

**Regelungen analysieren**

Die heutige Regelungstechnik ist auf Grund von technischen Entwicklungen relativ komplex. Für fast alle Regelungsaufgaben gibt es fertige Regler zu kaufen. Die Informatikerinnen und Informatiker stehen demnach vor der Frage, welcher Regler zur Bewältigung der Regelaufgabe geeignet ist und wie er optimal eingestellt wird.

Dazu benötigen sie das Fachwissen aus der Regelungstechnik und die heute gegebenen Möglichkeiten zur Lösung.

Durch die Problemstellung der Regelung am Beispiel einer Raumtemperaturregelung wird deutlich, dass viele Faktoren die Raumtemperatur beeinflussen.

Durch die systematische Einordnung und Benennung der Größen im Lernbereich 1 werden die Begrifflichkeiten eines Regelkreises und die Zerteilung eines Regelkreises in Einzelelemente dargestellt. Damit wird der Regelkreis mit einer normierten symbolischen Darstellung eingeführt.

Danach werden unabhängig von konkreten Beispielen in einer Modellwelt die typischen Regelsysteme, ihr Verhalten und deren optimale Regelung analysiert.

Mit der im Lernbereich 2 folgenden Einordnung vorhandener realistischer Kreise in ein bekanntes Modell, werden die vorhandenen Lösungen der theoretischen Regelungstechnik übertragen.

Im Lernbereich 3 werden darüber hinaus die notwendigen Grundlagen für optimale Reglereinstellungen dargestellt.

Alle notwendigen Informationen und Arbeitsunterlagen sind in diesem Lernmodul enthalten.

Eine Zusammenfassung regelungstechnischer Grundlagen ist im Modul „Formeln Regelungstechnik“ enthalten.

Steht Ihnen entsprechende Hard- und Software zur Verfügung, können Sie Teile dieses Lernmoduls am PC nachvollziehen.

Dieses Lernmodul ist im häuslichen Studium zu erarbeiten.

Der benötigte Zeitaufwand liegt bei ca. 15 Stunden.

Zusätzlich finden im Begleitunterricht 8 Stunden Festigung und Vertiefung fachspezifischer und fächerübergreifender Zusammenhänge sowie die Beschreibung von Lösungsverfahren zur Bearbeitung typischer Aufgaben und Problemstellungen statt.

In diesen 8 Stunden ist das Laborprojekt „Regelungstechnik“ im Umfang von ca. 3 Stunden integriert.

**LERNMODUL 2****Ziele****Ausgangssituation****Planung**

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Regelkreiselemente .....</b>	<b>3</b>
1.1 Einführung in die Regelungstechnik .....	3
1.2 Blockschaltbilder .....	6
1.3 Zeitverhalten von Übertragungsgliedern.....	11
1.3.1 Sprungantwortverfahren.....	14
1.3.2 P-Verhalten .....	17
1.3.2.1 $PT_0$ -Verhalten .....	20
1.3.2.2 $PT_1$ -Verhalten .....	20
1.3.2.3 $PT_n$ -Verhalten .....	22
1.3.3 I-Verhalten.....	28
1.3.4 $DT_1$ -Verhalten .....	32
1.3.5 $T_T$ -Verhalten .....	34
<b>2 Regelkreise .....</b>	<b>37</b>
2.1 P-Regler auf $PT_n$ -Strecken .....	41
2.2 I-Regler auf $PT_n$ -Strecken .....	44
2.3 PI-Regler auf $PT_n$ -Strecken .....	45
2.4 PID $T_1$ -Regler auf $PT_n$ -Strecken .....	47
2.5 Unstetige Regler auf $PT_n$ -Strecken.....	50
2.5.1 Zweipunktregler.....	51
2.5.2 Dreipunktregler.....	58
<b>3 Ermittlung von Einstelldaten für Regler .....</b>	<b>62</b>
3.1 Einstellverfahren nach Ziegler-Nichols .....	66
3.2 Einstellverfahren nach Chien-Hrones-Reswick .....	66
<b>Lösungsanhang .....</b>	<b>69</b>

## 1 Regelkreiselemente

### Lernbereich

### 1.1 Einführung in die Regelungstechnik

Die Begriffe „Steuern“ und „Regeln“ sind in der Umgangssprache allgemein geläufig, sie werden jedoch häufig so angewendet, dass eine eindeutige Verständigung zumindest erschwert wird. So wird bei der Stereoanlage von einem „Lautstärkereger“ gesprochen.

Dieser Lautstärkereger hat jedoch nicht die Aufgabe, die Lautstärke bei sich ändernden Betriebsbedingungen - geringere Spannung des Antennensignals, Änderung der Betriebsspannung - auf dem vorgewählten Wert konstant zu halten, sondern es handelt sich um einen Drehknopf, über den die Verstärkungseinstellung der Endstufe verändert werden kann. Richtig ist also die Bezeichnung „Lautstärke-Einsteller“, denn hier wird die gewünschte Lautstärke durch **Einstellen** der Verstärkung gewählt.

Ein Kraftfahrzeug wird, so der übliche Sprachgebrauch, über die Straßen „gesteuert“. Offensichtlich führt hier die eigentliche Bewegung des Steuerrades des Fahrzeuges zur Begriffswahl.

Tatsächlich jedoch liegt eine Regelung vor, bei der der Fahrer ständig die Fahrtrichtung des Fahrzeuges mit dem Verlauf der Straße vergleicht und das Fahrzeug in einem durch Fahrbahnmarkierungen vorgegebenen Bereich hält. Auftretende Störungen wie Seitenwind oder Fahrbahnnunebenheiten werden durch Einwirken des Fahrers ausgeglichen. Es liegt also ein Regelvorgang vor (Abbildung 1).

