : Der Istwert wird immer größer und somit die Regelabweichung immer geringer. Der Stellgradverlauf wird aus diesem Grund immer flacher.
- t_3 : Der Regler hat ausgeregelt, die Regelabweichung ist 0. Der I-Regler behält den Stellgrad, welcher von ihm aufgebaut wurde.

D-Regler

Hierbei handelt es sich um ein differenzierendes Übertragungsglied. Die Ausgangsgröße wird durch Differentiation der Eingangsgröße gebildet. T_D bezeichnet man als die Differentialzeit.

$$y(t) = T_D \cdot \frac{\partial}{\partial t} x_W(t)$$

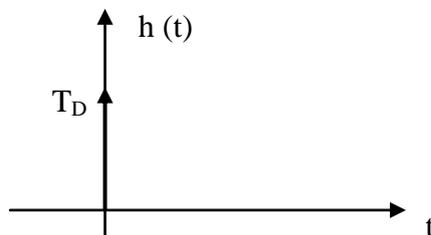


Bild 1.20 Übergangsfunktion des D-Reglers

Die Differentialzeit (T_D):

Im geschlossenen Regelkreis verhält sich ein D-Regler wie folgt:

- Je steiler die Änderung der Regelabweichung x_W verläuft, umso stärker wirkt der D-Regler
- Wird die Differentialzeit T_D größer eingestellt, so zeigt sich die oben beschriebene Wirkung intensiver
- Bleibt jedoch die Regelabweichung unverändert, so wird auch kein Stellgrad durch den D-Regler ausgegeben

Der hier beschriebene ideale D-Regler ist praktisch nicht realisierbar, da er bei steilen Eingangsänderungen am Ausgang eine unendliche große und unendlich schmale Nadelfunktion aufweisen müsste. Die ist zum einen aus mechanischen und auch elektrischen Gründen nicht möglich, zum anderen würde ein solch kurzer Impuls die Regelstrecke kaum beeinflussen. Man verhindert in der Praxis das sofortige Abklingen durch Bildung des D-Anteils durch ein DT_1 -Glied.

PID-Regler

Durch eine Zusammenführung der drei Grundtypen P, I und D, wie es *Bild 1.21* zeigt, erhält man einen PID-Regler, der als Standardregler häufig in der Industrie eingesetzt wird.

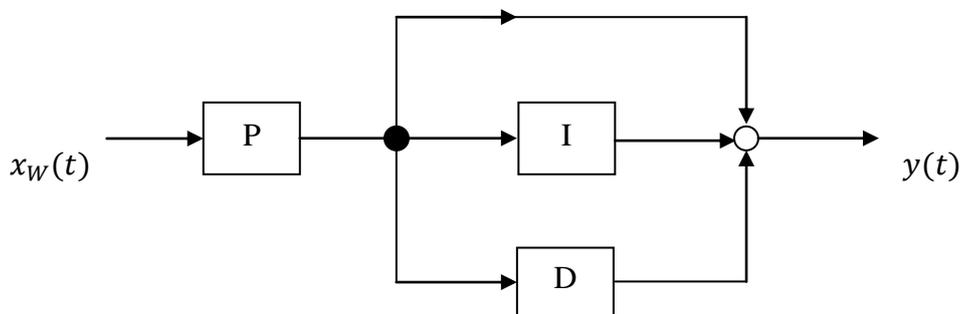


Bild 1.21 Blockschaltbild PID-Regler

$$y(t) = K \left[x_w(t) + \frac{1}{T_I} \int x_w(t) dt + T_D \cdot \frac{\partial}{\partial t} x_w(t) \right]$$

Die Übergangsfunktion des PID-Reglers zeigt *Bild 1.22*. Dabei ist zu beachten, dass die Pfeilhöhe nur als Wichtung des δ -Impulses anzusehen ist.

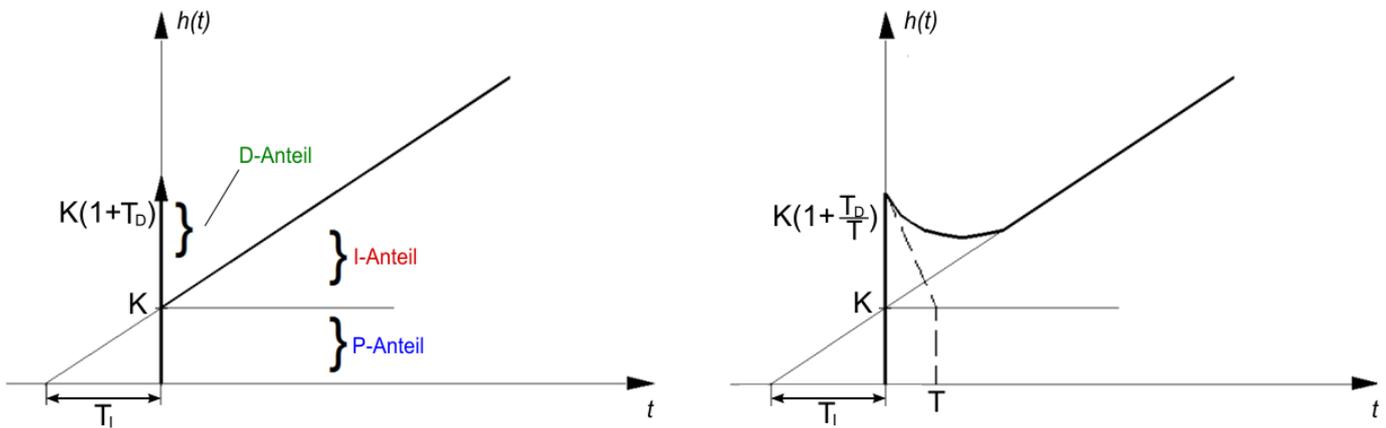


Bild 1.22 Übergangsfunktion des PID-Reglers

Die Regelparameter haben unterschiedliche Auswirkungen auf die einzelnen Anteile:

