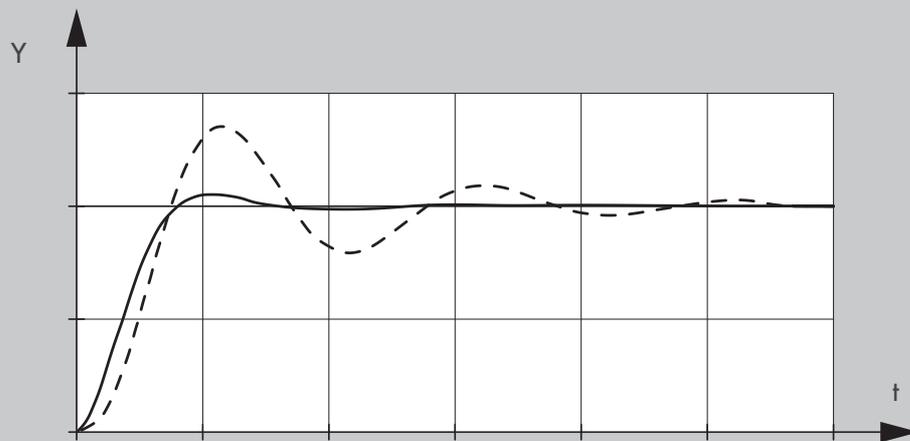
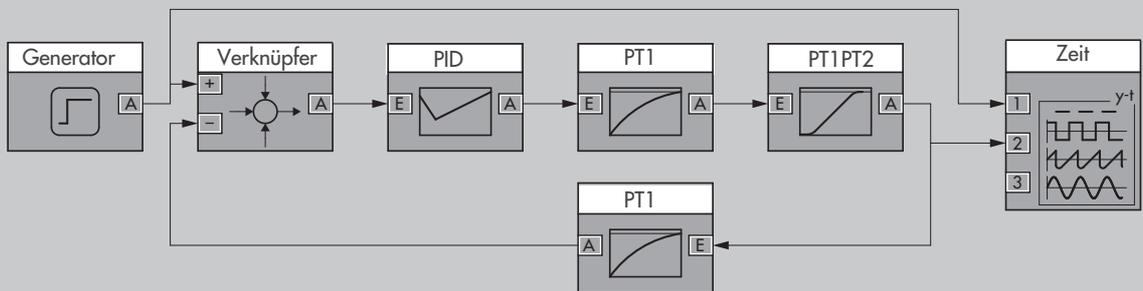


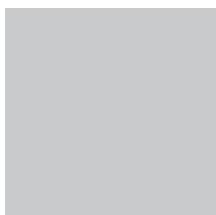
Regler und Regelstrecken





Technische Informationen

- Teil 1: Grundlagen
- Teil 2: Regler ohne Hilfsenergie
- Teil 3: Stellventile
- Teil 4: Kommunikation
- Teil 5: Gebäudeautomation
- Teil 6: Prozessautomation



Bitte richten Sie Rückfragen und Anregungen an:

SAMSON AG
Technischer Verkauf – Schulung
Weismüllerstraße 3
60314 Frankfurt
E-Mail: schulung@samson.de
Internet: <http://www.samson.de>

Regler und Regelstrecken

Einleitung	5
Regelstrecken.	7
P-Regelstrecke	8
I-Regelstrecke	9
Regelstrecke mit Totzeit	11
Regelstrecke mit Energiespeichern.	12
Charakterisierung von Regelstrecken	18
Streckenverhalten	18
Proportionalbeiwert	18
Nichtlineares Verhalten	19
Arbeitspunkt.	20
Regelbarkeit einer Strecke mit Ausgleich	21
Regler und Regelglieder	23
Klassifizierung	23
Stetige und unstetige Regler	24
Hilfsenergie	24
Bestimmung des dynamischen Verhaltens	25
Stetige Regler	27
P-Regler (Proportionalregler)	27
Proportionalbeiwert	27
Regelabweichung	29
Einstellung des Arbeitspunktes	30

P-Regelung am Beispiel einer Füllstandsregelung	32
I-Regler (Integralregler)	35
D-Regler (Differentialregler)	38
PI-Regler	40
PID-Regler	42
Unstetige Regler	45
Zweipunktregler	45
Zweipunktregler mit Rückführung	48
Dreipunktregler und Dreipunktschrittregler	48
Reglerauswahl	50
Auswahlkriterien	50
Einstellung der Regelparameter	51
Anhang A1: Ergänzende Literatur	54

INHALT

Einleitung

Das Wort 'Regeln' wird im Sprachgebrauch in vielfältigen Abwandlungen täglich verwendet. Irgendeine Angelegenheit ist zu regeln, etwa ein Geldproblem, eine zwischenmenschliche Beziehung oder eine Personalentscheidung. Regelnd kann man in einen Streit eingreifen oder in eine Gesprächsrunde. Unter Regeln versteht man offenbar die Wiederherstellung eines gewünschten Zustandes, der durch äußere oder innere Einflüsse in Unordnung geraten ist.

**'Regeln' im
Sprachgebrauch**

Regelvorgänge existieren in den verschiedensten Bereichen. So gibt es in der Natur Regelvorgänge, die Pflanzen und Tiere vor schwankenden Umweltbedingungen schützen. In der Wirtschaft werden Preis und Lieferzeit durch Angebot und Nachfrage geregelt. In allen Fällen können Störungen auftreten, die den ursprünglich hergestellten Zustand verändern. Die Regelung hat die Aufgabe, den gestörten Zustand zu erkennen und mit geeigneten Mitteln zu korrigieren.

In ganz ähnlicher Weise wie bei Mensch, Natur und Wirtschaft müssen auch im technischen Bereich viele Größen geregelt werden, damit Geräte und Anlagen ihren vorbestimmten Zweck erfüllen. So muss in der Heizungstechnik die Raumtemperatur konstant gehalten werden, obwohl äußere Einflüsse – wie die veränderlichen Außentemperaturen oder die Nutzergewohnheiten (z. B. Lüften des Raumes) – diesen Prozess stören.

Im technischen Bereich wird der Begriff 'Regelung' nicht nur für den Vorgang des Regels verwendet, sondern auch für die Anlage, in der eine Regelung stattfindet. Auch der Mensch kann als Teil des Regelkreises an einer Regelung mitwirken. Die DIN IEC 60050-351 definiert den Begriff der Regelung wie folgt:

**'Regeln' im
technischen Sinn**

„Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst.“

**kontinuierliche oder
abtastende Regelung**

Anmerkung: Als 'fortlaufend' gilt hier auch eine hinreichend häufige Wiederholung von gleichartigen Einzelvorgängen. Der zyklische Programmablauf der digitalen Abtastregelung ist dafür ein Beispiel.

Diese etwas abstrakte Definition soll im Folgenden anhand von praktischen Beispielen aus der Regelungstechnik veranschaulicht werden. Dazu werden die Regelstrecken und Regler zum einen als eigenständige Übertragungsglieder erläutert, zum anderen wird das Verhalten im geschlossenen Regelkreis dargestellt und verglichen.

Die im Folgenden verwendeten Begriffe, Größen und Variablen sind konform zum Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (DIN IEC 60050-351:2009-06). Davon abweichende, aber noch gebräuchliche Formelzeichen gemäß der im Jahr 2009 zurückgezogenen Norm DIN 19226 sind unten gegenübergestellt.

Bezeichnung	DIN IEC 60050-351	DIN 19226
Totzeit	T_t	T_L
Verzugszeit	T_e	T_u
Ausgleichszeit	T_b	T_g
Nachstellzeit	T_i	T_n
Integrierzeit	T_I	T_I
Vorhaltzeit	T_d	T_v

Regelstrecken

In der Regelungstechnik wird eine zu regelnde Strecke in erster Linie durch ihr Zeitverhalten charakterisiert. Dieses bestimmt, mit welchem Aufwand und mit welcher Güte sich eine regelungstechnische Aufgabe lösen lässt. Um dieses Zeitverhalten – die Streckendynamik – darzustellen, verwendet man häufig die so genannte Sprungantwort der Regelstrecke.

Die Sprungantwort zeigt anschaulich, in welcher Weise die Regelgröße auf Stellgrößenänderungen reagiert. Dazu wird die Regelgröße nach einer sprunghaften Änderung der Stellgröße gemessen. Je nachdem, welcher zeitliche Verlauf sich einstellt, unterteilt man die Regelstrecken in:

- ▶ P-Regelstrecken (proportionales Verhalten),
- ▶ I-Regelstrecken (integrales Verhalten),
- ▶ Strecken mit Totzeit und
- ▶ Strecken mit Energiespeichern (erster, zweiter oder höherer Ordnung).

In den folgenden Kapiteln wird diese Klassifizierung näher erläutert, wobei auch auf die Regelbarkeit der Strecken eingegangen wird. Hierzu muss unterschieden werden, ob sich nach einer Stellgrößenänderung oder einer Störung ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt oder ob sich die Regelgröße stetig verändert (steigt oder fällt):

- ▶ Strecken mit Ausgleich streben einem neuen stationären Endwert zu.
- ▶ Strecken ohne Ausgleich erreichen keinen neuen Gleichgewichtszustand.

Strecken ohne Ausgleich erfordern zwingend eine Regelung, denn die Stellgröße des Reglers muss zurückgenommen bzw. zu null werden, sobald die Regelgröße den geforderten Gleichgewichtszustand erreicht hat. Nur mit der Rückführung des geschlossenen Wirkungskreises erreicht man dies zum richtigen Zeitpunkt und im rechten Maß. Die Praxis zeigt, dass sich Strecken ohne Ausgleich häufig schwieriger regeln lassen, da sie zum Schwingen bzw. zu Instabilitäten neigen. Umso wichtiger ist hier die gut angepasste Reglereinstellung.

**Klassifizierung von
Regelstrecken**

**mit oder
ohne Ausgleich**

P-Regelstrecke

Bei Regelstrecken mit Proportionalverhalten ändert sich die Regelgröße x proportional mit der Stellgröße y . Dabei folgt die Regelgröße der Stellgröße ohne die geringste Verzögerung. Der Proportionalitätsfaktor wird als K_p abgekürzt und häufig – leider nicht immer richtig – als Streckenverstärkung bezeichnet. Ist K_p kleiner als eins, wirkt es nicht verstärkend, sondern abschwächend.

Da jede Übertragung von Energie eine endliche Zeit benötigt, kommt das reine proportionale Verhalten in der Praxis nicht vor. Ist die Verzögerung zwischen Stell- und Regelgröße jedoch so gering, dass sie sich regelungstechnisch nicht auswirkt, spricht man von der proportionalen bzw. P-Strecke.

► Beispiel: Durchflussregelung

Verändert man bei der Druckregelstrecke aus Bild 1 den Ventilhub, so stellt sich (fast) sofort ein neuer Durchfluss q ein. Bei entsprechender Ventilkennlinie verläuft die Regelgröße proportional zur Stellgröße: Die Strecke hat dann ein proportionales Verhalten.

Bild 2 zeigt das Blockschaltbildsymbol für proportionales Verhalten und das zeitliche Verhalten einer P-Strecke bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße. Die Kennlinien machen deutlich, dass eine proportionale Strecke eine Strecke mit Ausgleich ist, denn sofort nach dem Sprung stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein.

reines P-Verhalten ist nur theoretisch möglich

ohne Verzug im neuen Gleichgewichtszustand

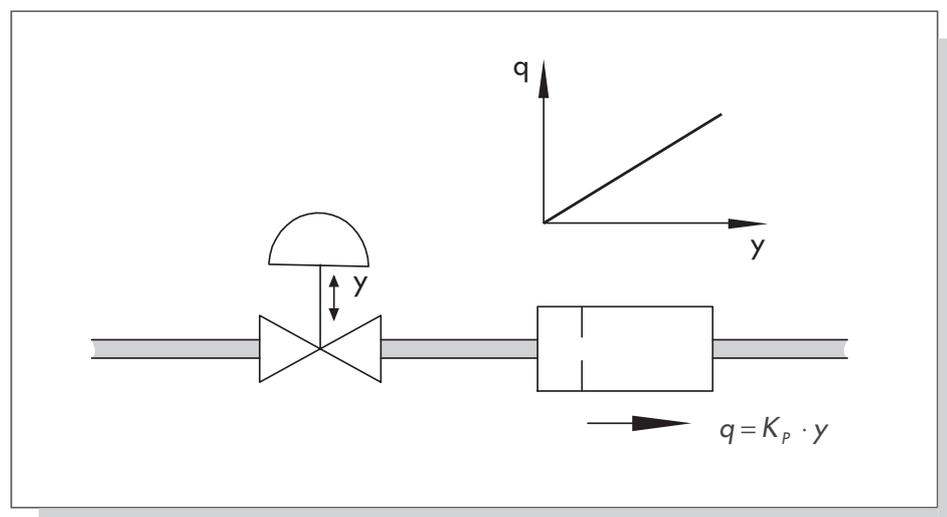


Bild 1: Proportionale Regelstrecke; Regelgröße: Durchfluss q

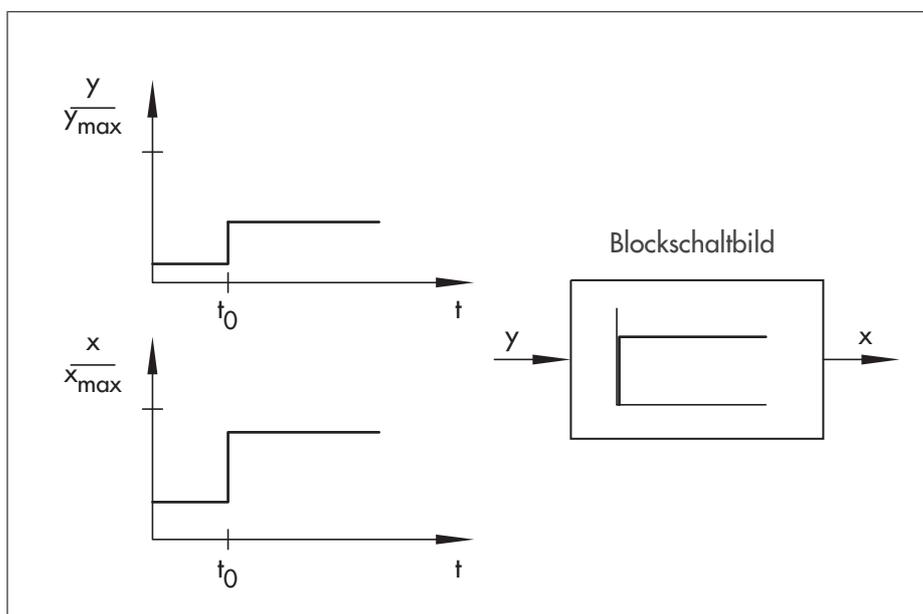


Bild 2: Zeitverhalten einer P-Regelstrecke
(y: Hub des Stellventils, x: Durchfluss in der Rohrleitung)

I-Regelstrecke

Eine integrale Regelstrecke ist eine Strecke ohne Ausgleich. Ist die Stellgröße ungleich null, nimmt die integrale Strecke keinen Gleichgewichtszustand ein. Sie antwortet mit einer fortwährenden Änderung – stetigem Steigen oder Fallen – der Regelgröße.

► Beispiel: Füllstandsregelung (Bild 3)

Bei einem Behälter mit Abfluss, dessen Zu- und Ablaufvolumenstrom gleich groß sind, stellt sich eine konstante Füllhöhe ein. Verändert sich der Durchfluss des Zu- oder Ablaufs, steigt oder fällt der Flüssigkeitsspiegel. Dabei verändert sich der Pegel umso schneller, je größer die Differenz zwischen Zu- und Ablauf ist.

Das Beispiel lässt erkennen, dass das Integralverhalten in der Praxis zumeist eine Begrenzung hat. Die Regelgröße steigt oder fällt nur so lange, bis sie einen systembedingten Grenzwert erreicht: Behälter läuft über oder leer, Druck erreicht Anlagenmaximum oder Minimum etc.

Bild 4 zeigt das zeitliche Verhalten einer I-Strecke bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße sowie das daraus abgeleitete Blockschaltbild-

Strecke ohne Ausgleich

Randbedingungen begrenzen das I-Verhalten

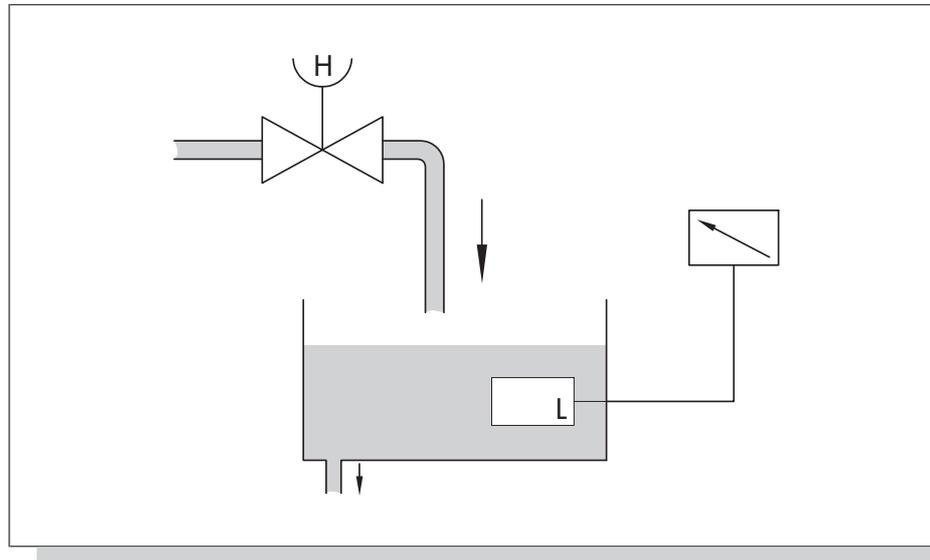


Bild 3: Integrale Regelstrecke, Regelgröße: Füllstand

**kleine Integrierzeit
bewirkt hohe Anstiegs-
geschwindigkeit**

symbol für integrales Verhalten. Die Integrierzeit T_I dient als Maß für das Integralverhalten und steht für die Anstiegsgeschwindigkeit der Regelgröße. Der zugehörige mathematische Zusammenhang ist im Abschnitt 'Regler und Regelglieder' näher erläutert.