Großes X_p entspricht kleinem P-Anteil

→ kleine Verstärkung: dadurch stabilisiertes, jedoch auch trägeres Verhalten

Großes T_I entspricht kleinem I-Anteil

→ integriert langsam auf: dadurch stabileres, jedoch auch trägeres Verhalten

Großes T_D entspricht großem D-Anteil

→ wirkt der Änderung des Istwertes stärker entgegen, dadurch stabilisiertes Verhalten, T_D nicht zu groß wählen

Die Nachstellzeit (T_N) und die Vorhaltezeit (T_V):

In der Literatur werden T_I und T_D häufiger anders bezeichnet. Wird der I-Anteil mit einem P-Anteil kombiniert, wird bezüglich der Parameter für das integrierende Verhalten auch von der Nachstellzeit T_N gesprochen, statt von der Integrierzeit T_I . Gleiches gilt für den D-Anteil: Hier wird auch die Vorhaltezeit T_V verwendet, der den Parameter T_D ersetzt [2].

Unstetige Regler:

Zweipunktregler

Wie der Name schon andeutet, besitzt der Zweipunktregler als Ausgangsgröße nur zwei bestimmte Werte bzw. Schaltzustände, z.B. bei einem Schalter die Stellungen „Ein“ und „Aus“.

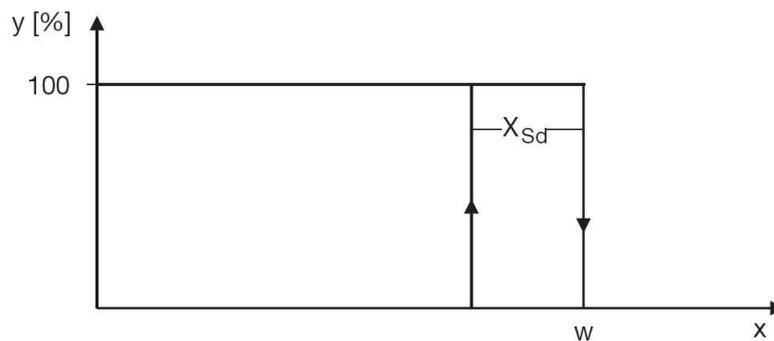


Bild 1.23 Zweipunktregler

Er hat eine nichtlineare Kennlinie (*Bild 1.23*), die dazu führt, dass beim Einsatz im Regelkreis die Ausgangsgröße um den Sollwert schwingt. Liegt der Istwert unterhalb des Sollwertes, so gibt dieser den vollen Stellgrad aus. Wird der Sollwert erreicht, setzt er den Stellgrad auf 0 % zurück. Fällt nach einiger Zeit der Istwert wieder ab, schaltet der Ausgang bei Unterschreitung vom „Sollwert minus die Schaltdifferenz x_{sd} “ wieder ein. *Bild 1.24* zeigt den Zweipunktregler an einer angeschlossenen Regelstrecke 1. und höherer Ordnung.

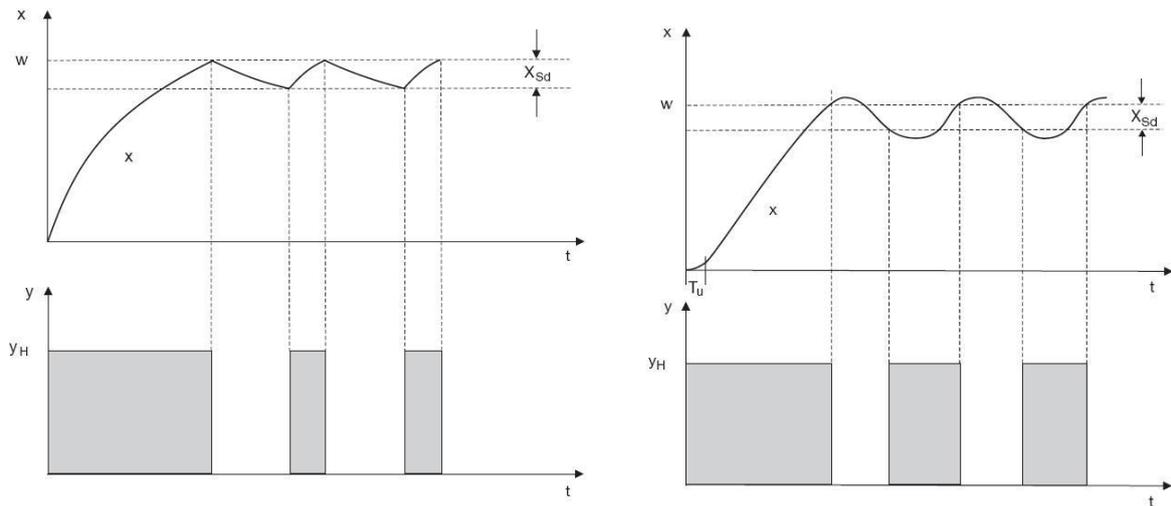


Bild 1.24 Zweipunktregler an einer Stecke 1.Ordnung (links)
und höherer Ordnung (rechts)

Die Schalthäufigkeit ist umso größer, je kleiner die Schaltdifferenz und umso schneller die Regelstecke reagiert bzw. auf Veränderungen folgt.

Fazit:

Weil der Zweipunktregler technisch einfach und kostengünstig zu realisieren ist, wird er häufig bei einfachen Temperaturregelkreisen angewandt (z.B. im Backofen oder Bügeleisen). Bei mechnischen Schaltern sollte die Schaltperiodendauer nur so klein wie nötig eingestellt werden, da es sonst auf Kosten der Lebensdauer der Relais, Schützen oder des Bimetalls geht. Bei elektronischen Ausgängen (z.B. TRIAC, Solid-State-Relais, Open-Collector-Ausgang) kann die Schaltperiodendauer jedoch so klein wie möglich eingestellt werden, da diese nicht durch die Schalthäufigkeit belastet werden.

1.5 Optimierung

1.5.1 Störungen

Es gibt viele verschiedene Arten von Störungen: sprungförmige, stochastische, periodische, allmählich zunehmende, usw..