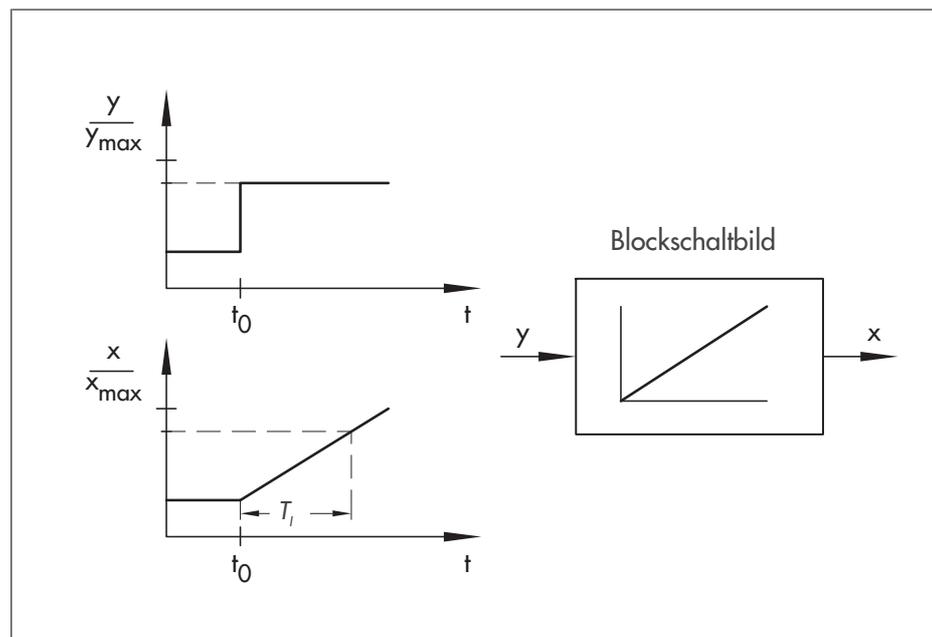


Bild 4: Zeitverhalten einer I-Regelstrecke
(y: Ventilhub, x: Füllstandshöhe eines Behälters)

Regelstrecke mit Totzeit

Bei einer Strecke mit Totzeit wirkt sich ein Stelleingriff erst nach Ablauf einer Zeitspanne auf die Regelgröße aus. Als Maß für die Tot- oder Laufzeit dient die Zeitkonstante T_T .

► Beispiel: Fördermengenverstellung beim Transportband (Bild 5)

Wird über den Stellschieber die Schüttgutmenge auf das Transportband erhöht, so ändert sich das am Einbauort des Sensors gemessene Volumen erst nach einer gewissen Laufzeit.

**verzögerte
Stellwirkung durch
Laufzeiten**

Druckregelungen in langen Gasleitungen verhalten sich in ähnlicher Weise. Da das Medium kompressibel ist, dauert es eine Zeit, bis sich am Ende der Rohrleitung der neue Druckzustand einstellt.

Häufig entstehen Totzeiten durch diverse Stellglieder im Regelkreis. Diese werden z. B. durch die Schaltzeiten von Schützen oder ein Spiel in einer Getriebeübersetzung hervorgerufen.

Totzeiten bereiten in der Regelungstechnik große Schwierigkeiten, da sich Stellgrößenänderungen zeitverzögert auf die Regelgröße auswirken. Aufgrund dieser Verzögerung kommt es bei der Regelung von Strecken mit Totzeiten schnell zu Schwingungen. Diese entstehen immer dann, wenn sich Regelgröße und Stellgröße – um die Totzeit versetzt – periodisch zueinander ändern.

**Schwingneigung bei
Strecken mit Totzeiten**

In vielen Fällen lassen sich Totzeiten durch geschickte Planung vermeiden oder minimieren (Anordnung von Sensor und Stellgerät, möglichst kurze Rohrleitungen, geringe Wärmekapazitäten der Isolationsmedien etc.).

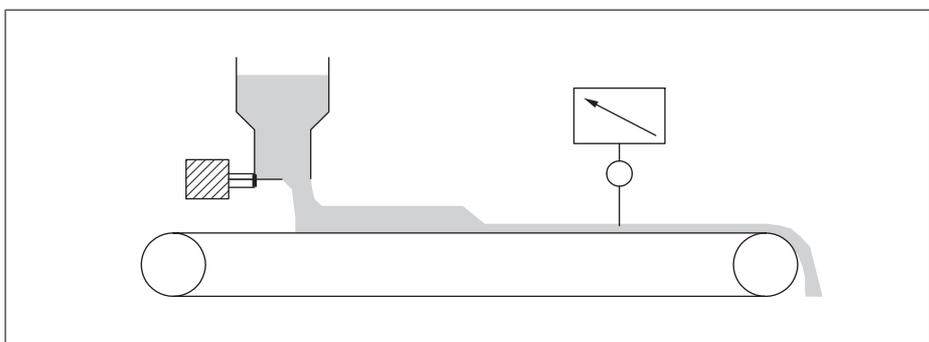


Bild 5: Regelstrecke mit Totzeit; Regelgröße: Transportvolumen

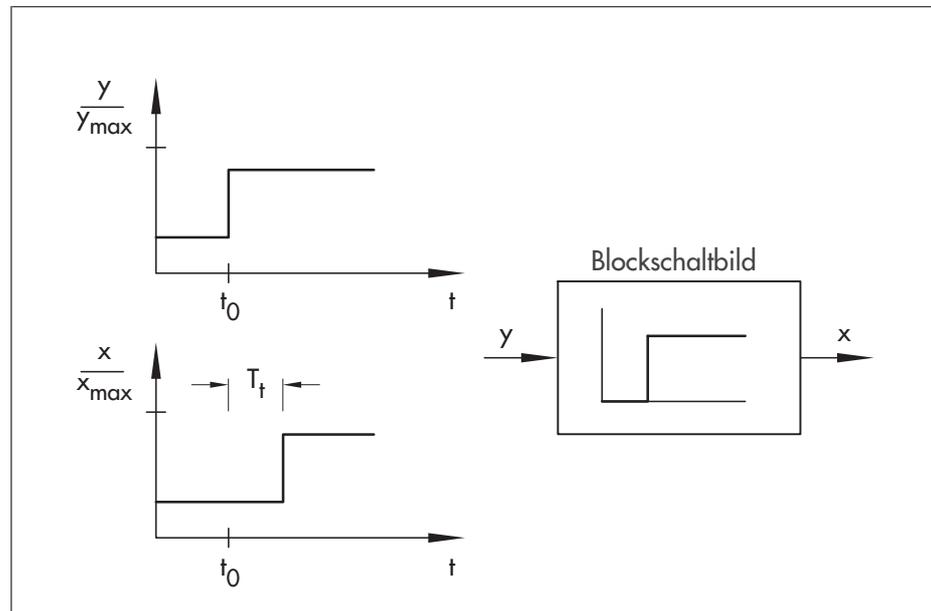


Bild 6: Zeitverhalten einer Regelstrecke mit Totzeit
(y: Schieberstellung, x: Transportvolumen)

durch Speicher
verursachte
Verzögerungen

Regelstrecke mit Energiespeichern

Verzögerungen zwischen Stell- und Regelgrößenänderung entstehen nicht nur aufgrund von Totzeiten. Jede Regelstrecke besitzt zumeist mehrere Energiespeicher (z. B. Heizungsanlage mit wärmespeichernden Rohren, Wänden, Isolationen). Aufgrund dieser Speicher, deren energetischer Zustand sich nur allmählich verändern kann, läuft jede Energieaufnahme oder -abgabe zeitverzögert ab. Dies gilt auch für alle Zustandsänderungen der Regelstrecke, denn diese beruhen ursächlich auf der Übertragung oder Umwandlung von Energie.

► Beispiel: Raumtemperaturregelung

Eine Heizungsanlage stellt eine Strecke mit vielen Energiespeichern dar: Heizkessel, Wasser, Heizkörper, Raumluft, Wände usw.

Wenn man die Energiezufuhr des Heizkessels verändert oder in dem beheizten Raum das Heizkörperabsperrventil betätigt, ändert sich die Raumtemperatur nur allmählich bis zum Erreichen eines neuen Endwertes.

Exponentialfunktionen
charakterisieren das
Zeitverhalten

Charakteristisch für Regelstrecken mit Speichern ist, dass der stationäre Endwert erst nach endlicher Zeit erreicht wird (siehe Bild 7), und dass sich während der Übergangszeit die Änderungsgeschwindigkeit der Prozessgröße x

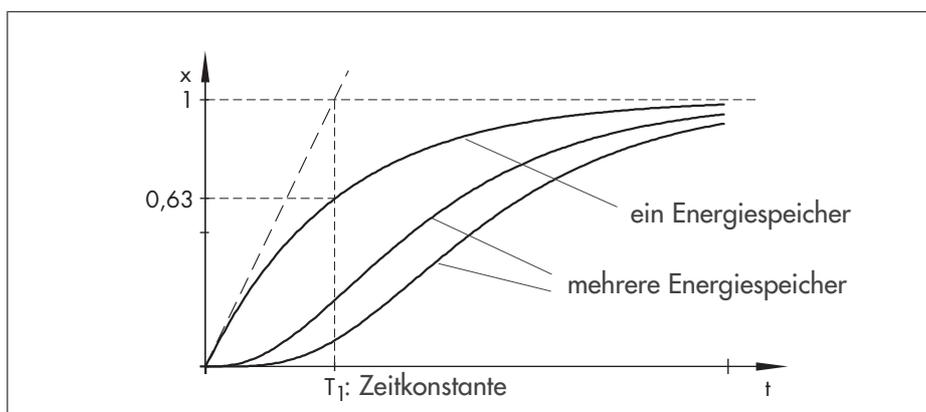


Bild 7: Exponentialfunktionen beschreiben Strecken mit Energiespeichern

verändert. Grundsätzlich gilt, dass nahe des neuen Gleichgewichtszustandes die Veränderung immer langsamer abläuft, bis sie schließlich – asymptotisch – den Endwert erreicht. Während sich bei Strecken mit Totzeit die Ausgangsgröße sprunghaft ändern kann, sind bei Energiespeichern stets nur stetige Änderungen möglich.

Das Zeitverhalten der Strecke hängt von den wirksam werdenden Verzögerungen und damit von der Größe der vorhandenen Speicher ab. Es wird im Wesentlichen von den großen Speichern bestimmt, so dass kleinere oftmals unberücksichtigt bleiben.

► Beispiel: Raumtemperaturregelung

Das dynamische Verhalten einer Raumtemperaturregelung wird maßgeblich von der Brennerleistung, der Kessel-, Raum- und Heizkörpergröße bestimmt und ist nur in geringem Maß von der Wärmekapazität der Heizungsrohre abhängig.

Strecken mit Energiespeichern unterscheidet man nach der Anzahl ihrer wirksamen Verzögerungen. So enthält eine Strecke 1. Ordnung einen zeitbestimmenden Energiespeicher, eine Strecke 2. Ordnung zwei Energiespeicher usw. Zeigt eine Strecke keine verzögernde Wirkung, so wird sie auch als 'Strecke nullter Ordnung' bezeichnet (vgl. P-Strecke). Ein flüssigkeitsgefülltes Drucksystem, das keinerlei Ausgleichsgefäße enthält, kommt solch einem Verhalten nahe.

Klassifizierung von Strecken mit Verzögerungen

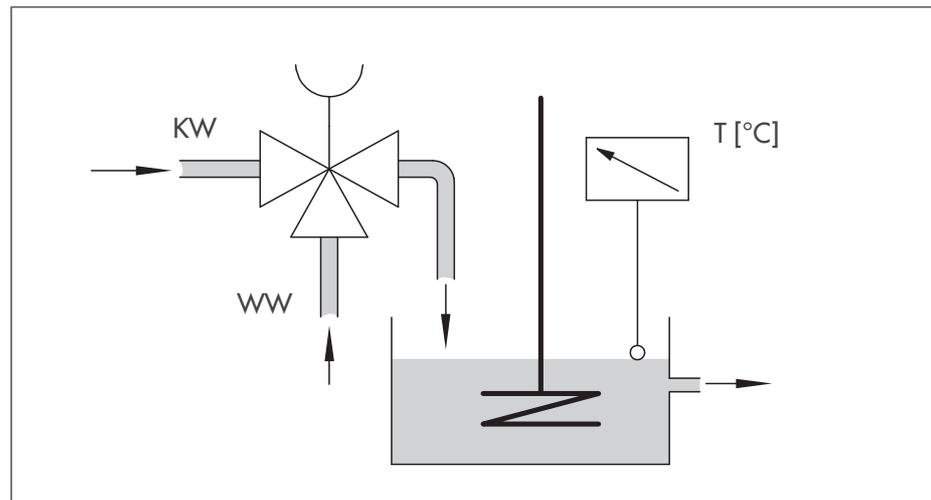


Bild 8: Regelstrecke 1. Ordnung; Regelgröße: Temperatur

- Verzögerung 1. Ordnung

Temperaturregelung über ein Mischventil

Eine Strecke 1. Ordnung mit nur einem zeitbestimmenden Energiespeicher skizziert Bild 8: Die Temperatur einer Flüssigkeit in einem Behälter mit Zufluss, Abfluss und Rührwerk wird über ein Mischventil eingestellt. Aufgrund des großen Behältervolumens ändert sich die Temperatur nach einer sprunghaften Ventilverstellung erst allmählich.

Das zeitliche Verhalten dieser Strecke 1. Ordnung zeigt Bild 9. Als Maß für die Verzögerungswirkung dient die Zeitkonstante T_1 . Sie gibt an, wann die

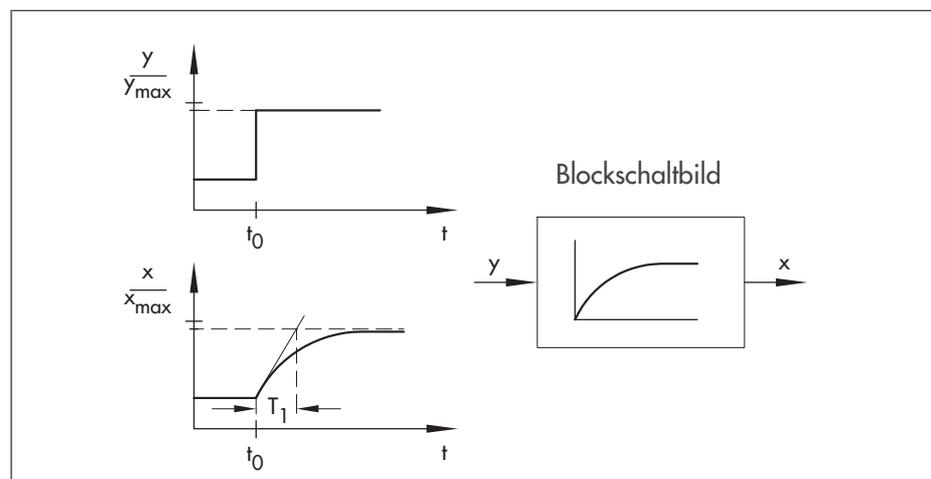


Bild 9: Zeitverhalten einer Regelstrecke 1. Ordnung: PT_1 -Glied (y: Ventilstellung, x: Temperatur der Behälterflüssigkeit)

Regelgröße x nach einem Eingangssprung 63 % ihres späteren Endwertes erreicht (siehe auch Bild 7). Der zugehörige Funktionsverlauf ergibt sich aus:

Man bezeichnet ein solches verzögertes Proportionalverhalten erster Ordnung auch als PT_1 -Verhalten. Je größer die Zeitkonstante T_1 ist, umso langsamer ändert sich die Regelgröße und umso größer ist der Energiespeicher, der diese Verzögerung hervorruft.

Wenn das Zeitverhalten einer Strecke nur als Messkurve vorliegt, lässt sich T_1 mit Hilfe der im Bild 7 und 9 eingezeichneten Tangente auf einfache Weise grafisch ermitteln.

- Verzögerungen 2. und höherer Ordnung

Liegen zwischen der Stellgröße und der Regelgröße zwei oder mehr Energiespeicher, spricht man von einer Regelstrecke 2. oder höherer Ordnung (auch PT_2 -, PT_3 -Strecke usw. genannt). Durch die Hintereinanderschaltung von zwei Strecken 1. Ordnung entsteht – wie in Bild 10 dargestellt – eine Strecke 2. Ordnung.

Das Zeitverhalten einer solchen Regelstrecke geben die Kennlinien aus Bild 11 wieder. Die Sprungantwort der Regelgröße zeigt einen für Strecken höherer Ordnung charakteristischen Wendepunkt (Bild 12): Die Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße nimmt bis zum Wendepunkt zunächst zu, um anschließend kontinuierlich abzunehmen (vergleiche das Verhalten der

Zeitkonstante definiert das dynamische Verhalten

Strecke n-ter Ordnung hat PT_n -Verhalten

Sprungantwort mit Wendepunkt ...

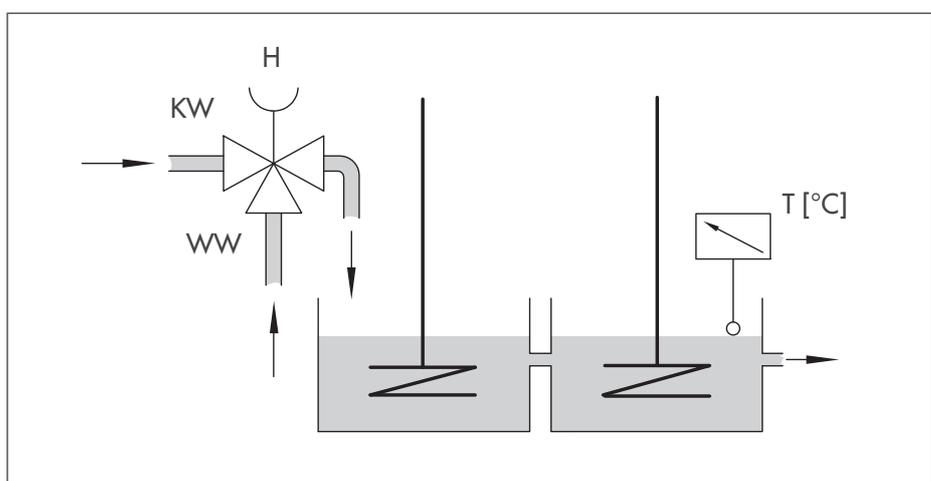


Bild 10: Regelstrecke 2. Ordnung; Regelgröße: Temperatur

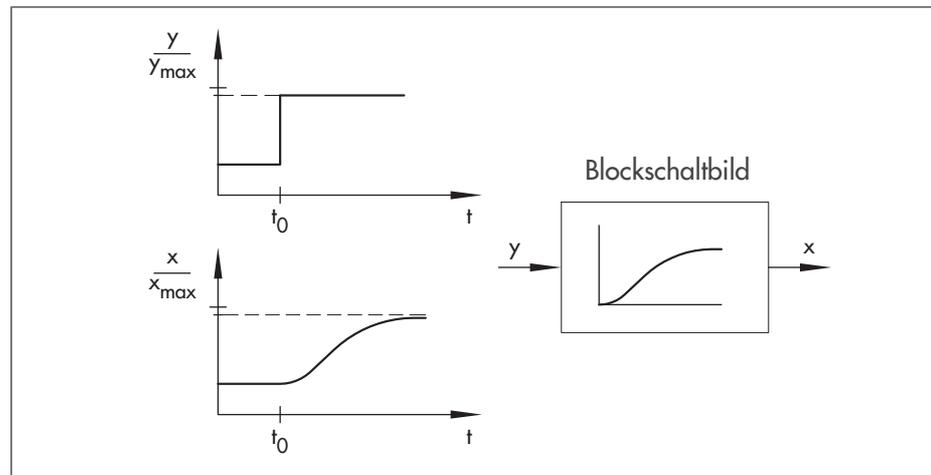


Bild 11: Zeitverhalten einer Regelstrecke 2. oder höherer Ordnung
(y: Ventilstellung, x: Temperatur des Mediums im zweiten Behälter)

... und den
Zeitkonstanten der
einzelnen PT_1 -Glieder

Strecke 1. Ordnung in Bild 9). Mathematisch wird das Übertragungsverhalten einer Strecke höherer Ordnung durch die Zeitkonstanten T_1, T_2 usw. der Einzelsysteme beschrieben.