Diese Störungen können überall im Regelkreis auftreten - nicht nur an der Strecke, sondern auch am Regler, an der Vergleichsstelle oder bei den Signalflussleitungen. Um eine Beurteilung der Güte der Regelung zu bekommen, wird in der Literatur am häufigsten eine sprungförmige Störung am Eingang der Regelstrecke oder eine sprungförmige Führungsgrößenänderung untersucht (Bild 1.25).

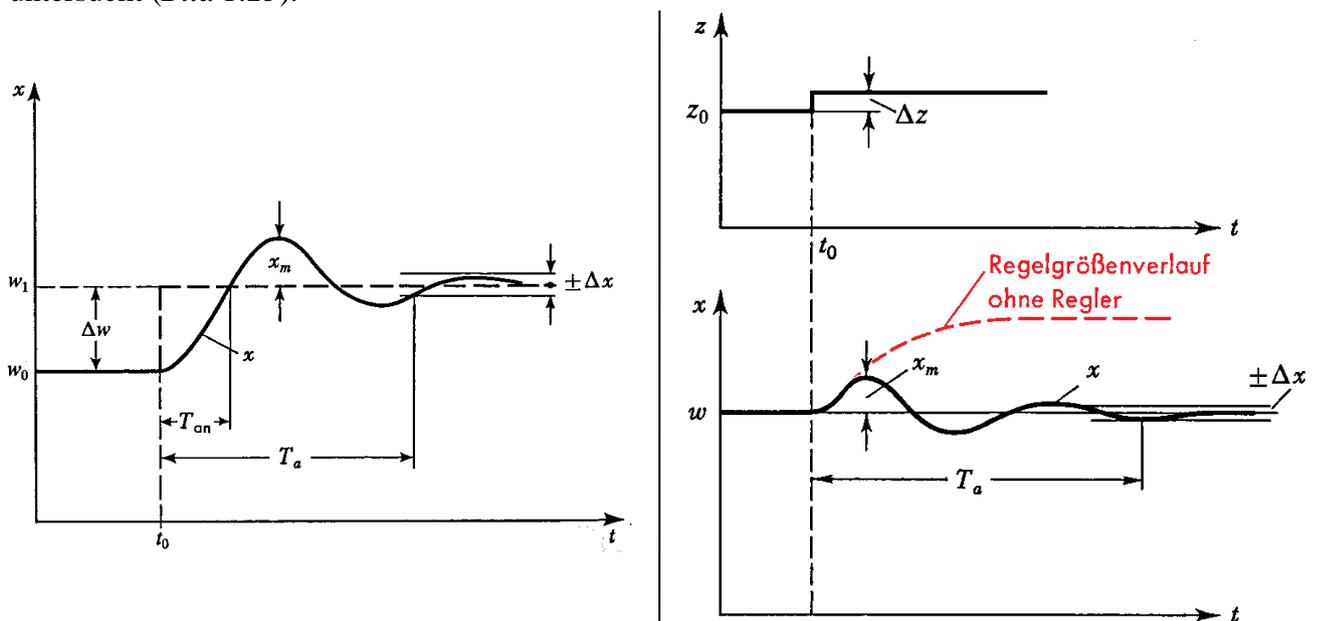


Bild 1.25 Führungsübergangsfunktion (links) und Störübergangsfunktion (rechts)

x_m : maximale Überschwingweite (gibt den Betrag der maximalen Regelabweichung an, die nach erstmaligem Erreichen des Sollwertes auftritt)

T_{an} : Anregelzeit (Zeit die vergeht, bis die Regelgröße zum ersten Mal den neuen Sollwert erreicht)

T_a : Ausregelzeit (Zeit die vergeht, bis zum letzten Eintritt in den Fehlerschlauch $\pm \Delta x$)

Diese Größen sind ein Maß für den dynamischen Übergangsfehler, also die Abweichung der Übergangsfunktion vom Idealfall. Eine eventuell auftretende bleibende Regelabweichung würde das statische Verhalten charakterisieren. Man ist bemüht diese Größen und damit den Übergangsfehler möglichst klein zu halten. Je nach Anwendungsfall wird dies unterschiedlich geschehen.

1.5.2 Optimierungsverfahren

Um einen Regelkreis zu optimieren, muss die Übergangsfunktion bekannt sein. Da dieses in den meisten Fällen nicht so ist, wird bei der gemessenen Übergangsfunktion versucht, diese durch einfache, analytisch bekannte anzunähern. Eine einfache Approximation stellt die Beschreibung eines PT_n -Systems durch ein Totzeitglied und ein PT_1 -Glied dar. Sie wird häufig verwendet und liefert hinreichend genaue Ergebnisse. Im Rahmen des Versuchs soll diese Beschreibungsform mittels einer „Küpfmüller-Approximation“ (Wendetangentenverfahren) (Bild 1.26) angewendet werden. Eine Verbesserung dieses „Wendetangentenverfahrens von Strejc“ sowie andere Approximationen, wie z. B. von „Ziegler und Nichols“, sind in [3] dargestellt.