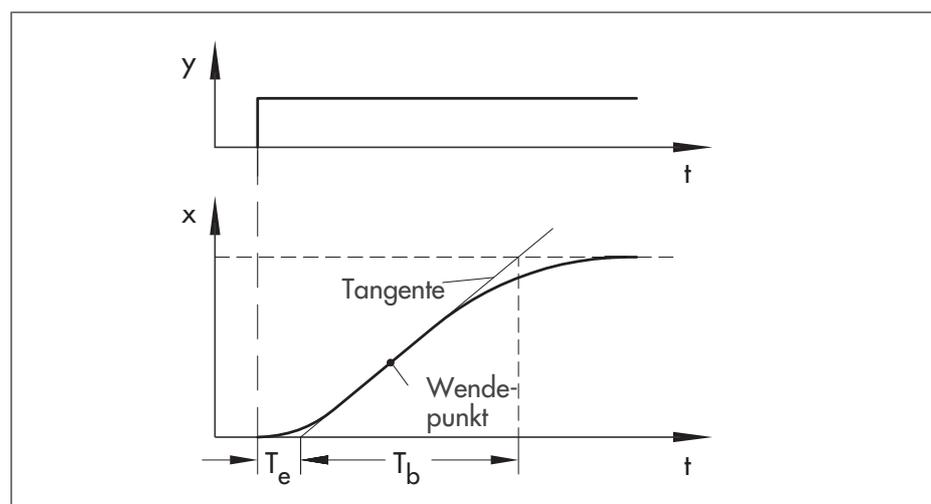


Bild 12: Sprungantwort einer Regelstrecke höherer Ordnung mit den charakteristischen Werten T_e und T_b

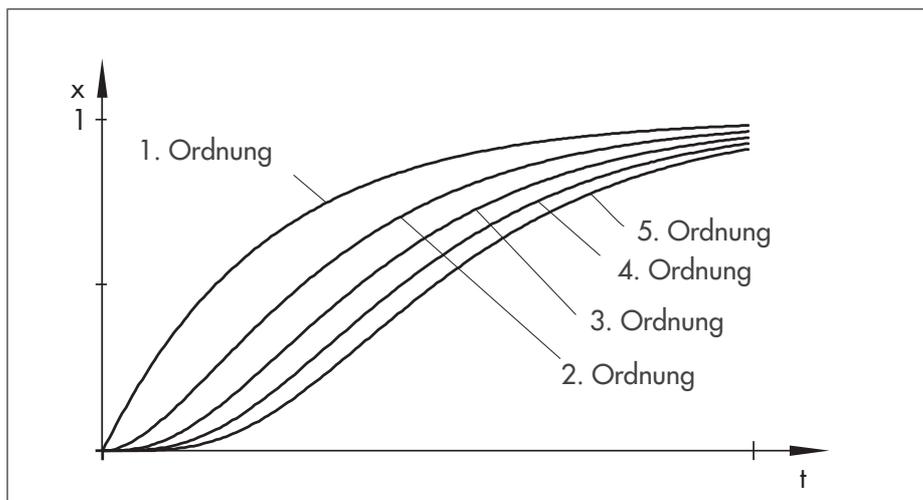


Bild 13: Zeitverhalten von Regelstrecken höherer Ordnung

Mit jedem weiteren Energiespeicher erhöht sich die Ordnung einer Strecke. Die Sprungantworten in Bild 13 zeigen deutlich, dass damit gleichzeitig die zeitverzögernde Wirkung der Strecke steigt. Zur vereinfachten Charakterisierung dieses Verhaltens definiert man mit Hilfe der Wendepunkt-Tangenten die Verzugszeit T_e und die Ausgleichszeit T_b (Bild 12). Da die Verzugszeit wie eine Totzeit wirkt, lässt sich eine Strecke schlechter regeln, deren T_e in die Größenordnung der Ausgleichszeit T_b kommt.

Die Regelbarkeit verbessert sich hingegen, wenn die Zeitkonstanten im Vergleich zur erforderlichen Einschwingzeit des Regelkreises möglichst klein sind. Auch stark unterschiedliche Zeitkonstanten (Faktor 10 oder größer) vereinfachen die Reglerabstimmung, da sich diese dann auf den größten, den zeitbestimmenden Wert konzentrieren kann. Bei der Auslegung der Regelkreise – möglichst schon beim Entwurf der Anlage – sollten diese Zusammenhänge berücksichtigt werden.

Vereinfachte Betrachtung durch T_e und T_b

Zeitkonstanten charakterisieren das Regelverhalten

Charakterisierung von Regelstrecken

**Strecken
zusammengesetzt aus
verschiedenen
Teilsystemen**

Streckenverhalten

Eine komplexe Regelstrecke lässt sich durch das Zusammenwirken von verschiedenen Teilsystemen beschreiben, denen für sich genommen P-, I-, Totzeit- oder verzögertes Verhalten zugeordnet werden kann. Das Streckenverhalten ergibt sich dementsprechend aus dem Zusammenwirken dieser Einzelelemente (Bild 14: Stellantrieb mit Getriebelose). In den meisten Fällen stellt sich proportionales oder integrales Verhalten erst nach einer gewissen Verzögerung und/oder Totzeit ein.

**nur Zeit bestimmende
Elemente sind wichtig**

Die streckenspezifischen Verzögerungen und/oder Totzeiten können aber auch so klein sein, dass sie bei der Regelung nicht berücksichtigt werden müssen. So ist bei Temperaturregelungen die kurze Zeit für das Öffnen des Stellventils zumeist vernachlässigbar gegenüber der viel längeren Heizzeit.

Proportionalbeiwert

Eine wichtige regelungstechnische Größe für die Charakterisierung von Regelstrecken mit Ausgleich ist der Faktor K_{PS} . Er sagt aus, in welchem Maß

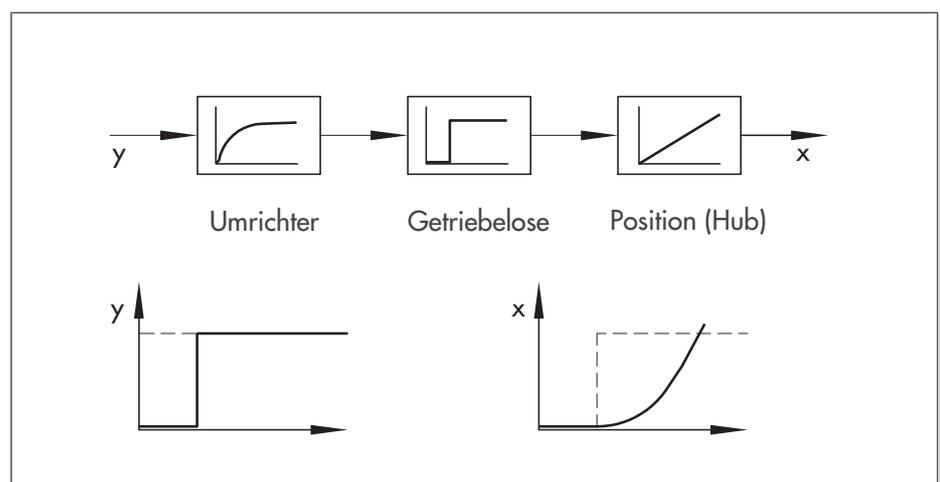


Bild 14: Zeitverhalten eines Stellantriebes mit Getriebelose
(verzögertes Integralverhalten mit Totzeit)

sich die Regelgröße x verändert, wenn die Stellgröße y verstellt wird. Dabei werden jeweils eingeschwungene – stationäre – Zustände vorausgesetzt:

$$K_{PS} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}$$

Zur Berechnung von K_{PS} muss die Strecke nach einem Stellgrößensprung Δy einen neuen Gleichgewichtszustand einnehmen. Da diese Bedingung nur Strecken mit Ausgleich erfüllen, ist K_{PS} für Strecken ohne Ausgleich nicht definiert.

K_{PS} : **Proportionalbeiwert der Strecke**

Der Faktor K_{PS} wird häufig als Streckenverstärkung bezeichnet. Diese Bezeichnung ist nicht ganz korrekt. Ist K_{PS} kleiner als eins, wirkt er nicht verstärkend, sondern abschwächend. Richtig heißt es deshalb: 'Proportionalbeiwert der Strecke'. Damit die obige Beziehung einheitenunabhängig ist, werden Eingangs- und Ausgangssignal normiert, indem sie durch ihre Maximalwerte (100 %-Wert) geteilt werden.

Nichtlineares Verhalten

In vielen praktischen Anwendungen ist K_{PS} nicht über den gesamten Regelbereich konstant, sondern ändert sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebspunkt. Ein solches Verhalten wird als nichtlinear bezeichnet. Nichtlineares Verhalten tritt u. a. häufig bei Temperaturregelstrecken auf.

Zeitverhalten hängt vom Betriebspunkt ab

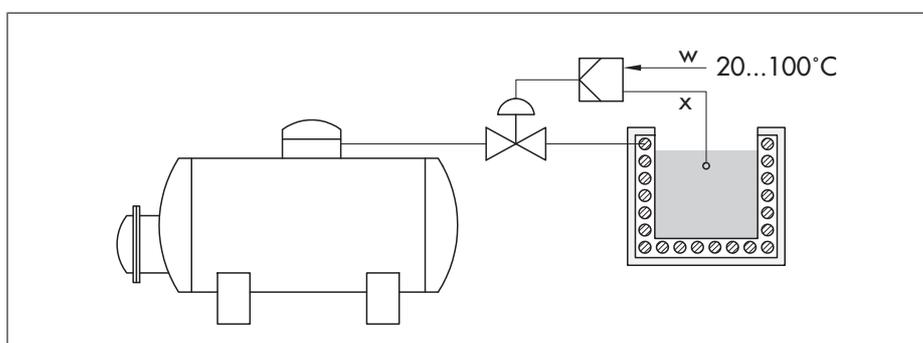


Bild 15: Dampfbeheizter Behälter

**Wärmestrahlung
ändert sich mit der
Temperaturdifferenz**

► Beispiel: Erwärmung eines dampfbeheizten Behälters (Bild 15)

Das dampfbeheizte Wasserbad ist eine Regelstrecke mit Ausgleich. Das Wasserbad und das Behältermaterial, in das die Rohrleitung eingebettet ist, stellen zwei große Wärmespeicher dar, die als Regelstrecke 2. Ordnung betrachtet werden können. Da ein Körper mit steigender Temperatur immer mehr Wärme an die Umgebung abgibt, ändert sich der Proportionalbeiwert K_{PS} mit der Wasserbadtemperatur. Mit der gleichen Energiemenge erzielt man daher bei hoher Temperatur eine geringere Temperaturerhöhung, als dies bei niedrigen Temperaturen der Fall ist (Bild 16). Deshalb gilt hier:

$$K_{PS}(0^\circ\text{C}) > K_{PS}(100^\circ\text{C})$$

Arbeitspunkt (AP)

**Nichtlinearitäten
erschweren die
Regelung**

Analysiert man das Verhalten von nichtlinearen Strecken mit Hilfe von Sprungantworten, so zeigt sich an jedem Betriebspunkt ein anderes dynamisches Verhalten der Regelgröße. Bei der oben skizzierten Wasserbaderwärmung ergeben sich für K_{PS} , T_e und T_b abhängig von der Betriebstemperatur unterschiedliche Werte. Für die Regelung ist dieses Verhalten von Nachteil, da es zu einem betriebspunktabhängigen Regelverhalten der Strecke führt.

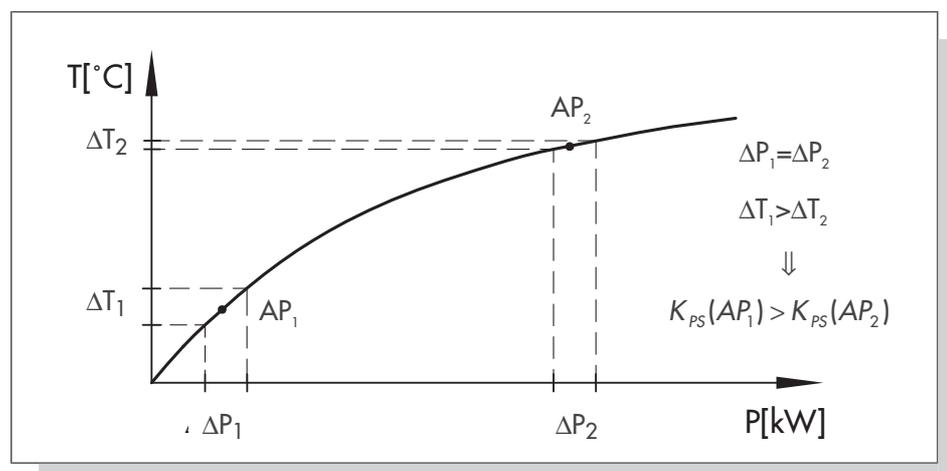


Bild 16: Arbeitspunktabhängiges Verhalten des dampfbeheizten Behälters

► Nichtlinearität des dampfbeheizten Behälters (Bilder 15 und 16)

Die Kennlinie in Bild 16 zeigt, dass die Regelstrecke im unteren Temperaturbereich einen größeren Proportionalbeiwert besitzt als im oberen. Wird der Temperaturregler des Wasserbades so eingestellt, dass man bei niedrigen Temperaturen ein gutes Regelverhalten erreicht, so kommt es bei hohen Temperaturen zu größeren Verzögerungen, da für diesen Bereich K_{PS} zu klein ist. Umgekehrt: Ist das Regelverhalten bei hohen Temperaturen gut, besteht bei niedrigen Temperaturen die Gefahr, dass Schwingungen auftreten.

**optimales
Regelverhalten nur in
einem Betriebspunkt
erreichbar**

Die Einstellung des Reglers vereinfacht sich, wenn eine nichtlineare Strecke an einem festen Betriebspunkt – dem Arbeitspunkt einer Anlage – betrieben wird. Da sich K_{PS} in unmittelbarer Umgebung des Arbeitspunktes nur geringfügig ändert (siehe AP_1 und AP_2 in Bild 16), wird das Regelverhalten nur entsprechend wenig beeinflusst.

Wird eine nichtlineare Strecke vorwiegend oder grundsätzlich an einem festen Arbeitspunkt betrieben, passt man den Regler speziell an diesen Betriebspunkt an. Die Streckenparameter (z. B. T_e und T_b) müssen deshalb nur für diesen Arbeitspunkt und evtl. dessen nähere Umgebung bestimmt werden.

**Reglereinstellung für
festen Arbeitspunkt...**

Wenn kein fester Arbeitspunkt definiert werden kann – wie z. B. bei Folgeregelungen, bleibt die Einstellung der Reglerparameter ein Kompromiss. Dann wird der Regler zumeist bei mittlerer Streckenverstärkung eingestellt.

**...oder den ganzen
Betriebsbereich**

Regelbarkeit einer Strecke mit Ausgleich

Bei Strecken ohne Integralanteil besteht die Möglichkeit, mit Hilfe der Größen Verzugszeit T_e und Ausgleichszeit T_b die Regelbarkeit abzuschätzen. Dazu nimmt man vereinfachend an, dass das Streckenverhalten durch eine Totzeit und eine Verzögerung hinreichend genau beschrieben wird.

**Abschätzen der Regel-
barkeit mit T_e und T_b**

T_e und T_b lassen sich am besten grafisch mit Hilfe einer Messreihe ermitteln. Dazu bestimmt man beim offenen Regelkreis das Streckenverhalten nach kleinen Stellgrößensprüngen. Bei nichtlinearen Strecken muss diese Messung an verschiedenen Arbeitspunkten durchgeführt werden. Das aus den Messkurven ermittelte Verhältnis von T_e zu T_b gibt Auskunft darüber, welches Regelverhalten zu erwarten ist.

Verhältnis T_b/T_e	Strecke ist ...
$0 < \frac{T_b}{T_e} \leq 3$	schwierig zu regeln,
$3 < \frac{T_b}{T_e} < 10$	noch regelbar,
$10 \leq \frac{T_b}{T_e}$	gut zu regeln.

**Größenordnungen
von T_e und T_b**

► Beispiel: T_b und T_e für Regelstrecken der Verfahrenstechnik

Regelgröße	Art der Regelstrecke	T_e	T_b
Temperatur	Autoklaven	30 bis 40 s	10 bis 20 min
	Extruder	1 bis 60 min	5 bis 60 min
Druck	Kessel mit Ölheizung	0 min	2,5 min
Durchfluss	Gasleitung	0 bis 5 s	0,2 s
	Leitung mit Flüssigkeit	0 s	0 s

Regler und Regelglieder

Ein Regler hat die Aufgabe, eine zu regelnde Strecke über ein Stellsignal so zu beeinflussen, dass die Regelgröße dem Wert der Führungsgröße entspricht. Regler bestehen aus einem Vergleichs- und einem Regelglied. Das Vergleichsglied bildet aus der Differenz von Führungs-(w) und Rückführgröße (r) die Regeldifferenz (e), während das Regelglied aus der Regeldifferenz (e) die Stellgröße (y) erzeugt:

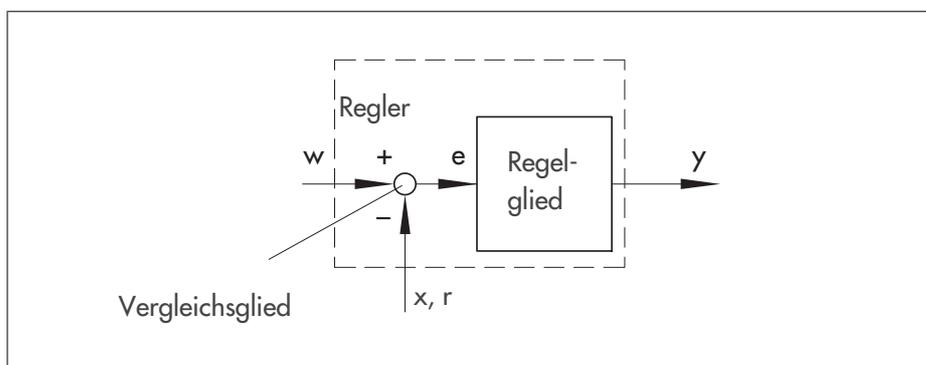


Bild 17: Komponenten eines Reglers

Klassifizierung

Regelglieder können auf ganz unterschiedliche Weise realisiert werden. So kann die Stellgröße y zum Beispiel

- ▶ mechanisch oder elektrisch,
- ▶ analog oder digital,
- ▶ mit oder ohne Hilfsenergie

aus der Regeldifferenz e gebildet werden. Obwohl diese Unterschiede die Reglerauswahl ganz wesentlich mitentscheiden, bleibt das regelungstechnische Verhalten von diesen Merkmalen fast unbeeinflusst. Das Regelverhalten hängt in erster Linie vom Verlauf der Stellgröße ab. Man klassifiziert Regler deshalb anhand ihres Stellsignalverlaufes. Abhängig vom Reglertyp kann das Stellsignal entweder stetig oder unstetig verlaufen.

Bildung der Stellgröße

Stellsignalverlauf
 ⇔ **Regelverhalten**

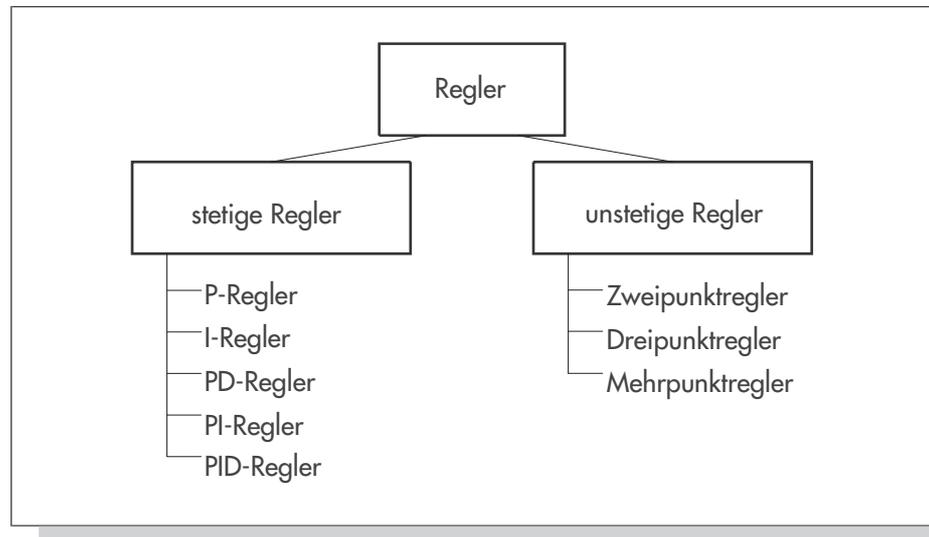


Bild 18: Einteilung von Reglern

Stetige und unstetige Regler

kontinuierlicher...

Bei stetigen Reglern kann die Stellgröße jeden beliebigen Wert innerhalb eines Stellbereiches annehmen. Das Übertragungsverhalten stetiger Regelglieder weist zumeist proportionales (P-), integrales (I-) oder differentiales (D-) Verhalten auf oder setzt sich aus der Summe dieser Einzelelemente zusammen (Bild 18).

...oder diskreter Stellbereich

Bei unstetigen Reglern springt die Stellgröße y zwischen diskreten Werten. Je nachdem, wie viele verschiedene Zustände die Stellgröße einnehmen kann, unterscheidet man zwischen Zwei-, Drei- oder Mehrpunktreglern. Unstetige Regler können im Vergleich zu stetigen mit sehr einfachen, schaltenden Stellrichtungen arbeiten. Enthält die Strecke Energiespeicher, verläuft die Regelgröße trotz der Stellgrößensprünge stetig. Sind die zugehörigen Zeitkonstanten groß genug, erreicht man auch mit unstetigen Reglern und einfachen Stelleinrichtungen gute Regelergebnisse bei kleinen Regeldifferenzen.

Hilfsenergie

Jeder Regler und jedes Stellglied verrichtet Arbeit und benötigt dafür Energie. Wird diese Energie in pneumatischer, elektrischer oder hydraulischer Form von außen zugeführt, spricht man vom Regler mit Hilfsenergie. Ist am Einbauort kein Energieträger verfügbar, bietet sich der Einsatz von Reglern

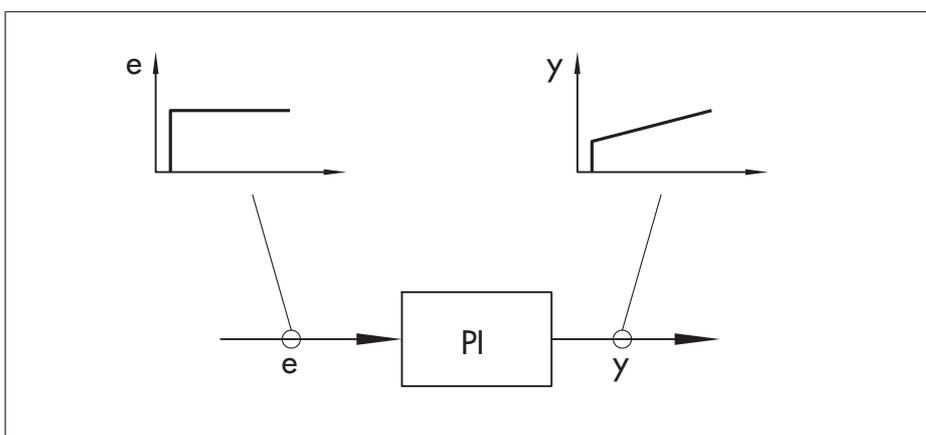


Bild 19: Sprungantwort eines Reglers

ohne Hilfsenergie an. Diese entnehmen die Energie, die sie zur Verstellung des Stellgliedes benötigen, der Regelstrecke. Diese preiswerten und robusten Regler werden vielfach für Druck-, Differenzdruck-, Durchfluss- und Temperaturregelungen eingesetzt. Sie können verwendet werden, wenn Mess- und Stellort nah beieinander liegen oder kleinere, durch die Energieentnahme bedingte Regelabweichungen akzeptiert werden können.

**Energieversorgung
extern oder aus der
Strecke abgeleitet**

Bestimmung des dynamischen Verhaltens

Wie zuvor bei den Regelstrecken wird in den folgenden Kapiteln das dynamische Verhalten einzelner Regler anhand von Sprungantworten dargestellt (Bild 19). Das sich ergebende Regelverhalten lässt sich jedoch anschaulicher am geschlossenen Regelkreis zeigen.

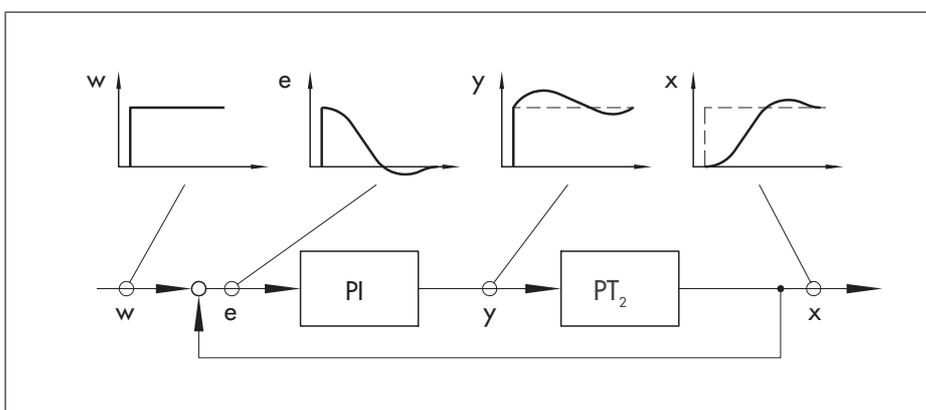


Bild 20: Signalverläufe im geschlossenen Regelkreis

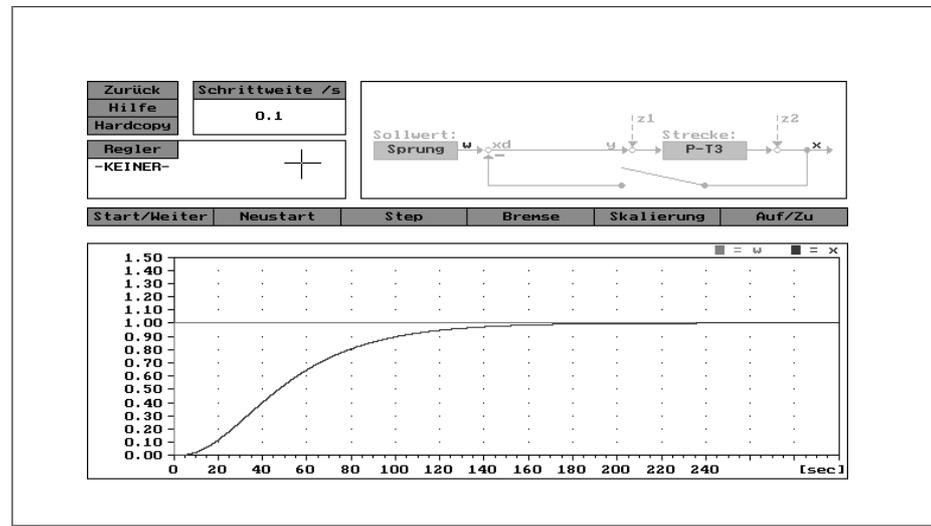


Bild 21: Sprungantwort der Beispiel-Regelstrecke 3. Ordnung

Wirkungsablauf im geschlossenen Regelkreis

Im geschlossenen Regelkreis führt ein Sprung der Führungsgröße w zunächst zu einem sprunghaften Anstieg der Regeldifferenz e (Bild 20). Aufgrund des Regeleingriffes und der Rückführung wird die Regeldifferenz mit der Zeit zurückgehen. Schließlich wird die Regelgröße – stabiles Regelverhalten vorausgesetzt – einen neuen Beharrungszustand einnehmen (Bild 20: Regelgröße x).

Vergleich des Regelverhaltens anhand einer 'Referenzstrecke'

Um im Folgenden das Verhalten von verschiedenen Reglern vergleichend bewerten zu können, wird jeder Regler im Zusammenspiel mit der gleichen 'Referenzstrecke' diskutiert. Hierfür wurde eine Strecke 3. Ordnung mit folgenden Parametern gewählt:

Proportionalbeiwert: $K_p = 1$

Zeitkonstanten: $T_1 = 30 \text{ s}; T_2 = 15 \text{ s}; T_3 = 10 \text{ s}$

Das verzögerte, proportionale Verhalten dieser Strecke ist in Bild 21 dargestellt. Es zeigt die Sprungantwort, d. h. die Reaktion der Ausgangsgröße (Regelgröße x) auf eine sprunghafte Änderung der Eingangsgröße (Stellgröße y).

Stetige Regler

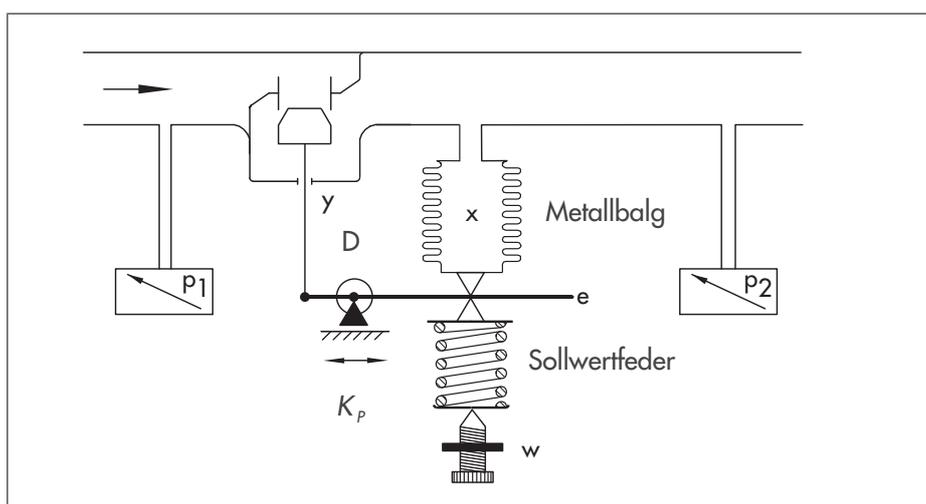


Bild 22: Ausführung eines P-Reglers (ohne Hilfsenergie)

P-Regler (Proportionalregler)

Bei einem P-Regler ist die Stellgröße y immer proportional zu der erfassten Regeldifferenz ($y \sim e$). Daraus ergibt sich, dass ein P-Regler

- ▶ ohne eine Verzögerung auf eine Regelabweichung reagiert und
- ▶ nur dann eine Stellgröße erzeugt, wenn eine Abweichung e vorliegt.

Der in Bild 22 skizzierte proportionale Druckregler vergleicht die Kraft F_S der Sollwertfeder mit der Kraft F_B , die der Druck p_2 in dem feder-elastischen Metallbalg erzeugt. Sind die Kräfte nicht im Gleichgewicht, dreht sich der Hebel um den Drehpunkt D. Dabei ändert sich die Ventilstellung – und dementsprechend der zu regelnde Druck p_2 – so lange, bis sich ein neues Kräftegleichgewicht eingestellt hat.

Stellgröße ändert sich proportional mit der Regeldifferenz

- Proportionalbeiwert

Das Verhalten des P-Reglers bei plötzlichem Auftreten einer Regeldifferenz zeigt Bild 23. Die Amplitude des Stellgrößensprungs y hängt ab von der Höhe der Regeldifferenz e und dem Betrag des Proportionalbeiwertes K_p :

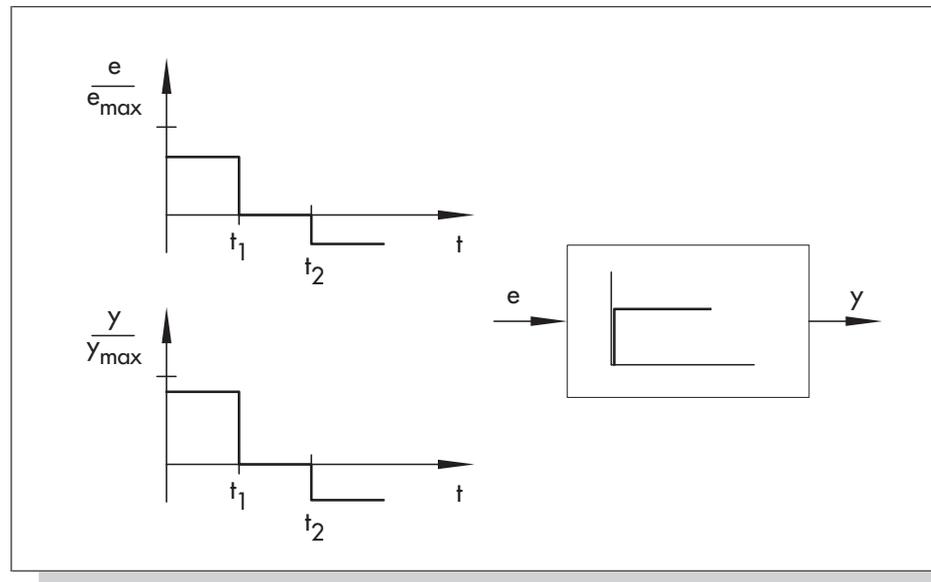


Bild 23: Dynamisches Verhalten des P-Reglers
(e: Regelabweichungen, y: Stellgröße)

$$y = K_p \cdot e$$

großes K_p bewirkt
großen Stelleingriff

Dieser Ausdruck entspricht einer Geradengleichung, deren Steigung durch K_p bestimmt wird. Bild 24 verdeutlicht, dass ein großes K_p für einen starken Anstieg steht, so dass schon kleine Regelabweichungen zu großen Stellvorgängen führen.

Proportionalbeiwert
oder -bereich

Anmerkung: Statt des Proportionalbeiwertes K_p findet man in der Literatur häufig noch den alten Begriff 'Proportionalbereich' bzw. 'P-Bereich', der mit den Formelzeichen X_p [%] abgekürzt wird. Die Umrechnung erfolgt mit:

$$X_p = \frac{100[\%]}{K_p} \quad \text{bzw.} \quad K_p = \frac{100[\%]}{X_p}$$

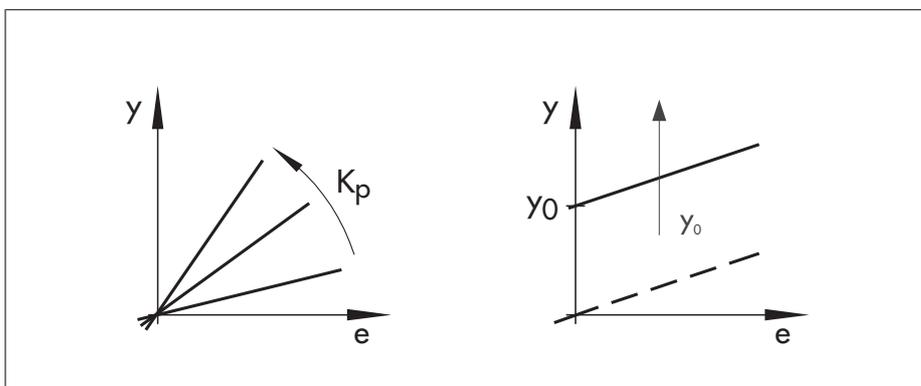


Bild 24: Wirkung der K_P - und Arbeitspunkteinstellung

- Regelabweichung

Die Wirkung von Störgrößen kompensiert ein Regler dadurch, dass er eine entsprechend entgegengerichtete Stellgröße erzeugt. Diese Stellgröße kann ein P-Regler aber nur erzeugen, wenn eine Regeldifferenz vorliegt (siehe Definitionsgleichung). Bleibende Störungen lassen sich mit einem P-Regler daher niemals vollständig ausregeln (Bild 25).

Merke: Ein großes K_P führt durch einen stärkeren Regeleingriff zu kleineren Regelabweichungen. Zu große K_P -Werte erhöhen jedoch die Schwingneigung des Regelkreises.