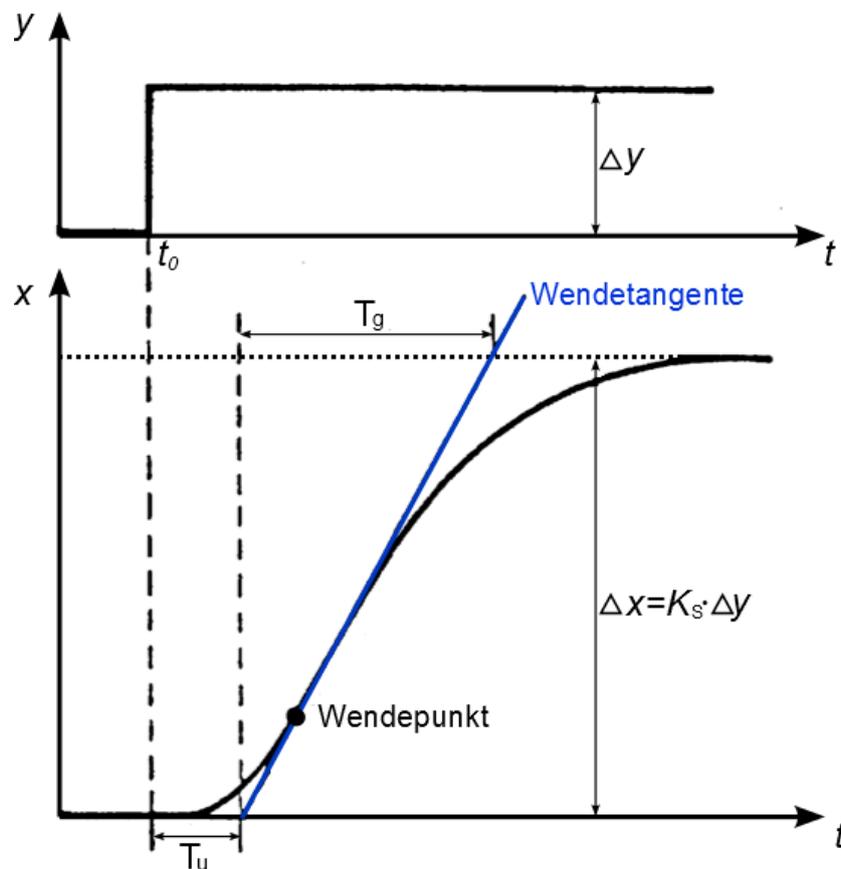


Bild 1.26 Wendetangentenverfahren

Mit Hilfe der nachfolgenden *Tabelle 1* können die optimalen Parameter bestimmt werden. Es handelt sich um die Einstellregeln nach „Chien, Hrones und Reswick“ (kurz: CHR-Verfahren). Die Tabelle ist an $X_{P\%}$ für den Laborversuch angepasst worden, wie es im „Abschnitt 1.4.2: P-Regler“ beschrieben wird.

Die Ausgangsgröße kann bei einer sprunghaften Größenänderung am Eingang unterschiedliches Verhalten aufweisen:

- 20% Überschwingen
- oder
- ein aperiodisches Verhalten

Zusätzlich steht noch zur Wahl:

- ein gutes Störverhalten
- oder
- ein gutes Führungsverhalten

Regler		Gütekriterium			
		Überschwingung nach Gegenseite mit 20% von x_m , kürzeste Schwingungsdauer		aperiodischer Regelvorgang mit kürzester Dauer (ohne Überschwingen)	
		für gutes Störverhalten	für gutes Führungsverhalten	für gutes Störverhalten	für gutes Führungsverhalten
P	$X_{P\%}$	$11,9 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$11,9 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$27,8 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$27,8 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$
PI	$X_{P\%}$	$11,9 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$13,9 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$13,9 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$23,8 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$
	T_I	$2,3 \cdot T_u$	T_g	$4 \cdot T_u$	$1,2 \cdot T_g$
PID	$X_{P\%}$	$6,95 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$8,8 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$8,8 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$	$13,9 \cdot \frac{T_u \cdot K_S}{T_g} \cdot \frac{\% \cdot \%}{K}$
	T_I	$2 \cdot T_u$	$1,35 \cdot T_g$	$2,4 \cdot T_u$	T_g
	T_D	$0,42 \cdot T_u$	$0,47 \cdot T_u$	$0,42 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$

Tabelle 1 Optimale Reglereinstellungen

2 Versuchsaufbau

2.1 Beschreibung des Temperaturregelkreises

Der Laborversuch „stetige Regler“ besteht aus einem Temperaturregelkreis mit einem Stellglied und Silitrohfen als Strecke und einem modernen PID-Regler. Auf der Frontplatte des Versuchsgertes ist ein Regelkreis (Bild 2.1) in der üblichen Blockschaltform dargestellt. Durch Schalter kann der Signalfluss im Regelkreis unterbrochen bzw. geschlossen werden. Auf diese Weise können einzelne Blöcke, wie Strecke oder Regler bzw. der gesamte Regelkreis untersucht werden.

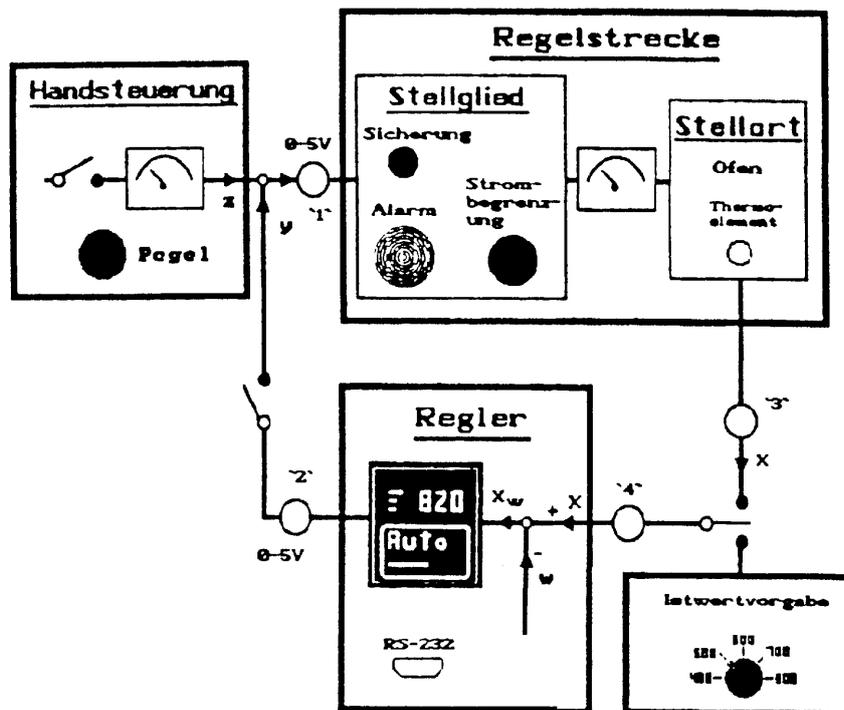


Bild 2.1 Blockschaltbild auf der Frontplatte

An der Messbuchse „1“ kann die Eingangsgröße der Strecke gemessen werden, die bei geschlossenem Regelkreis Stellgröße genannt wird. An der Messstelle „2“ kann die Ausgangsgröße des Reglers gemessen werden, wobei eine Ausgangsleistung von 0-100 % einer