Charakteristikum des P-Reglers: bleibende Regelabweichung

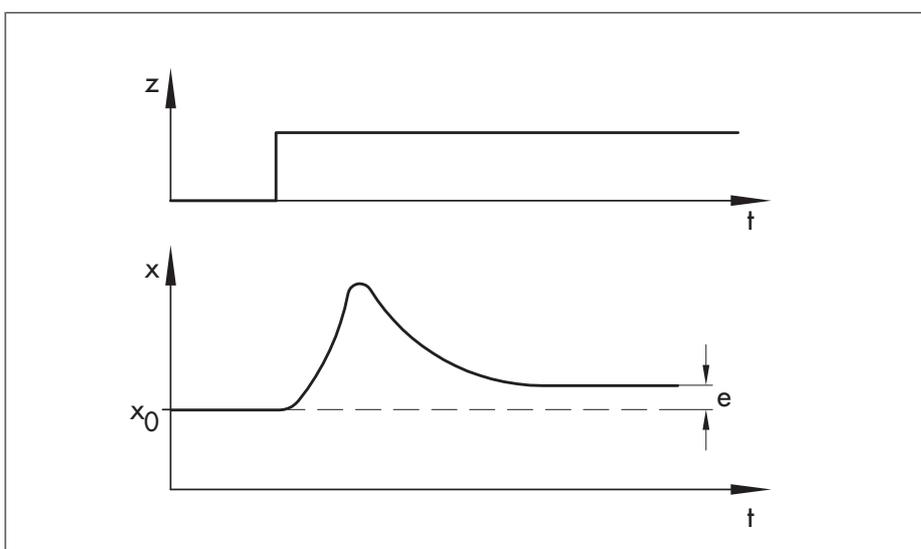


Bild 25: Bleibende Regelabweichung bei Regelkreisen mit P-Reglern (x_0 : eingestellter Arbeitspunkt des Reglers)

- Einstellung des Arbeitspunktes

Im regelungstechnischen 'Idealzustand', wenn die Regeldifferenz gleich null ist, erzeugt der reine P-Regler keine Stellamplitude. Diese wird aber gebraucht, will man die Regelgröße einer Strecke mit Ausgleich in einem beliebigen Gleichgewichtszustand halten. Um dieses Ziel dennoch zu erreichen, benötigt der P-Regler die Möglichkeit der Arbeitspunkteinstellung. Hierbei wird ein variabler Offset y_0 zur Stellgröße des P-Reglers addiert:

Vorgabe der Stellamplitude im ausgeregelten Zustand

$$y = K_p \cdot e + y_0 \quad \text{mit } y_0: \text{ Stellgröße am AP}$$

So lässt sich eine beliebige Stellamplitude y_0 ausgeben, selbst wenn die Regeldifferenz gleich null ist. Mathematisch entspricht diese Maßnahme einer Parallelverschiebung der Arbeitskennlinie über den gesamten Betriebsbereich (siehe Bild 24).

Beachte: Die Vorgabe eines Arbeitspunktes – y_0 ungleich null – ist nur für Strecken mit Ausgleich sinnvoll. Eine Strecke ohne Ausgleich geht erst dann in den Beharrungszustand, wenn die Stellgröße gleich null ist (Beispiel: motorbetriebener Positionierantrieb).

► Beispiel: Arbeitspunkt und Regelabweichung beim Druckminderer

Bei einer Druckregelung (Bild 26) liegt der Nachdruck p_2 im Bereich von 0 bis 20 bar, der Arbeitspunkt (p_{AP} , q_{AP}) ist bei $p_{AP} = 8$ bar.

Ist der Proportionalbeiwert auf $K_p = 10$ eingestellt, so durchfährt das Ventil innerhalb einer 10 %-igen Regeldifferenz seinen ganzen Hub. Ohne Arbeitspunkteinstellung, mit $y_0 = 0$, ist der Druckminderer bei 0 bar ganz geöffnet (H_{100}) und bei 2 bar vollständig geschlossen (H_0). Der Arbeitspunkt p_{AP} , q_{AP} wird nicht erreicht; die resultierende Regelabweichung ist sehr groß.

Arbeitspunkteinsteller gibt Ventilstellung vor

Wird der Arbeitspunkt am Druckminderer so eingestellt, dass das Ventil bei $p_2 = 8$ bar den zum Arbeitspunkt passenden Querschnitt freigibt, wird die Regelabweichung zu null. In diesem Beispiel entspricht dem Arbeitspunkt y_0 die Hubeinstellung H_{AP} .

Als Resultat wäre beispielsweise die folgende Zuordnung möglich:

9,0 bar:	Ventil geschlossen	H_0
8,0 bar:	Ventil in Mittelstellung	H_{AP}
7,0 bar:	Ventil ganz geöffnet	H_{100}

Über den ganzen Arbeitsbereich des Ventils ergibt sich eine maximale Regelabweichung von ≤ 1 bar (Bild 26). Ist diese nicht tolerierbar, muss K_p erhöht werden: Bei einem K_p von 50 reduziert sich die Regelabweichung auf $\leq 0,2$ bar ($20 \text{ bar}/50 = 0,4 \text{ bar}$). Der Erhöhung von K_p sind jedoch Grenzen gesetzt. Bei zu heftiger Stellreaktion schwingt die Regelgröße stark über, so dass anschließend mit inverser Hubverstellung gegengesteuert werden muss: Das System gerät ins Schwingen.

großes K_p verringert die Regelabweichung und erhöht die Schwingneigung

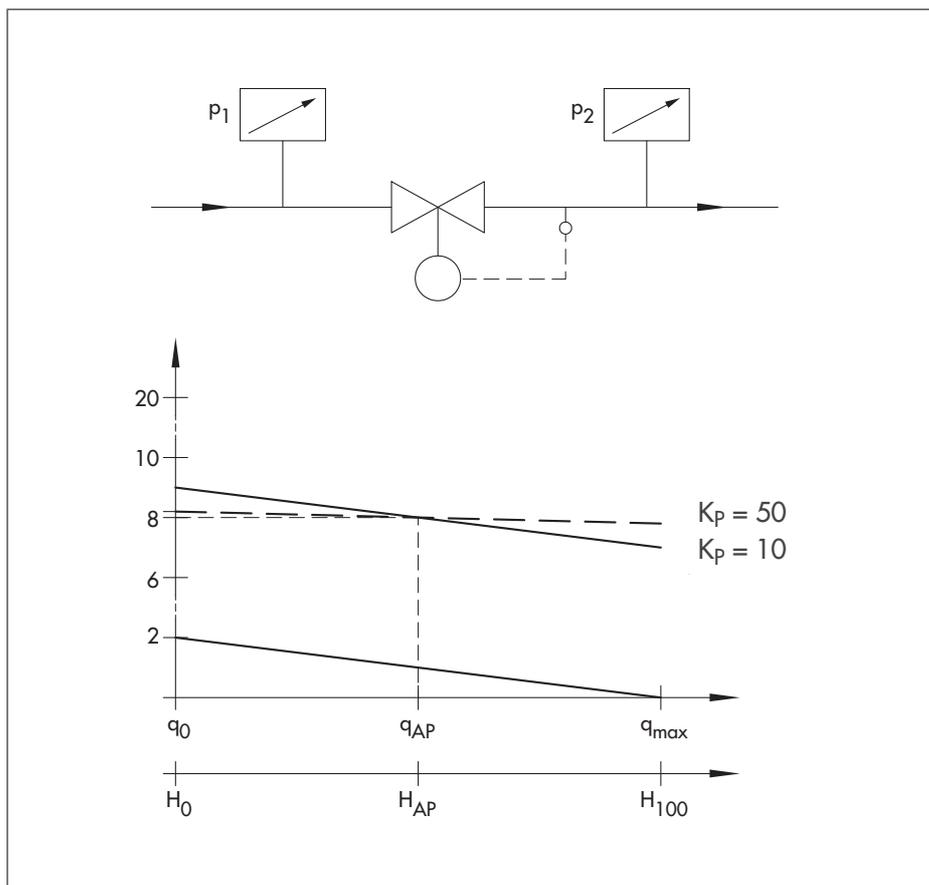


Bild 26: Funktionsprinzip und Kennlinie der Nachdruckregelung

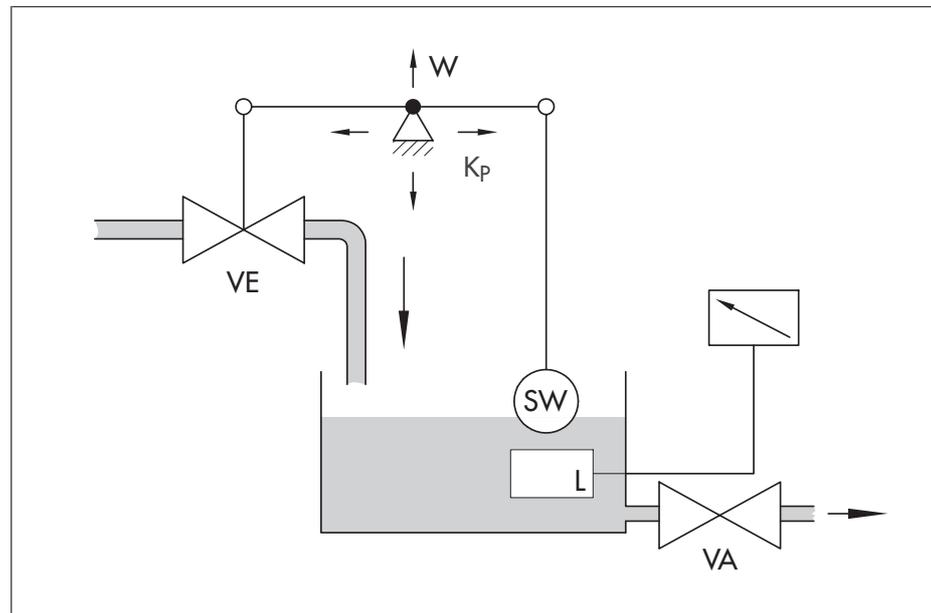


Bild 27: Füllstandsregelung mit einem P-Regler (ohne Hilfsenergie)

- P-Regelung am Beispiel einer Füllstandsregelung

Der Wasserstand in einem Behälter (Bild 27) soll konstant gehalten werden, selbst wenn sich der ausfließende Wasserstrom über das Ablassventil (VA) verändert.

Die skizzierte Regeleinrichtung ist im Gleichgewichtszustand, wenn der zufließende Wasserstrom genauso groß ist wie der abfließende. Der Flüssigkeitsstand bleibt also konstant.

Funktionsweise der Füllstandsregelung

Wird das Auslassventil (VA) etwas weiter geöffnet, beginnt der Wasserspiegel zu sinken. Mit dem Wasserspiegel senkt sich der Schwimmer (SW), wodurch über einen starren Hebel das Stellventil (VE) öffnet. Der zunehmende Zufluss verhindert schließlich das weitere Absinken des Wasserpegels, so dass sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt.

Durch eine Verschiebung des Hebeldrehpunktes nach oben oder unten kann eine andere stationäre Füllhöhe eingestellt werden. Bei richtiger Dimensionierung der Komponenten wird durch diese Regelung verhindert, dass der Behälter über- oder leerläuft.

Das Beispiel der Füllstandsregelung zeigt die typischen Merkmale einer P-Regelung:

- ▶ Bei Störungen bleibt immer eine stationäre Regelabweichung: Um bei geändertem Abflussvolumenstrom die Stellung des Ventils VE bleibend zu verändern, ist zwingend ein Flüssigkeitsstand erforderlich, der vom ursprünglich eingestellten Sollwert abweicht.
- ▶ Die Regelabweichung verringert sich bei hoher Verstärkung (großer Proportionalbeiwert), doch erhöht sich damit die Gefahr, dass die Regelgröße schwingt. Wird der Drehpunkt des Hebels in Richtung Schwimmer verlagert, erhöht sich die Empfindlichkeit des Reglers. Aufgrund der größeren Stellwirkung verändert sich der Zufluss bei Änderung der Füllhöhe stärker; eine zu hohe Verstärkung führt unter Umständen zu permanenten Schwankungen des Wasserstandes (Schwingen).

**bleibende
Regelabweichung**

**Grenzwerte der
K_p-Einstellung**

Anmerkung: Die skizzierte Füllstandsregelung arbeitet mit einem Regler, der ohne Hilfsenergie arbeitet (ROH). Kennzeichnend für diesen Reglertyp ist die aus der Strecke abgeleitete Stellenergie: Das Schwimmergewicht und die Stellkräfte werden von der Auftriebskraft kompensiert, die die Wasserverdrängung des Schwimmers mit sich bringt.

**ROH für einfache
Regelaufgaben**

- Regelverhalten (am Beispiel der PT₃-Strecke)

Die Regelung der PT₃-Strecke ($K_p = 1$; $T_1 = 30$ s; $T_2 = 15$ s; $T_3 = 10$ s) mit einem P-Regler ergibt das in Bild 28 dargestellte Regelverhalten. Wie zuvor erläutert, erhöht sich mit zunehmendem K_p die Schwingneigung des Systems, während sich gleichzeitig die stationäre Regelabweichung verringert.

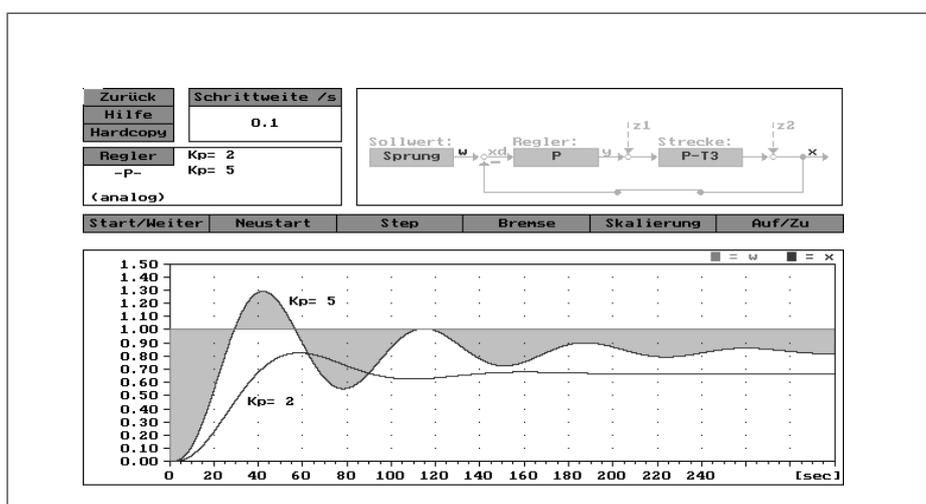


Bild 28: Regelverhalten des P-Reglers mit PT₃-Regelstrecke

Vorteile des P-Reglers:

- ▶ schnelles Eingreifen in den Regelprozess durch eine sofortige Stellwirkung beim Auftreten einer Regeldifferenz und
- ▶ sehr stabile Regelung, wenn K_P richtig dimensioniert ist.

Nachteil des P-Reglers:

- ▶ bleibende Regeldifferenz beim Auftreten einer Störung, da erst die Regelabweichung eine Veränderung der Stellgröße bewirkt.

Anwendungsbereiche des P-Reglers:

Der P-Regler eignet sich für unkritische Regelungen, bei denen bleibende Regelabweichungen beim Auftreten von Störungen akzeptiert werden können, z. B. Druck-, Durchfluss-, Füllstand- und Temperaturregelungen. Die P-Regelung ist schnell, lässt sich aber durch Zusatzelemente, wie auf Seite 38 ff. erläutert, in der Dynamik noch verbessern.

P-Regler: schnell und stabil mit bleibender Regelabweichung

I-Regler (Integralregler)

Integrierende Regler werden eingesetzt, um Regelabweichungen in jedem Betriebspunkt vollständig auszuregeln. Solange die Regelabweichung ungleich null ist, ändert sich der Betrag der Stellgröße. Erst wenn Führungs- und Regelgröße gleich groß sind, spätestens jedoch wenn die Stellgröße ihren systembedingten Grenzwert erreicht (U_{\max} , p_{\max} etc.), ist die Regelung eingeschwungen. Die mathematische Formulierung dieses integralen Verhaltens lautet: Die Stellgröße ist dem Zeitintegral der Regeldifferenz e proportional:

$$y = K_I \int e \, dt \quad \text{mit: } K_I = \frac{1}{T_I}$$

Wie schnell die Stellgröße ansteigt (oder abfällt), hängt von der Regelabweichung und der Integrierzeit T_I ab (Kehrwert vom Integrierbeiwert K_I). Bei einer kleinen Integrierzeit steigt das Stellsignal schneller als bei einer großen Integrierzeit (kleiner Integrierbeiwert).

Merke: Die Integralwirkung des I-Reglers verringert sich bei steigender Integrierzeit T_I – bzw. steigt mit dem Integrierbeiwert K_I .

**keine
Regelabweichung im
Beharrungszustand**

**großes $T_I \Rightarrow$ langsamer
Stelleingriff**

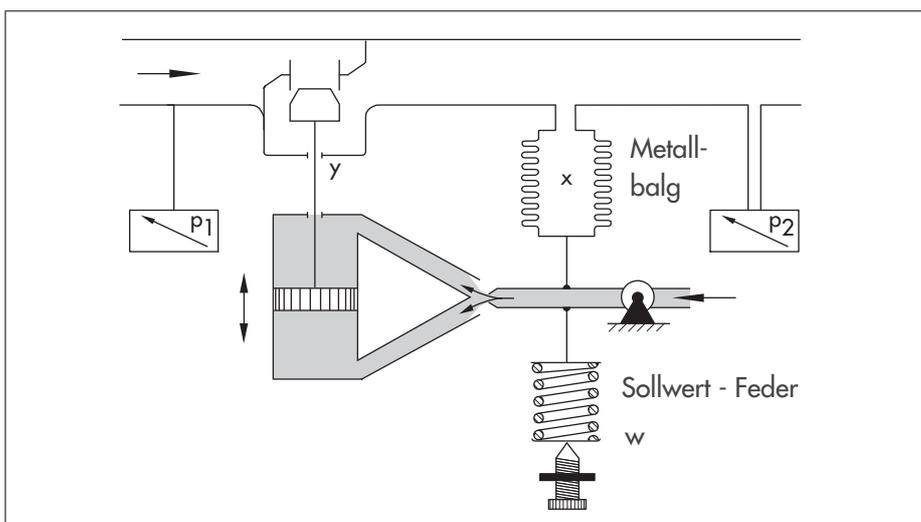


Bild 29: Druckregler integrierend

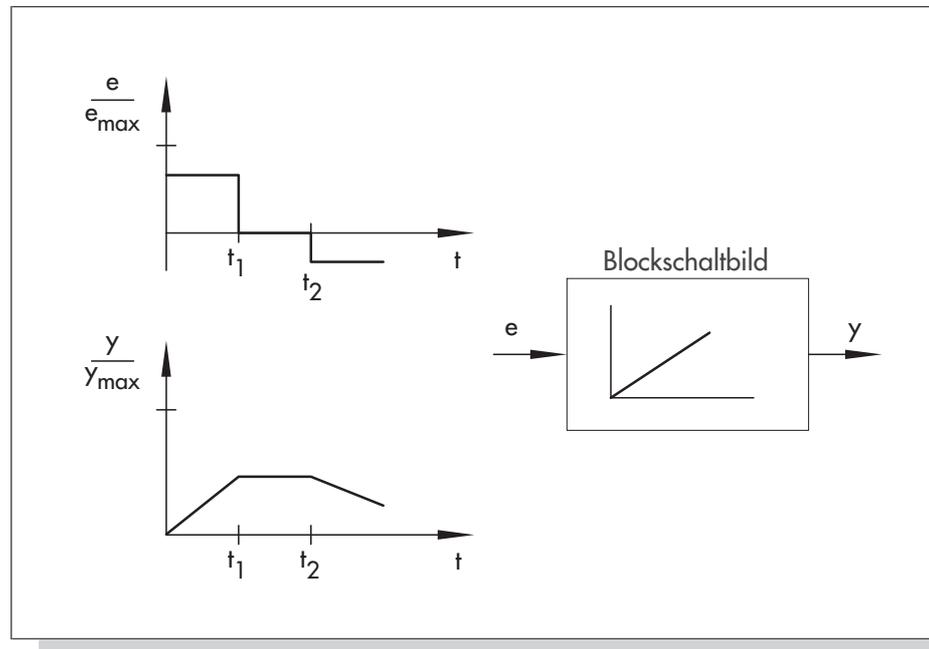


Bild 30: Dynamisches Verhalten des I-Reglers
(*e*: Regelabweichung, *y*: Stellgröße)

Der in Bild 29 skizzierte pneumatische I-Regler arbeitet mit einem Kolbenantrieb. Befindet sich die Zuluftdüse vor dem Strahlteiler in Mittelstellung, verharrt der Kolben in seiner Position. Die Regeldifferenz ist in dieser Stellung gleich null, da sich die Kräfte der Sollwertfeder F_F und des druckbelasteten Metallbalges F_B vollständig kompensieren.

Funktionsprinzip des integralen Druckreglers

Ein 'virtueller' Regelzyklus lässt die Regelfunktion erkennen: Sinkt aufgrund eines zusätzlichen Verbrauchers der Druck p_2 , so dreht sich die Düse in Richtung der oberen Kolbenkammer. Der nach unten gleitende Kolben öffnet das Ventil daraufhin so weit, bis sich das Kräftegleichgewicht wieder eingestellt hat. Die Düse ist dann wieder in Mittelstellung, d. h. die Regeldifferenz ist vollständig ausgeregelt und der Ventilkegel verbleibt in der neuen, weiter geöffneten Position.

I-Regelung vergleichsweise langsam

Der Vergleich des zeitlichen Verhaltens zwischen einem P- und I-Regler (Bilder 23 und 30) zeigt, dass die Stellgröße *y* beim I-Regler nur langsam ansteigt, während sie beim P-Regler sofort ihren Endwert erreicht. Der reine I-Regler reagiert deshalb auf Störungen und Führungsgrößensprünge nur allmählich. Wählt man die Integrierzeit so klein, dass die Stellgröße sehr schnell ansteigt, gerät die Regelung leicht ins Schwingen und wird schließlich instabil.

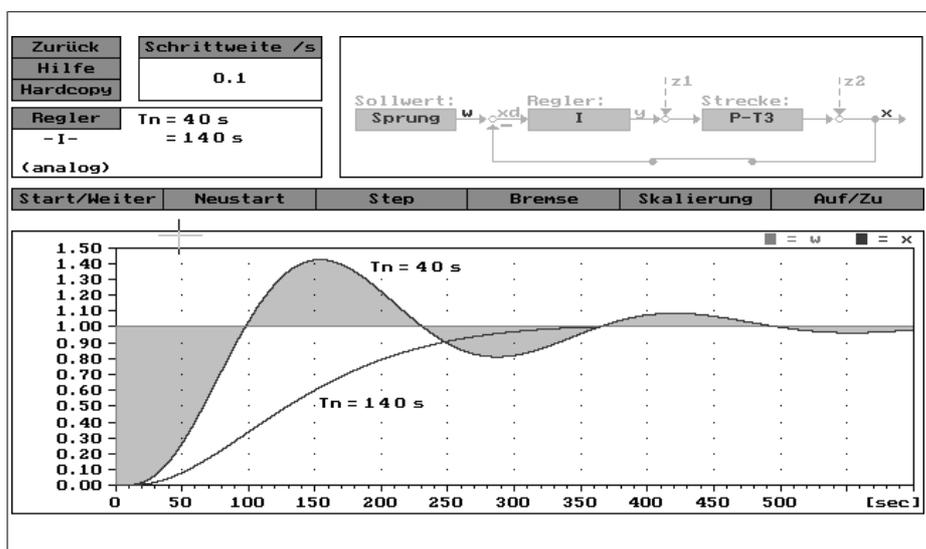


Bild 31: Regelverhalten des I-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke (doppelter Zeitmaßstab)

- Regelverhalten (am Beispiel der PT_3 -Strecke)

Die Regelung der PT_3 -Strecke ($K_P = 1$; $T_1 = 30$ s; $T_2 = 15$ s; $T_3 = 10$ s) mit einem I-Regler zeigt Bild 31. Gegenüber der P-Regelung (Bild 28) wurde der Zeitmaßstab verdoppelt. Dies zeigt, dass der I-Regler deutlich langsamer ist, wobei sich die Dynamik mit zunehmendem T weiter verschlechtert. Positiv zeigt sich die fehlende Regelabweichung im Beharrungszustand.

keine
Regelabweichung...

Beachte: Die Vorgabe eines Arbeitspunktes macht beim I-Regler keinen Sinn, da durch das Integralverhalten in allen Betriebspunkten jede Abweichung vom Sollwert auf Dauer ausgeregelt wird. Das Nachregeln der Stellgröße – bis die Regelabweichung zu null wird – entspricht einer 'automatisierten' Arbeitspunkteinstellung: Die Stellgröße des I-Reglers verharrt im ausgeregelten Zustand ($e = 0$) auf dem Wert, der bei einem P-Regler über den Arbeitspunkteinsteller vorzugeben wäre.

... durch selbsttätiges
Anpassen an den
Betriebspunkt

Vorteile des I-Reglers:

- ▶ keine bleibende Regelabweichung im Beharrungszustand.

Nachteile des I-Reglers:

- ▶ bei großem T_I ist die Regelung sehr träge und
- ▶ bei kleinem T_I neigt die Regelung zum Schwingen, wird ggf. instabil.

reagiert schnell auf jede Änderung

D-Regler (Differentialregler)

Der D-Regler bildet seine Stellgröße aus der Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz und nicht – wie der P-Regler – aus deren Amplitude. Er reagiert deshalb noch wesentlich schneller als der P-Regler: Selbst bei kleiner Regeldifferenz erzeugt er – quasi vorausschauend – große Stellamplituden, sobald eine Amplitudenänderung auftritt. Eine bleibende Regelabweichung erkennt der D-Regler hingegen nicht, denn, ganz unabhängig wie groß sie ist, ihre Änderungsgeschwindigkeit ist gleich null. In der Praxis wird der D-Regler deshalb selten allein verwendet. Vielmehr kommt er zusammen mit anderen Regelementen, meistens in Verbindung mit einem Proportionalanteil, zum Einsatz.

P- und D-Regler in Kombination

Beim PD-Regler (Bild 32), einem Regler mit Proportional- und Differentialanteil, ergibt sich die Stellgröße aus der Addition der Einzelemente von P- und D-Anteil:

$$y = K_p \cdot e + K_D \frac{de}{dt} + y_0 \quad \text{mit } K_D = K_p \cdot T_d$$

Der Faktor T_d wird als Vorhaltzeit und K_D als Differenzierbeiwert bezeichnet. Beide Größen sind ein Maß für die Wirkung des D-Anteils: Große Werte kennzeichnen einen starken Regeleingriff. Der Summand y_0 steht – wie beim P-Regler – für die Arbeitspunkteinstellung, also den voreingestellten Wert der Stellgröße, den der Regler im ausgeregelten Zustand bei $e = 0$ ausgibt.

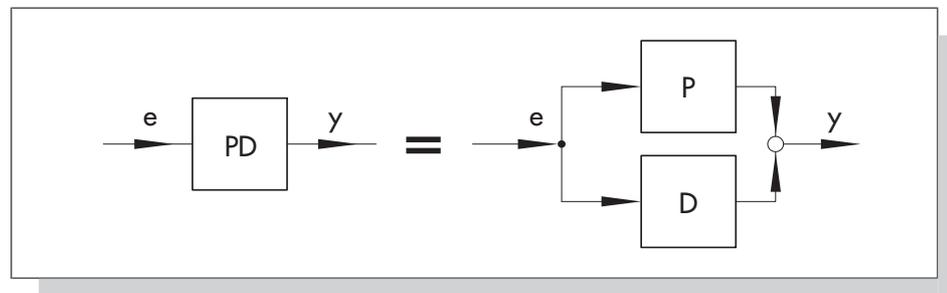


Bild 32: Elemente des PD-Reglers

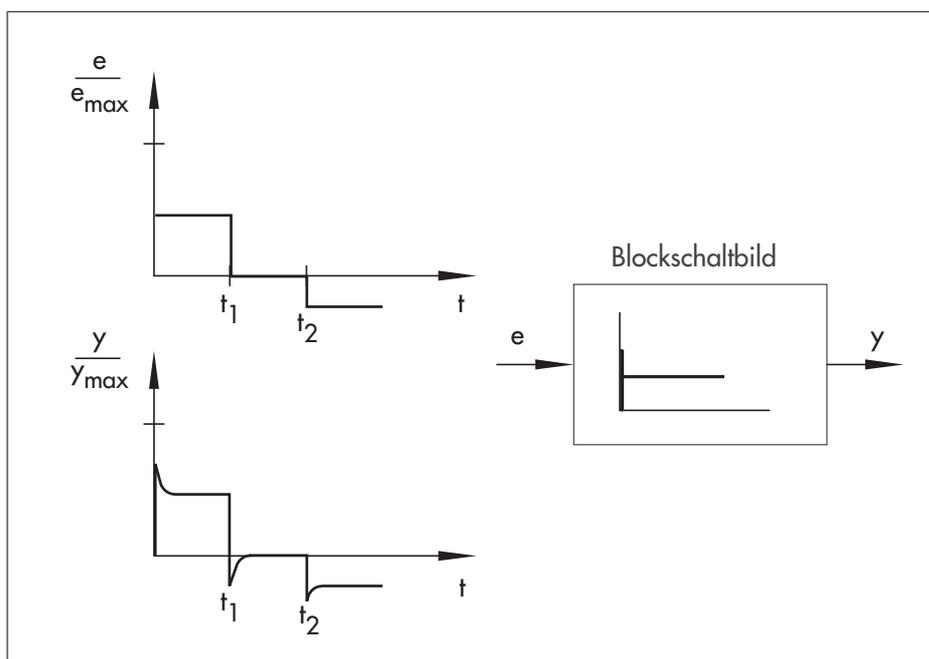


Bild 33: Dynamisches Verhalten des PD-Reglers
(e : Regelabweichung, y : Stellgröße)

Der Stellgrößenverlauf der Sprungantwort lässt die Wirkung des D-Anteils erkennen (vergleiche Bilder 23 und 33): Jede Änderung der Regeldifferenz bewirkt einen kurzzeitigen Anstieg der Stellgröße. Aufgrund von parasitären Verzögerungen hat dieser Impuls eine nur endliche Änderungsgeschwindigkeit. Ein unendlich kurzer Impuls – wie ihn die obige Gleichung fordert – wird in der Praxis nicht entstehen.

Merke: Die Wirkung des D-Anteils steigt proportional mit der Vorhaltzeit T_D bzw. zum Differenzierbeiwert K_D .

- Regelverhalten (am Beispiel der PT_3 -Strecke)

Das Regelverhalten in Bild 34 zeigt, dass beim PD-Regler – wie beim P-Regler – eine bleibende Regelabweichung entsteht. Aufgrund des sofortigen Stelleingriffs bei jeder Änderung der Regeldifferenz ist die Regeldynamik jedoch höher als beim P-Regler. Trotz der sehr schnellen Änderung der Regelgröße (Sollwert ist nach 23 s erreicht) verringert sich die Schwingneigung des Regelkreises. Aufgrund dieser stabilisierenden Wirkung des D-Anteils kann K_P gegenüber dem reinen P-Regler größer gewählt werden, wodurch sich die bleibende Regelabweichung verringert.

**kleine Verzögerungen
verschleifen den
Stellimpuls**

**großes $T_D \Rightarrow$ großer
Stelleingriff**

**D-Anteil verbessert die
Regeldynamik**

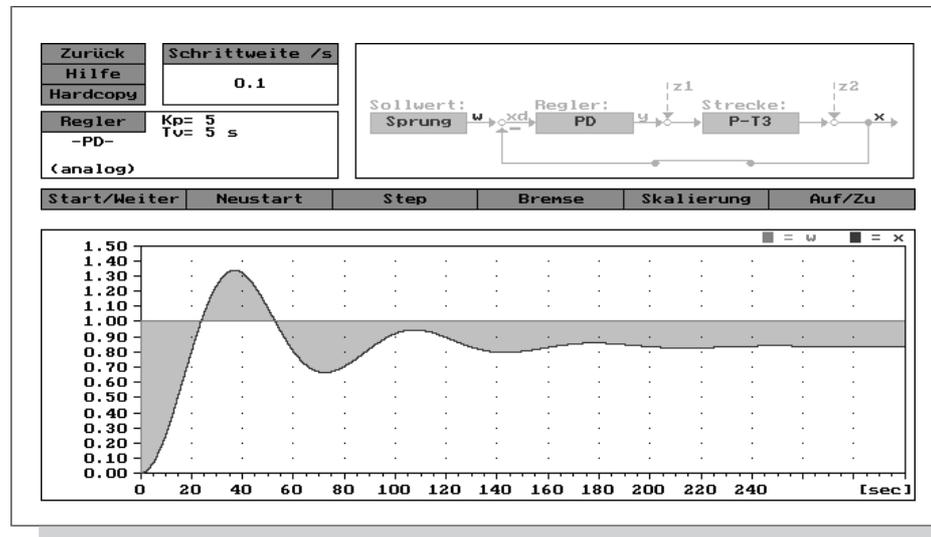


Bild 34: Regelverhalten des PD-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke

Der PD-Regler wird immer dann eingesetzt, wenn ein P-Regler aufgrund seiner schlechteren Regeldynamik nicht ausreicht. Dies gilt zumeist bei Regelstrecken mit größeren Verzögerungen, bei denen ein stärkeres Überschwingen der Regelgröße – verursacht durch ein großes K_p – vermieden werden muss.

PI-Regler

für viele
Regelaufgaben
geeignet

Der PI-Regler ist ein in der Praxis sehr häufig verwendeter Reglertyp. Er ergibt sich aus einer Parallelschaltung von einem P- und einem I-Regler (Bild 35). Bei richtiger Auslegung vereinigt er die Vorteile der beiden Reglertypen (stabil und schnell, keine bleibende Regelabweichung), so dass gleichzeitig deren Nachteile kompensiert werden.

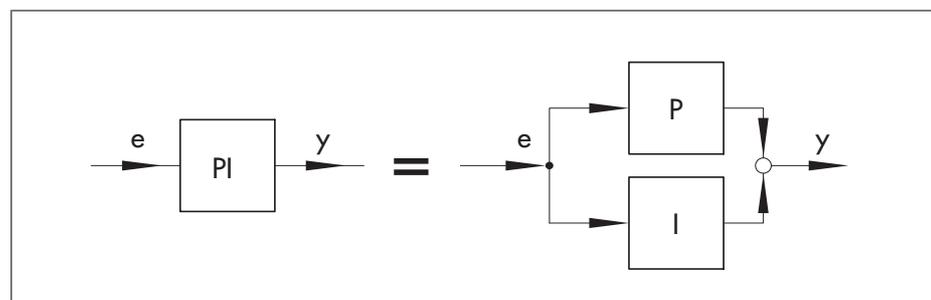


Bild 35: Elemente des PI-Reglers

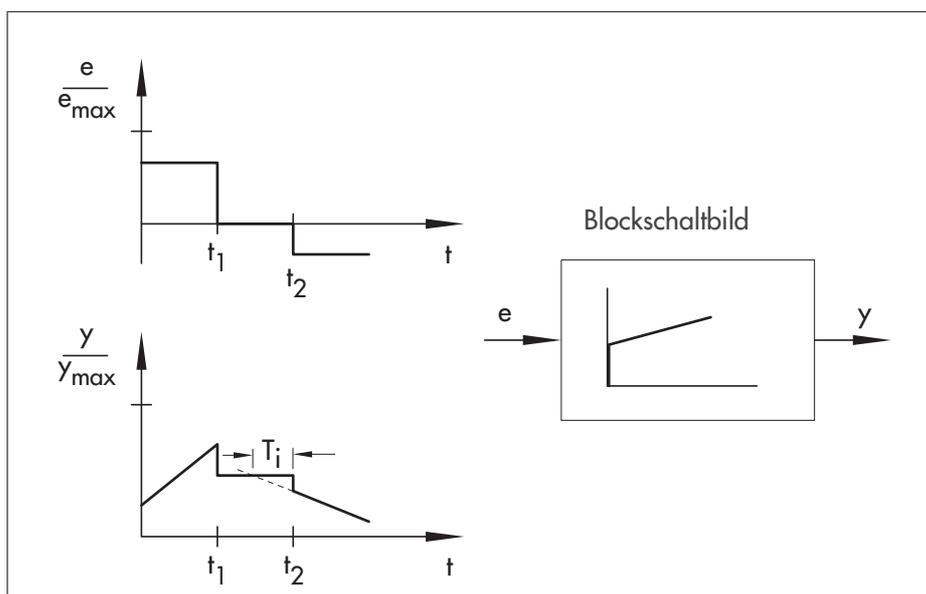


Bild 36: Dynamisches Verhalten des PI-Reglers
(e : Regelabweichung, y : Stellgröße)

Die Stellgröße des PI-Reglers berechnet sich aus:

$$y = K_p \cdot e + K_i \int e dt \quad \text{mit} \quad K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

Das zeitliche Verhalten ist gekennzeichnet durch den Proportionalbeiwert K_p und die Nachstellzeit T_i ($\neq T_1$ vgl. S.35). Aufgrund des Proportionalanteils reagiert die Stellgröße sofort auf jede Regeldifferenz e , während der integrale Anteil erst mit der Zeit zur Wirkung kommt. Dabei steht T_i für die Zeit, die vergeht, bis der I-Anteil dieselbe Stellamplitude erzeugt, wie sie infolge des P-Anteils (K_p) sofort entsteht (Bild 36). Wie schon beim I-Regler muss die Nachstellzeit T_i verkleinert werden, will man den Integralanteil erhöhen.