Spannung von 0-5 V entspricht. Ist der Schalter zwischen diesen Messstellen geschlossen und die Handsteuerung ausgeschaltet, liegt an beiden Messbuchsen die gleiche Spannung. Bei eingeschalteter Handsteuerung wird die von ihr erzeugte Spannung addierend auf den Regelstreckeneingang (Messbuchse „1“) gegeben. An den Meßbuchsen „3“ und „4“ liegt eine dem Istwert entsprechende Thermospannung (NiCr/Ni) an. Mit Hilfe der Istwertvorgabe kann eine bestimmte Temperatur eingestellt werden, und durch ein Umschalten kann ein Sprung auf den Eingang des Reglers gegeben werden.

2.2 Strecke

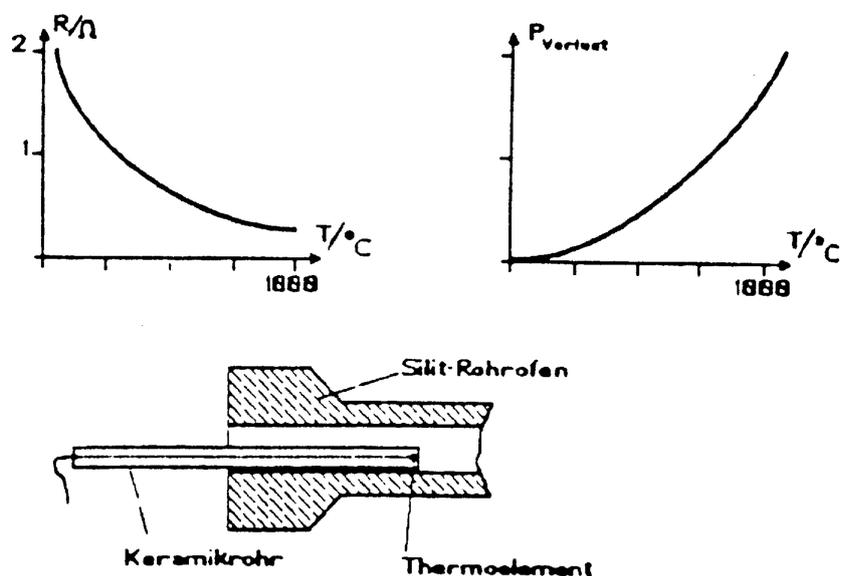


Bild 2.2 Nichtlinearitäten und Querschnitt des Ofens

Die vorhandene Temperaturregelstrecke setzt sich aus dem Stellglied und dem Ofen, der durch direkten Stromdurchgang beheizt wird, zusammen. Wie aus der statischen Kennlinie (Bild 2.3) zu entnehmen ist, weist die Strecke unerwünschte Nichtlinearitäten auf. Diese treten zum einen im Stellglied auf (die Ausgangsleistung ändert sich nicht proportional zum Steuerstrom) zum anderen im Ofen (der elektrische Widerstand sinkt mit der Temperatur und der Wärmeverlust steigt durch die Strahlung (Bild 2.2)).

Die statische Kennlinie wurde bei einer Raumtemperatur von 20 °C gemessen.

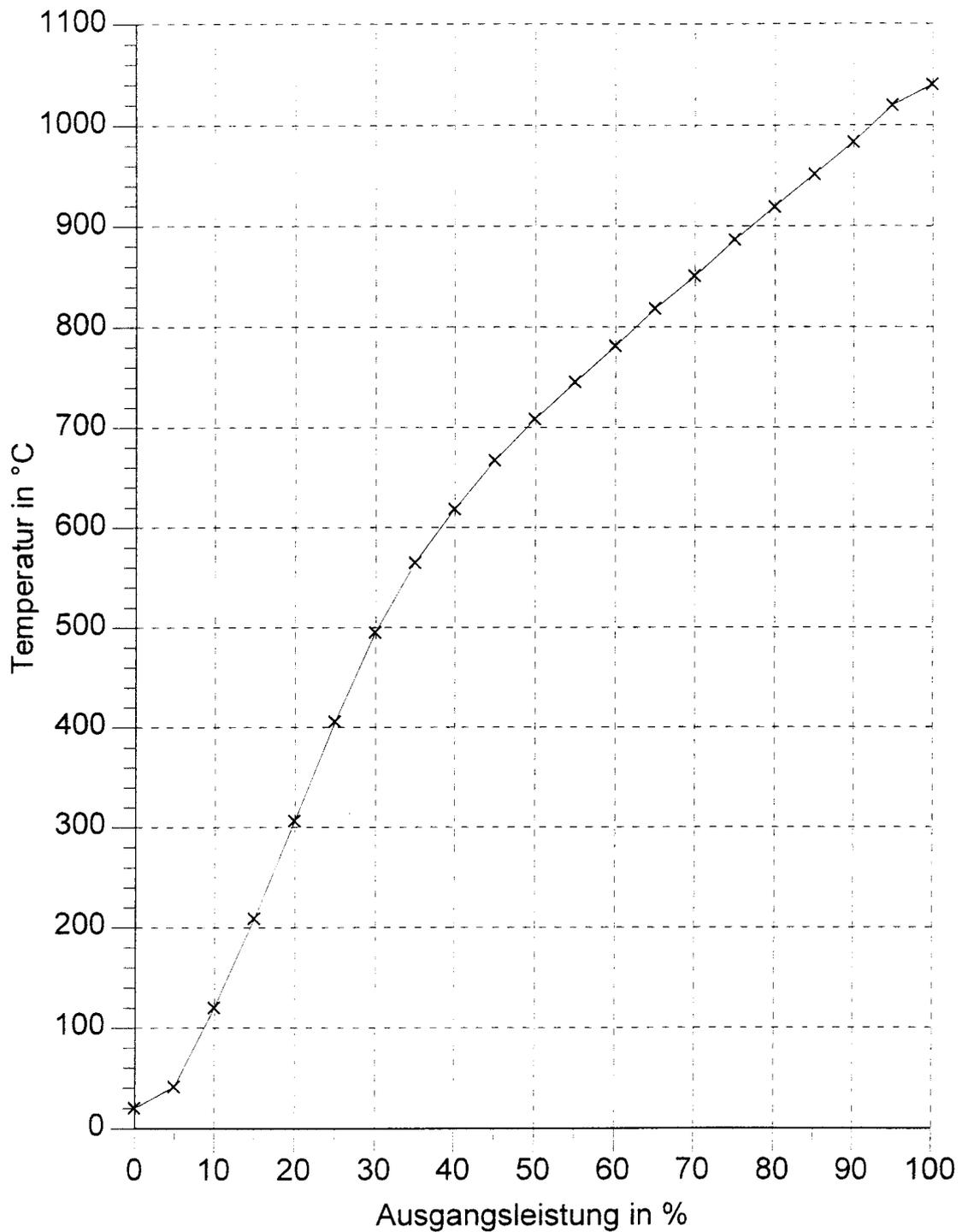


Bild 2.3 Statische Kennlinie der Strecke

Diese Nichtlinearität ist einer der Gründe dafür, dass für einen Regler bei unterschiedlichen Arbeitspunkten (Sollwerten) die Regelparameter verändert werden müssen, um weiterhin ein gutes Regelverhalten zu erhalten. Es ist auch möglich diese Nichtlinearitäten zu umgehen, indem

der Arbeitspunkt so gewählt wird, dass bei einer Linearisierung der statischen Kennlinie die Abweichung zum wirklichen Verlauf am geringsten ist. Wird davon ausgegangen, dass sich der Regelkreis immer in der Nähe des stationären Arbeitspunktes (Sollwertes) befindet, so kann die Kennlinie in diesem Punkt als linear angenommen werden, das heißt, die statische Kennlinie wird durch eine Tangente (Gerade) in diesem Arbeitspunkt ersetzt. Die Tangente linearisiert also der Steigung der Temperatur und somit auch die statische Verstärkung der Strecke K_S im jeweiligen Arbeitspunkt:

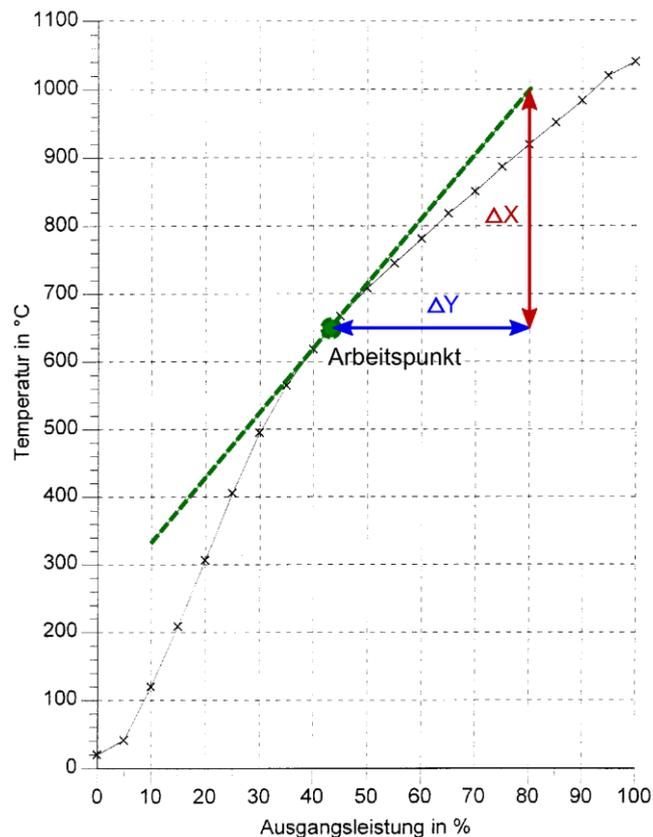


Abbildung 2.4: Linearisierung im Arbeitspunkt

$$K_S = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$$

Bei einer Linearisierung im Arbeitspunkt 650 °C, hat die Strecke eine statische Verstärkung $K_S = 9,5 \frac{K}{\%}$.

So lange keine sehr großen Änderungen der Führungsgröße w (oder der Störgröße z) und damit auch der Stellgröße y auftreten, kann die Linearisierung als Näherung gewählt werden.

2.3 Regler

Der eingesetzte Industrieregler ist über eine serielle Schnittstelle mit einem PC verbunden. Auf dem PC befindet sich die Software „iTools“, über die er mit dem Regler kommuniziert. Dort können die Regelparameter abgelesen und verändert werden. Im *Bild 2.4* ist das Fenster „Ansicht/Rezept Editor“ dargestellt, über das die Bedienung erfolgt. In der linken Hälfte sind die aktuellen Parameter sichtbar, die durch eine Eingabe verändert werden können. Die wichtigen Funktionen sind aus der *Tabelle 2* zu entnehmen. Die rechte Hälfte zeigt Spalten mit vorgeschichteten Einstellungen, über die man ebenfalls Regelparameter senden kann (durch klicken mit der rechten Maustaste und dann auf „Werte laden“). Zu beachten ist, dass hier die gesamte Spalte gleichzeitig an den Regler übergeben wird.