- Regelverhalten (am Beispiel der PT_3 -Strecke)

Wie zu erwarten ist, zeigt die PI-Regelung der PT_3 -Strecke (Bild 37) die positiven Merkmale des P- und des I-Reglers. Nach einem schnellen Einschwingvorgang zeigt die Regelgröße keine bleibende Regelabweichung.

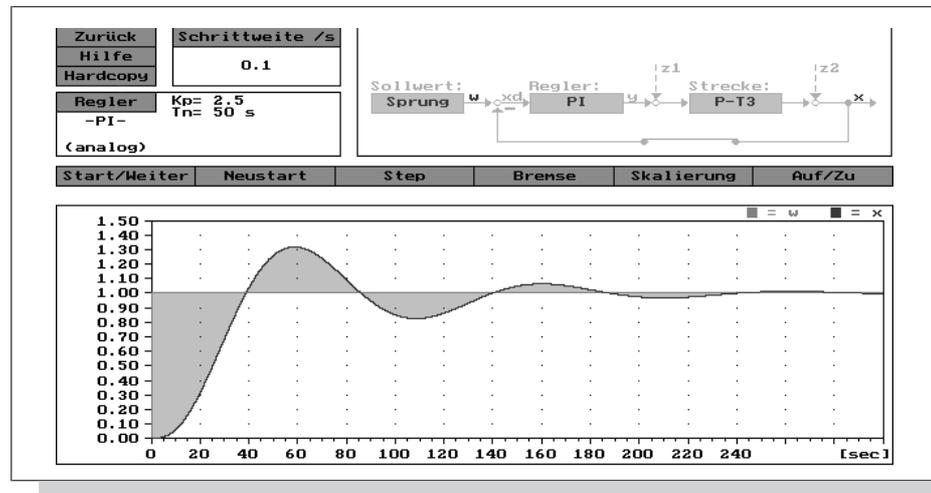


Bild 37: Regelverhalten des PI-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke

variabel in der Reglerauslegung

In Abhängigkeit von der K_P - und T_I -Dimensionierung kann das Überschwingen der Regelgröße auf Kosten der Regeldynamik verringert werden.

Anwendungsbereiche des PI-Reglers: schnelle Regelkreise, die keine bleibende Regelabweichung zulassen.

Beispiele: Druck-, Temperatur-, Verhältnisregelungen

PID-Regler

PI-Regler mit erhöhter Regeldynamik

Erweitert man einen PI-Regler um einen D-Anteil, erhält man den universellen PID-Regler (Bild 38). Wie beim PD-Regler bewirkt die Ergänzung des D-Anteils, dass – bei richtiger Auslegung – die Regelgröße früher ihren Sollwert erreicht und schneller einschwingt.

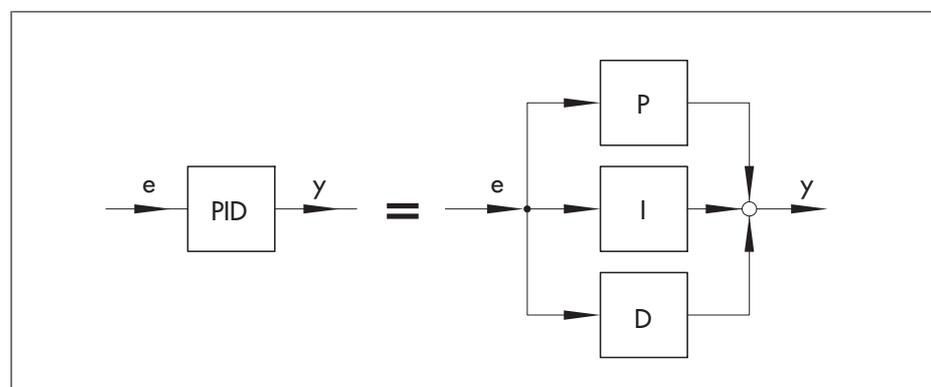


Bild 38: Elemente des PID-Reglers

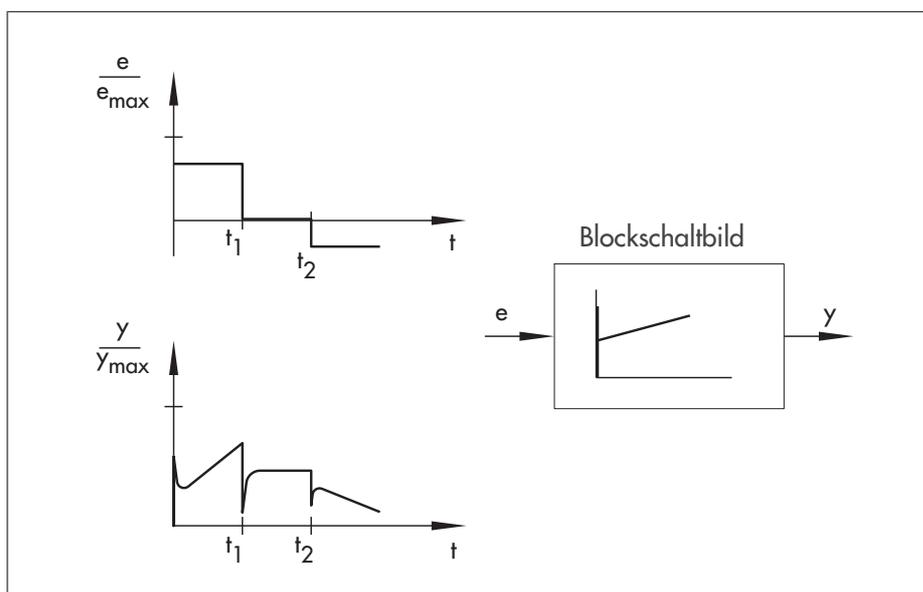


Bild 39: Dynamisches Verhalten des PID-Reglers
(e : Regelabweichung, y : Stellgröße)

Zusätzlich zu der vom PI-Anteil erzeugten Stellgröße (Bild 36) erhöht das D-Glied bei jeder Änderung der Regelabweichung den Stelleingriff (Bild 39). Damit ergibt sich die Stellgröße y aus der Addition der mit den zugehörigen Beiwerten gewichteten P-, I- und D-Anteile:

**drei Einstellparameter
bieten eine hohe
Flexibilität**

$$y = K_P \cdot e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad \text{mit } K_I = \frac{K_P}{T_I}; K_D = K_P \cdot T_D$$

- Regelverhalten (am Beispiel der PT₃-Strecke)

Das Regelverhalten des PID-Reglers ist günstig für Strecken mit großen Energiespeichern (Strecken höherer Ordnung), die möglichst schnell und ohne bleibende Regelabweichung geregelt werden müssen.

So zeigt der PID-Regler bei der Beispiel-Regelstrecke, das beste Regelverhalten (Bild 40) verglichen mit den zuvor besprochenen Reglern. Die Regelgröße erreicht sehr schnell ihren Sollwert, schwingt nach kurzer Zeit ein und nur wenig über. Die drei Reglerparameter K_P , T_I und T_D bieten bei der Festlegung des Regelverhaltens – bezüglich Amplitudenverlauf und Regeldynamik –

**exakte und hoch
dynamische Regelung**

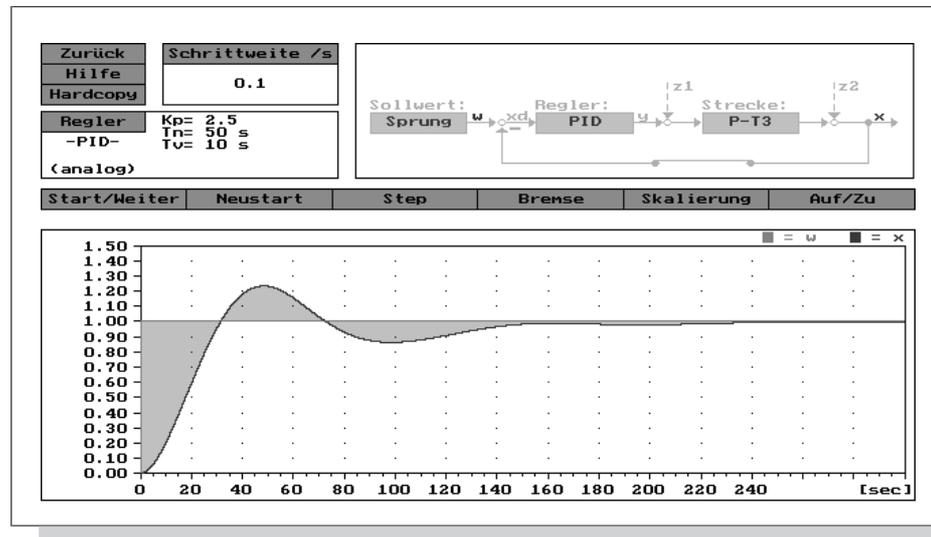


Bild 40: Regelverhalten des PID-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke

**PID-Regler
erfordern eine
sorgfältige Auslegung**

eine fast unüberschaubare Variantenvielfalt. Umso mehr muss auf eine sorgfältige, gut auf die Strecke abgestimmte Auslegung geachtet werden (vgl. Abschnitt: Reglerauswahl).

Anwendungsbereiche des PID-Reglers: Regelkreise mit Strecken zweiter und höherer Ordnung, die schnell ausgeglet werden müssen und keine bleibende Regelabweichung zulassen.

Unstetige Regler

Unstetige Regler werden oft auch als schaltende Regler bezeichnet. Die Stellgröße un stetiger Regler nimmt nur wenige diskrete Werte an, so dass die Energie- oder Massenzufuhr zur Strecke nur schrittweise verändert werden kann.

nur endlich viele Schaltzustände

Zweipunktregler

Die einfachste Form des un stetigen Reglers ist der Zweipunktregler, der – wie sein Name ausdrückt – nur zwei verschiedene Ausgangszustände kennt: beispielsweise 0 und y_{\max} (Bild 41).

Eine typische Anwendung ist die Temperaturreglung mit Hilfe eines Bimetallstreifens (z. B. Bügeleisen). Das Bimetall dient sowohl als Mess- als auch als Schaltelement. Es besteht aus zwei aneinander geschweißten Metallstreifen, die sich bei Wärme unterschiedlich stark ausdehnen (Bild 42).

Temperaturregelung mit Bimetall

Bei geschlossenem Kontakt – Bimetall und Sollwertesteiler berühren einander – fließt Strom, der z. B. eine Heizplatte speist. Ist der Bimetallstreifen in der Nähe der Heizplatte montiert, erwärmt er sich mit. Da sich hierbei das untere Material stärker ausdehnt als das obere, biegt sich der Streifen mit zunehmender Erwärmung nach oben und unterbricht schließlich die elektrische Energiezufuhr zur Heizwicklung.

Aufheizphase...

... und Abkühlung

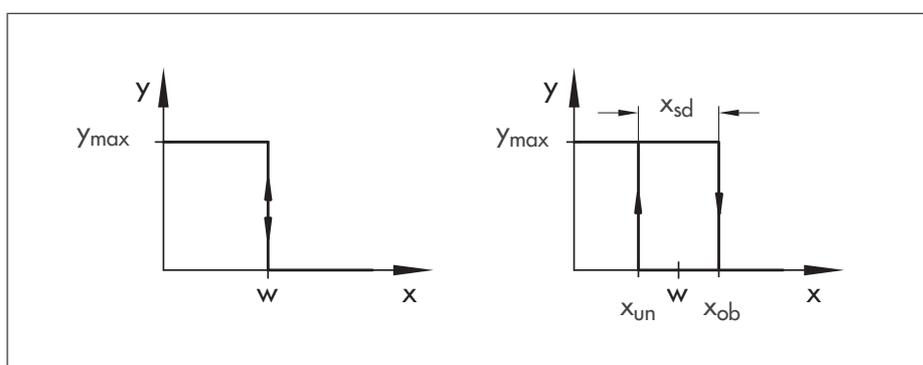


Bild 41: Schaltkennlinie des Zweipunktreglers
(ohne und mit Schaltdifferenz x_{sd})

zyklisches Ein- und Ausschalten

Sinkt die Temperatur des Bimetalls, schließt sich der elektrische Kontakt und es kommt zu einer erneuten Aufheizphase. Um die Lebensdauer der Kontakte zu erhöhen, kann, wie in Bild 42 skizziert, mit Hilfe eines Eisenplättchens und eines Permanentmagneten eine Schaltdifferenz x_{sd} erzeugt werden. Die Bedingungen für das Ein- und Ausschalten sind damit nicht mehr identisch

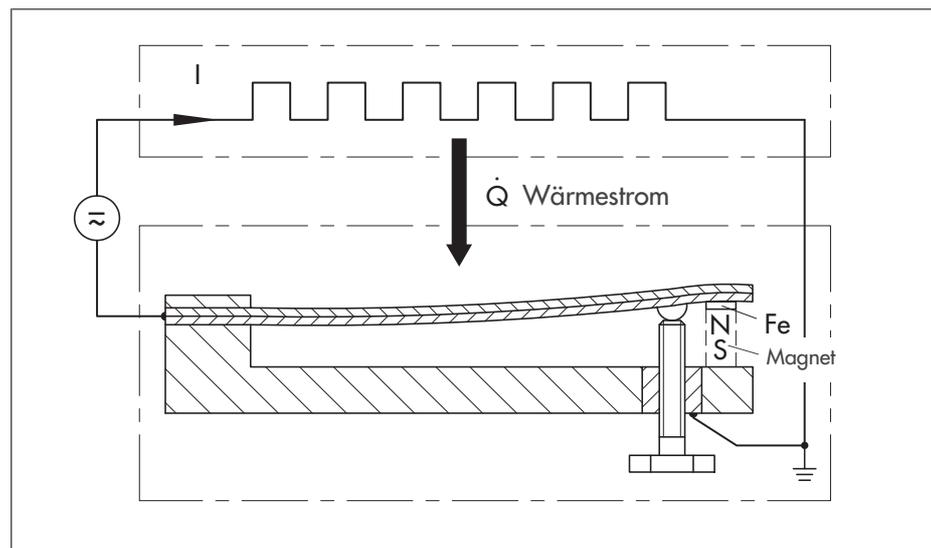


Bild 42: Temperaturregler mit Bimetallschalter

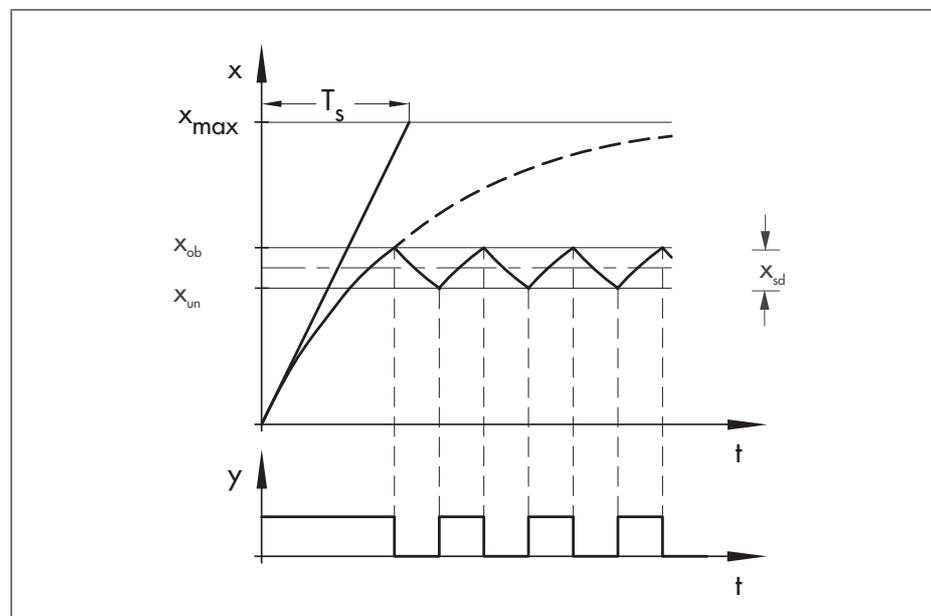


Bild 43: Regelzyklus beim Zweipunktreger mit Schalthysterese und Regelstrecke 1. Ordnung

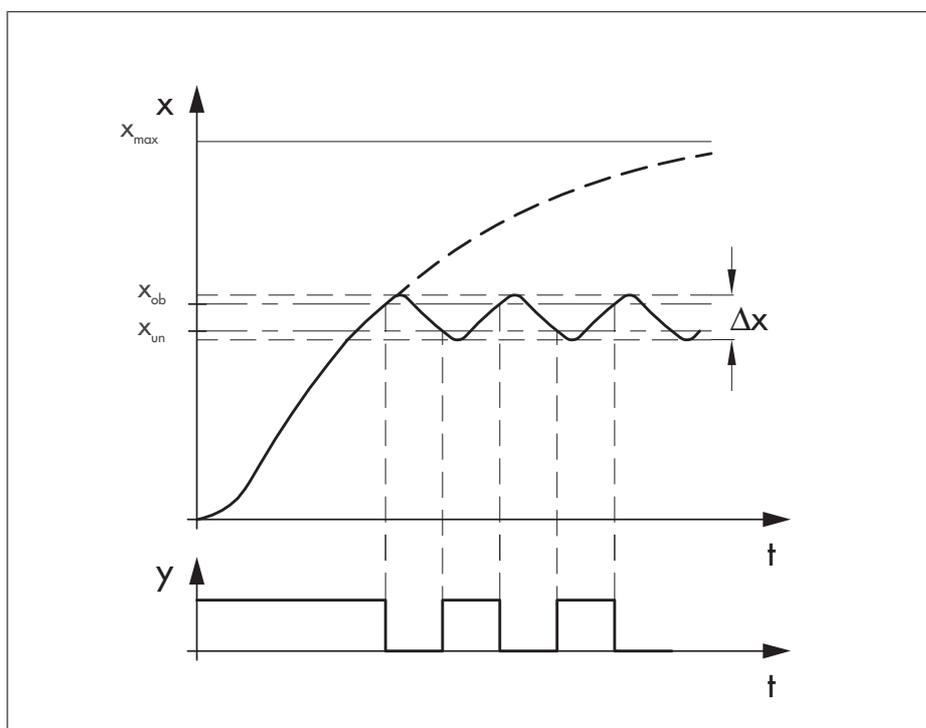


Bild 44: Regelzyklus beim Zweipunktregler mit Schalthysterese und Regelstrecke höherer Ordnung

(x_{un} und x_{ob} entsprechend Bild 41), so dass sich die Schalthäufigkeit verringert und eine Funkenbildung weitgehend vermieden wird.

Die typischen zeitlichen Verläufe von Stellgröße y und Regelgröße x bei einer Zweipunktregelung zeigt Bild 43. Die gestrichelte Kennlinie lässt erkennen, dass bei hohen Sollwerten eine Temperaturerhöhung länger dauert als der Abkühlvorgang. Im diesem Beispiel reicht die verfügbare Energie aus, um auf den doppelten Wert des hier gewählten Arbeitspunktes zu kommen. Die Leistungsreserve beträgt demnach 100 %. Dies bewirkt, dass die Ein- und Ausschaltzeiten identisch sind.