Beschreibung	Wert	Manuel	P	PI	PID	AUS
Automatik/Hand Umschaltung	Man (1) ▾	Man (1) ▾	Auto (0) ▾	Auto (0) ▾	Auto (0) ▾	Man (1) ▾
Hand Ausgangswert	0,00	100,00				0,00
Zielsollwert	650,00		255,00	600,00	200,00	
Proportionalband	3,29		30,00	30,00	3,00	
Integralzeit (Nachstellzeit)	79,98 ▾	▾	Aus (0) ▾	10,00 ▾	77,00 ▾	▾
Differentialzeit (Vorhaltzeit)	13,33 ▾	▾	Aus (0) ▾	Aus (0) ▾	13,00 ▾	▾
Freigabe Selbstoptimierung	Aus (0) ▾	▾	▾	▾	▾	▾
Cutback Hoch	Auto (0) ▾	▾	▾	▾	▾	▾
Cutback Tief	Auto (0) ▾	▾	▾	▾	▾	▾

Bild 2.5 „iTools“: Bedienoberfläche für den Regler

Automatik / Hand Umschaltung	<p><u>Automatikbetrieb:</u> Regler überwacht kontinuierlich den Istwert und vergleicht ihn mit dem Sollwert. Das Gerät berechnet eine Ausgangsleistung.</p> <p><u>Handbetrieb:</u> Regler gibt die Kontrolle der Ausgangsleistung an den Bediener ab.</p>
Hand Ausgangswert	Ausgangsleistung (in %), wenn der Regler im Handbetrieb arbeitet.
Zielsollwert	Sollwert der Temperatur (in °C)
Proportionalband	Bezogenen Proportionalbereich $X_{P\%}$ (in %) vom Reglerbereich
Integralzeit (Nachstellzeit)	T_I (in Sekunden)
Differentialzeit (Vorhaltzeit)	T_D (in Sekunden)
Freigabe Selbstopтимierung	Einschalten der internen Selbstopтимierung vom Regler

Tabelle 2 Wichtige Reglereinstellungen unter „iTools“

2.4 Datenlogger

Der eingesetzte Datenlogger dient zur Aufzeichnung von Messdaten des Temperatur- und Stellgrößenverlaufs. Mit der Software „ProfiSignal“ (Bild 2.5) kann dieser Verlauf in Echtzeit beobachten und die Messdaten zur Weiterverarbeitung speichern.

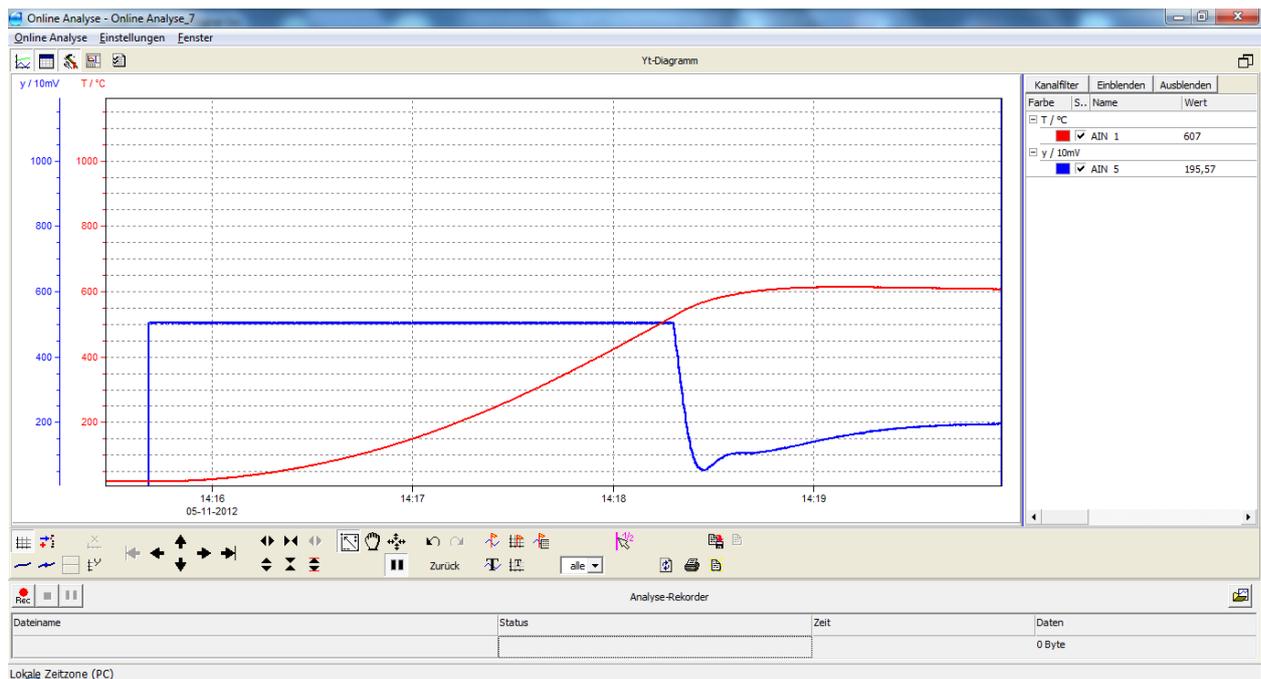


Bild 2.6 „ProfiSignal“ zur Visualisierung der Messdaten

Speichern der Messdaten:

Auf das Diagramm mit der rechten Maustaste klicken.

„Export“ → „ASCII-Export (nur eingeblendete Kanäle)...“

Im Fenster „Zeitbereich“ die Start- und Endzeit eingeben und durch „OK“ bestätigen.

Speicherort für die CSV-Datei wählen.

2.5 Software zur Messdatenverarbeitung

Auf dem Desktop befinden sich vier ausführbare Programme. Sie dienen zur Weiterverarbeitung, Analyse und Archivierung der Messdaten.

- T11_pdf: Erzeugt automatisch eine PDF vom Messdatenverlauf.
- T_11_pdf+WT: Erzeugt eine PDF und berechnet K_S , T_u und T_g zur optimalen Reglereinstellung nach dem Wendetangentenverfahren.

- T11_pdf_PRINT: Erzeugt automatisch eine PDF vom Messdatenverlauf sowie einen Ausdruck auf Papier.
- T_11_pdf+WT_PRINT: Erzeugt eine PDF und berechnet K_S , T_u und T_g zur optimalen Reglereinstellung nach dem Wendetangentenverfahren. Es erfolgt zusätzlich ein Ausdruck auf Papier

Die abgespeicherte CSV-Messdatei kann einfach per „Drag & Drop“ auf einer dieser Programme abgelegt werden, die dann automatisch mit der Verarbeitung beginnt.

3 Versuchsdurchführung T11

Wichtig:

Am Versuchstag ist ein spitzer Bleistift sowie ein Lineal (min. 30 cm) mitzubringen. Ein USB-Speicherstick ist hilfreich, um die am Computer aufgezeichneten Messdaten zur Protokollierung mitnehmen zu können.

- 1.) **Beschreiben Sie kurz den Versuchsaufbau.**
- 2.) **Was versteht man unter dem Proportionalbereich und wo liegt der Unterschied zum bezogenen Proportionalbereich?**
- 3.) **Erklären Sie die statische Kennlinie des Silitrohres. Warum ist die Kennlinie nichtlinear? Welche Konsequenzen ergeben sich dadurch für die Reglereinstellung?**
- 4.) **Erklären Sie das Wendetangentenverfahren. Wann und wie wird es angewendet?**
- 5.) **Untersuchung der Regelstrecke**

Nehmen Sie die Sprungantwort der Strecke auf:

- a) Sprung von 20 °C auf 1000 °C
 - b) Sprung von 1000 °C auf 20 °C
 - c) Sprung von 500 °C auf 700 °C
 - d) Sprung von 700 °C auf 500 °C
- Bestimmen Sie anhand des Wendetangentenverfahrens die Streckenparameter T_u , T_g und K_S .
 - Wodurch kommen die unterschiedlichen Werte von T_u , T_g und K_S zustande?
 - Mit den gemittelten Werten bestimmen Sie die Reglerparameter nach dem Gütekriterium (Überschwingen nach Gegenseite mit 20 % von x_m) für einen P-, PI- und PID-Regler.

6.) Untersuchung einzelner Regler

Die Ihnen am Versuchstag ausgeteilte Aufzeichnung zeigt mehrere Übergangsfunktionen unterschiedlicher Reglertypen nach einem Temperatursprung. Zunächst hat der Regler einen Soll- und Istwert von 600°C, d.h. es findet kein Regelvorgang statt. Auf den Regler wird nun ein Sollwertsprung von 600°C auf 700°C gegeben und das Zeitverhalten aufgenommen. Dabei ist der Regelkreis geöffnet, d.h. der Silitofen ist nicht in Betrieb.

Bestimmen Sie den Reglertyp und die notwendigen Reglerparameter aus den aufgenommenen Kurven.

$X_{P\%}$ wird folgendermaßen berechnet:

$$X_{P\%} = \frac{100\% \cdot 100\text{ K}}{y [\text{mm}] \cdot \frac{100\%}{101,4\text{ mm}} \cdot 1200\text{ K}} \cdot 100\% = \frac{845\text{ mm}}{y [\text{mm}]} \%$$

Die Zeitkonstanten T_I und T_D werden aus den Steigungen bzw. aus dem Sprung abgelesen (siehe Umdruck).

7.) Untersuchung des Regelkreises

Bestimmen Sie die Übergangsfunktion der Strecke auf einen Störgrößensprung, bei Verwendung von den unter 5.) berechneten Regeln. Der Störgrößensprung wird bei der Solltemperatur von 600 °C durch Anschalten des Föns verursacht.

- a) Regeln von Hand
 - b) Einsatz des P-Reglers
 - c) Einsatz des PI-Reglers
 - d) Einsatz des PID-Reglers
- Beschreiben und beurteilen Sie das Regelverhalten der einzelnen Regler (Regelabweichung, dynamisches Verhalten, Ausregelzeit, Überschwingverhalten).
 - Wird das Gütekriterium (Überschwingungen nach Gegenseite mit 20 % von x_m) eingehalten?
 - Welcher Regler ist für die Regelung der Strecke am besten geeignet?

8.) Selbstoptimierung des Reglers

Der Regler Eurotherm 3504 besitzt eine eingebaute Selbstoptimierung, die nach einem speziellen Verfahren die Reaktion der angeschlossenen Regelstrecke untersucht und optimale Regelparameter ermittelt.

Aktivierung und Ablauf der Selbstoptimierung:

- Regler muss im „Manual-Modus“ sein und der „Ausgangswert“ auf 0
- bei „iTools“ unter „Freigabe Selbstoptimierung“ auf „Ein(1)“
- Solltemperatur auswählen und dann in den Auto-Modus wechseln
- die Selbstoptimierung startet 1 Minute nach dem Einschalten
- die Leistung wird automatisch ein- und ausgeschaltet, um Schwingungen zu erzeugen
- vom Ergebnis werden die PID-Einstellungen berechnet und in die „iTools“ Oberfläche übertragen

Führen Sie nun den Versuchsteil 7.) mit dieser Reglereinstellung durch. Beurteilen Sie das Regelverhalten dieses Reglers wie unter 7.) beschrieben.

Ziel des Protokolls soll die Auswertung und die Reproduzierbarkeit des Versuchs sein.

4 Literaturverzeichnis

- [1] - Busch, P.: *Elementare Regelungstechnik*
Würzburg: Vogel, 2002
- [2] - Schleicher, M.: *Regelungstechnik für den Praktiker*
Fulda: JUMO GmbH & Co. KG, 2006
- [3] - Unbehauen, R.: *Regelungstechnik I / II*
Braunschweig: Vieweg & Sohn Verlag, 1995
- [4] - Föllinger, O.: *Nichtlineare Regelungen*
München: Oldenburger Verlag, 1978
- [5] - Merz, L./Jaschek, H.: *Grundkurs der Regelungstechnik*
München, Wien: Oldenbourger Verlag, 2003
- [6] - Hildebrand, J.: *Temperaturregelung mit Mikroprozessorunterstützung*
Hannover: Studienarbeit Nr. 303/236, 1987
- [7] - Krah, O.: *Skript zur Vorlesung Regelungstechnik*
Köln: Fachhochschule Köln, 2012
- [8] - DIN 19226: *Regelungstechnik und Steuerungstechnik*