Der im Bild 43 dargestellte Temperaturverlauf kennzeichnet eine Regelstrecke erster Ordnung. Bei Regelstrecken höherer Ordnung würde aufgrund der Verzugszeit die Regelgröße der Stellgröße nur verzögert folgen. Dadurch verlässt die Regelgröße das aus den Schaltpunkten x_{ob} und x_{un} vorgegebene Toleranzband (Bild 44). Dieser Effekt muss bei der Regleranpassung durch nachfolgend beschriebene Maßnahmen berücksichtigt werden.

Schaltdifferenz verringert die Schaltfrequenz

zusätzliche Regelabweichung aufgrund von Verzugszeiten

Zweipunktregler mit Rückführung

Ist die in Bild 44 gezeigte Schwankung der Regelgröße nicht tolerierbar, so kann die Schaltdifferenz verringert werden. Dadurch steigt jedoch die Schalthäufigkeit und damit die Belastung der Kontakte. Zur Regelung von Strecken mit hoher Ordnung eignet sich daher ein Zweipunktregler mit Rückführung oftmals besser.

Rückführung verbessert die Regelqualität

Bei einem Zweipunkt-Temperaturregler mit Rückführung erwärmt im eingeschalteten Zustand eine zusätzliche interne Heizwicklung den Bimetallstreifen und bewirkt so eine vorzeitige Unterbrechung der Energiezufuhr. Bei richtiger Anpassung führt diese Maßnahme – bei akzeptabler Schaltfrequenz – zu einem wesentlich ruhigeren Verlauf der Regelgröße.

Dreipunktregler und Dreipunktschrittregler

Ein Dreipunktregler kann – wie schon der Name sagt – drei verschiedene Schaltzustände einnehmen. Bei einer Temperaturregelung lassen sich damit nicht nur – wie bei einem Zweipunktregler – die Zustände ‘Aus’ und ‘Heizen’ verwirklichen, sondern es besteht zusätzlich die Möglichkeit auf ‘Kühlen’ zu schalten. Der Dreipunktregler übernimmt demnach die Funktion von zwei miteinander gekoppelten Zweipunktreglern, die bei unterschiedlichen Zuständen schalten. Dies zeigt auch die Schaltkennlinie des Dreipunktreglers mit Schalthysterese (Bild 45).

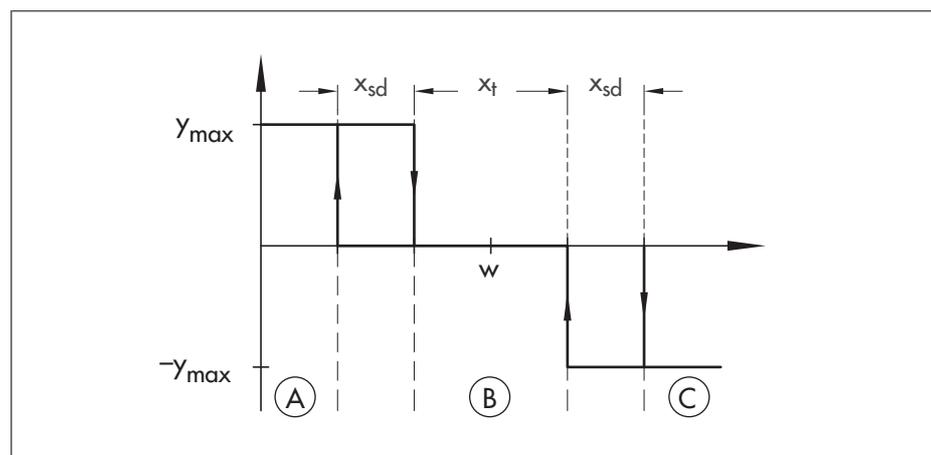


Bild 45: Kennlinie eines Dreipunktreglers mit den Schaltdifferenzen x_{sd} und der Totzone x_t

Im Bereich der Stelltechnik findet man Dreipunktregler häufig in Verbindung mit elektrischen Stellantrieben. Mit den drei Zuständen 'Linkslauf' (z. B. Öffnen), 'Rechtslauf' (Schließen) und 'Aus' kann ein Stellmotor ein Ventil in jede beliebige Hubstellung fahren (Bild 46). Mit Hilfe geeigneter Ansteuerverfahren erhält man mit einem schaltenden Regler und integrierendem Steller (z. B. Stellmotoren) ein quasistetiges P-, PI- oder PID- Regelverhalten. Solche Dreipunktschrittregler kommen dort zum Einsatz, wo keine pneumatische oder hydraulische, sondern elektrische Hilfsenergie zur Verfügung steht.

**dreipunktgeregelte
Stellmotoren**

**quasistetiges
Regelverhalten mit
Dreipunktschrittregler**

Bei einer zum Streckenverhalten passenden Auslegung unterscheidet sich das Regelverhalten eines Dreipunktschrittreglers kaum vom Verhalten der stetigen Regler. Er reagiert regelungstechnisch mitunter sogar günstiger, beispielsweise dann, wenn bei einer Regelgröße das durch Störungen verursachte Rauschen innerhalb der toten Zone x_t liegt.

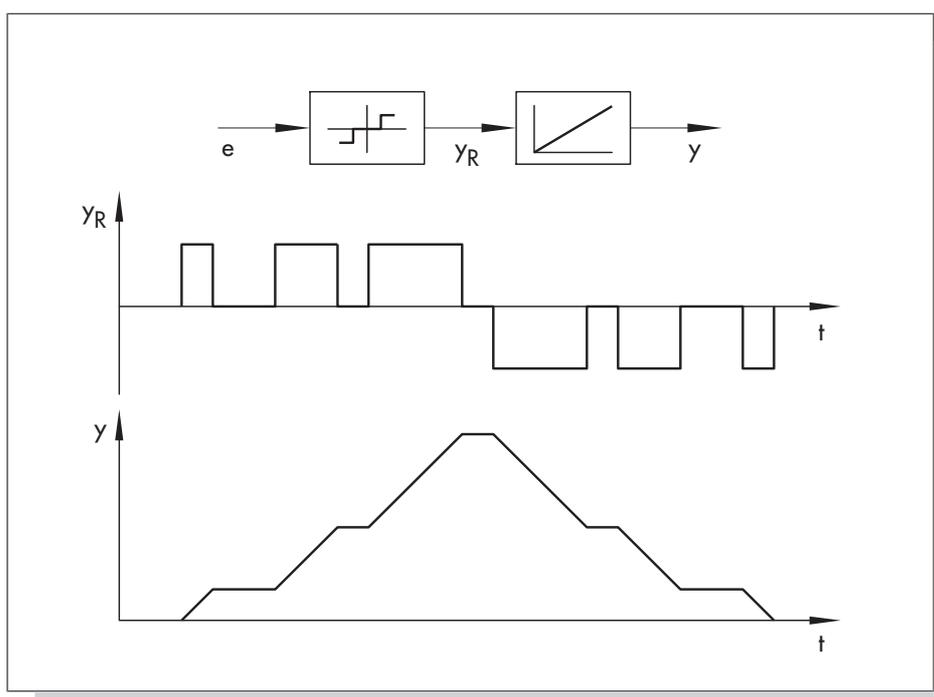


Bild 46: Stellsignal eines quasistetigen Reglers
(Dreipunktregler mit Stellmotor)

Reglerauswahl

Auswahlkriterien

Zur Lösung einer Regelaufgabe gehört die

- ▶ Analyse der Regelstrecke und die dazu passende
- ▶ Auswahl und Auslegung eines Reglers.

Die wichtigsten Merkmale der zumeist verwendeten P-, PD-, I-, PI- und PID-Regelglieder zeigt die folgende Tabelle:

Regelglied	Regelabweichung	Arbeitspunkteinstellung	Stellgeschwindigkeit
P	bleibend	wünschenswert	hoch
PD	bleibend	wünschenswert	sehr hoch
I	keine	entfällt	niedrig
PI	keine	entfällt	hoch
PID	keine	entfällt	sehr hoch

Bewertungskriterien für die Reglerauswahl

Die Reglerauswahl ist abhängig davon,

- ▶ ob eine integral- oder proportionalwirkende Strecke vorliegt (Strecke mit oder ohne Ausgleich),
- ▶ wie groß die Verzögerungen (Zeitkonstanten und/oder Totzeiten) der Strecke sind,
- ▶ wie schnell eine Regelabweichung ausgeregelt werden muss und
- ▶ ob bleibende Regelabweichungen akzeptiert werden können.

Die Aussagen der vorangegangenen Abschnitte (siehe auch obige Tabelle) führen zu folgender Zuordnung bezüglich Regler und Strecke:

P-Regler werden bei einfach zu regelnden Strecken eingesetzt, bei denen eine bleibende Regelabweichung nicht stört. Mit geringem Aufwand erreicht man hier ein stabiles und dynamisches Regelverhalten.

P-Regler

PD-Regler sind sinnvoll bei Strecken mit großen Verzögerungen, bei denen bleibende Regelabweichungen nicht relevant sind. Durch den D-Anteil erhöht sich die Stellgeschwindigkeit, so dass die Regeldynamik gegenüber dem P-Regler verbessert wird.

PD-Regler

I-Regler eignen sich dann, wenn sehr geringe Anforderungen bezüglich der Regeldynamik bestehen und wenn die Strecke keine größeren Verzögerungen aufweist. Vorteilhaft ist, dass Regelabweichungen vollständig ausgeregelt werden.

I-Regler

PI-Regler verbinden die Vorteile des P- und des I-Reglers. Mit ihm erreicht man ein dynamisches Regelverhalten, ohne dass bleibende Regelabweichungen auftreten. Mit dem PI-Regler lassen sich die meisten Regelaufgaben lösen. Sind jedoch trotz großer Streckenverzögerungen möglichst kurze Stellzeiten erforderlich, wird man den PID-Regler wählen.

PI-Regler

PID-Regler eignen sich bei Strecken mit großen Verzögerungen, die schnellstmöglich ausgeregelt werden müssen. Gegenüber dem PI-Regler erreicht man durch den D-Anteil eine höhere Regeldynamik. Im Vergleich zum PD-Regler entsteht durch den I-Anteil im Beharrungszustand keine Regelabweichung.

PID-Regler

Die Auswahl eines passenden Reglers hängt wesentlich von den jeweiligen Streckenparametern ab. Daher dienen die obigen Aussagen über die Einsatzgebiete nur als grobe Richtschnur; die Eignung eines speziellen Reglertyps muss letztlich im Einzelnen anhand der Strecke genau geprüft werden.

Einstellung der Regelparameter

Für ein zufriedenstellendes Regelergebnis ist die Auswahl eines geeigneten Reglers ein wichtiger Aspekt. Noch wesentlicher ist jedoch die Einstellung der passenden Reglerparameter K_p , T_i und T_d , die auf das Streckenverhalten abgestimmt sein müssen. Zumeist ist hierbei ein Kompromiss zu machen zwischen einer sehr stabilen aber auch langsamen Regelung oder einem sehr dynamischen, unruhigeren Regelverhalten, welches unter Umständen zum Schwingen neigt und instabil werden kann.

**Auslegung auf
Arbeitspunkt oder
-bereich**

Bei nichtlinearen Strecken, die immer im selben Betriebspunkt arbeiten sollen, z. B. Festwertregelung, müssen die Reglerparameter auf das Streckenverhalten in diesem Arbeitspunkt angepasst werden. Kann – wie bei Folgeregelungen – kein fester Arbeitspunkt definiert werden, muss eine Reglereinstellung gefunden werden, die über den ganzen Arbeitsbereich ein ausreichend schnelles und stabiles Reglergebnis liefert.

In der Praxis werden Regler zumeist anhand von Erfahrungswerten eingestellt. Liegen diese nicht vor, muss das Streckenverhalten genau analysiert werden, um anschließend mit Hilfe verschiedenster theoretischer oder praktischer Auslegungsverfahren geeignete Reglerparameter festzulegen.

**Reglerauslegung nach
Ziegler-Nichols**

Eine Möglichkeit dieser Festlegung bietet der Schwingungsversuch nach der Methode von Ziegler-Nichols. Er bietet eine einfache und für viele Fälle passende Auslegung. Dieses Einstellverfahren lässt sich jedoch nur bei Regelstrecken anwenden, die es erlauben, die Regelgröße zum selbsttätigen Schwingen zu bringen. Die Vorgehensweise ist dann folgende:

- ▶ K_P und T_D am Regler auf den kleinsten Wert und T_i auf den größten Wert einstellen (kleinstmögliche Wirkung des Reglers).
- ▶ Regelstrecke von Hand in den gewünschten Betriebspunkt bringen (Regelung anfahren).
- ▶ Stellgröße des Reglers auf den von Hand vorgegebenen Wert einstellen und auf Automatikbetrieb umschalten.
- ▶ K_P solange vergrößern (X_P verkleinern), bis harmonische Schwingungen der Regelgröße zu erkennen sind. Wenn möglich, so sollte während der K_P -Verstellung mit Hilfe kleiner sprunghafter Sollwertänderungen der Regelkreis zu Schwingungen angeregt werden.
- ▶ Den eingestellten K_P -Wert als kritischen Proportionalbeiwert $K_{P,krit}$ notieren.
- ▶ Die Dauer einer ganzen Schwingung als T_{krit} bestimmen – eventuell per Stoppuhr unter Bildung des arithmetischen Mittels über mehrere Schwingungen.
- ▶ Die Werte von $K_{P,krit}$ und T_{krit} mit den Multiplikatoren gemäß der Tabelle in Bild 47 multiplizieren und die so ermittelten Werte für K_P , T_i und T_D am Regler einstellen.

- Falls erforderlich K_P und T_i leicht nachjustieren, bis die Regelung ein zufriedenstellendes Verhalten zeigt.

	K_P	T_i	T_d
P	$0,50 \cdot K_{P, krit.}$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_{P, krit.}$	$0,85 \cdot T_{krit.}$	-
PID	$0,59 \cdot K_{P, krit.}$	$0,50 \cdot T_{krit.}$	$0,12 \cdot T_{krit.}$

*Bild 47: Einstellwerte der Reglerparameter nach Ziegler/Nichols;
bei $K_{P, krit}$ schwingt die Regelgröße periodisch mit T_{krit}*

Anhang A1: Ergänzende Literatur

- [1] DIN IEC 60050-351:
Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik
- [2] DIN EN 62424: Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik -
Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur
Fließbilderstellung und CAE-Systemen
- [3] Begriffe und Symbole der Regelungstechnik
Technische Information L101; SAMSON AG
- [4] Schmäing, Eduard: Regelungstechnik in Bildern
Band 1-4, Vogel-Verlag, Würzburg
- [5] Samal: Grundriß der analogen und digitalen Regelungstechnik
Band 1 und 2, Oldenbourg-Verlag, München, Wien
- [6] Piwinger, Franz: Regelungstechnik für Praktiker
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [7] Regelungstechnik in der Versorgungstechnik
Verlag C. F. Müller GmbH, Karlsruhe

Bildverzeichnis

Bild 1:	Proportionale Regelstrecke	8
Bild 2:	Zeitverhalten einer P-Regelstrecke	9
Bild 3:	Integrale Regelstrecke	10
Bild 4:	Zeitverhalten einer I-Regelstrecke	10
Bild 5:	Regelstrecke mit Totzeit	11
Bild 6:	Zeitverhalten einer Regelstrecke mit Totzeit	12
Bild 7:	Exponentialfunktionen	13
Bild 8:	Regelstrecke 1. Ordnung	14
Bild 9:	Zeitverhalten einer Regelstrecke 1. Ordnung: PT_1 -Glied	14
Bild 10:	Regelstrecke 2. Ordnung	15
Bild 11:	Zeitverhalten einer Regelstrecke 2. oder höherer Ordnung	16
Bild 12:	Sprungantwort einer Regelstrecke höherer Ordnung	16
Bild 13:	Zeitverhalten von Regelstrecken höherer Ordnung.	17
Bild 14:	Zeitverhalten eines Stellantriebes mit Getriebelose.	18
Bild 15:	Dampfbeheizter Behälter	19
Bild 16:	Arbeitspunktabhängiges Verhalten	20
Bild 17:	Komponenten eines Reglers	23
Bild 18:	Einteilung von Reglern.	24
Bild 19:	Sprungantwort eines Reglers.	25
Bild 20:	Signalverläufe im geschlossenen Regelkreis.	25
Bild 21:	Sprungantwort der Beispiel-Regelstrecke 3. Ordnung	26
Bild 22:	Ausführung eines P-Reglers (ohne Hilfsenergie)	27
Bild 23:	Dynamisches Verhalten des P-Reglers	28

Bild 24: Wirkung der K_p - und Arbeitspunkteinstellung	29
Bild 25: Bleibende Regelabweichung bei Regelkreisen mit P-Reglern . . .	29
Bild 26: Funktionsprinzip und Kennlinie der Nachdruckregelung	31
Bild 27: Füllstandsregelung mit einem P-Regler (ohne Hilfsenergie) . . .	32
Bild 28: Regelverhalten des P-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke	33
Bild 29: Druckregler integrierend	35
Bild 30: Dynamisches Verhalten des I-Reglers	36
Bild 31: Regelverhalten des I-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke	37
Bild 32: Elemente des PD-Reglers	38
Bild 33: Dynamisches Verhalten des PD-Reglers.	39
Bild 34: Regelverhalten des PD-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke	40
Bild 35: Elemente des PI-Reglers	40
Bild 36: Dynamisches Verhalten des PI-Reglers	41
Bild 37: Regelverhalten des PI-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke	42
Bild 38: Elemente des PID-Reglers	42
Bild 39: Dynamisches Verhalten des PID-Reglers	43
Bild 40: Regelverhalten des PID-Reglers mit PT_3 -Regelstrecke.	44
Bild 41: Schaltkennlinie des Zweipunktreglers.	45
Bild 42: Temperaturregler mit Bimetallschalter	46
Bild 43: Zweipunktregler mit Schalthysterese und Strecke 1. Ordnung . .	46
Bild 44: Zweipunktregler und Strecke höherer Ordnung	47
Bild 45: Kennlinie eines Dreipunktreglers	48
Bild 46: Stellsignal eines quasistetigen Regler	49
Bild 47: Einstellwerte der Reglerparameter nach Ziegler/ Nichols	53

NOTIZEN

NOTIZEN

SAMSON voll auf Qualitätskurs



Bvbi

**Die Auszeichnung unseres Qualitäts-
sicherungssystems garantiert hohe
Produkt- und Dienstleistungsqualität.**



SAMSON AG · MESS- UND REGELTECHNIK · Weismüllerstraße 3 · 60314 Frankfurt am Main
Telefon: 069 4009-0 · Telefax: 069 4009-1507 · E-Mail: samson@samson.de · Internet: www.samson.de