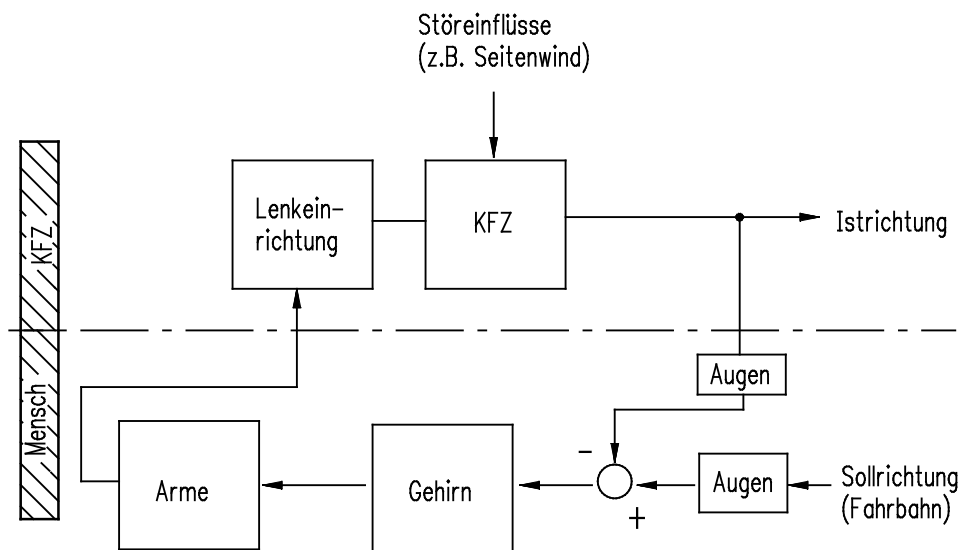


Abbildung 1 Regelkreis

Weitere Beispiele für Steuerungs- und Regelungsvorgänge:

**Haushalt:** Thermostate oder Temperaturregler sorgen automatisch für die Einhaltung gewünschter, eingestellter Temperaturen im Bügeleisen, Heizkissen, Kühlschrank, Warmwasserbereiter oder Wohnraum.

**Kraftfahrzeuge:** Der Akkumulator wird über den Spannungsregler gleichmäßig geladen. Die gerade benötigte Treibstoffmenge wird aus verschiedenen Messdaten errechnet und in den Motor eingespritzt.

**Kraftwerk:** Der Brennstoff für die Dampfkessel wird abhängig von der benötigten Dampfmenge der Feuerung zugeführt. Die Antriebsturbine wird trotz variierender Generatorleistungen auf konstanter Drehzahl gehalten.

**Verfahrenstechnik:** Druck und Temperaturen chemischer Reaktionen werden auf vorgeschriebenen Werten gehalten oder nach Programmen gesteuert. Gemischregler sorgen für die Dosierung vorgegebener Stoffmassen und halten gewünschte Konzentrationen ein.

**Umweltschutz:** Die Konzentration schädlicher Stoffe im Abwasser wird überwacht, das Frischwasser aufbereitet und in einem Verbundsystem zum Verbraucher gesteuert.

**Unterhaltungselektronik:** Stabilisierung von Spannungen und Strömen, Steuerung von Datenverarbeitungsanlagen, AFC im Rundfunkgerät, Kontraststeuerung beim Fernsehgerät.

**Produktion:** Drehzahl- und Drehmomentregelungen elektrischer Antriebe, Positionssteuerung von Bearbeitungsmaschinen.

**Raumfahrt:** Treibstoffdosierung von Raketentriebwerken, Kursregelung von Satelliten und Raumfahrzeugen.

Untersucht man die genannten Beispiele auf Gemeinsamkeiten, so stellt man folgendes Merkmal fest:

Spezielle Einrichtungen und Geräte werden dazu benützt, einen vorgegebenen Zweck ohne menschliches Zutun, also automatisch zu erfüllen.

Um im technischen Bereich eine eindeutige Verständigung zu erreichen, müssen die Begriffe exakt festgelegt und der Sprachgebrauch entsprechend angepasst werden. Dies wird in den folgenden Abschnitten geschehen.

## Steuern und Regeln

### Steuern - Aufbau und Arbeitsweise einer Steuerung

DIN 19226 beschreibt den fachtechnischen Gebrauch des Begriffes „Steuern“ wie folgt:

„Das Steuern - die Steuerung - ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.“

Unter einem System versteht man eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden. Diese Anordnung wird durch eine Hüllfläche von ihrer Umgebung abgegrenzt oder abgegrenzt gedacht.

Diese Festlegung ist natürlich allgemein formuliert worden, damit eben **alle** Steuerungen erfasst werden.

Wirkt in einem System eine Eingangsgröße auf das System ein und liefert dies mit dem ihm eigentümlichen Systemverhalten eine Ausgangsgröße, so liegt bereits eine Steuerung vor.

Üblicherweise wird eine Steuerung als Blockschaltbild dargestellt. Abbildung 2 zeigt ein Blockschaltbild mit einer Eingangsgröße  $x_e$  und einer Ausgangsgröße  $x_a$ . Die Eingangsgröße wird durch einen Pfeil, der auf das System hinweist, dargestellt. Die Ausgangsgröße ist entsprechend durch einen vom System wegweisenden Pfeil gekennzeichnet. Die Pfeile geben die Wirkungsrichtung an.

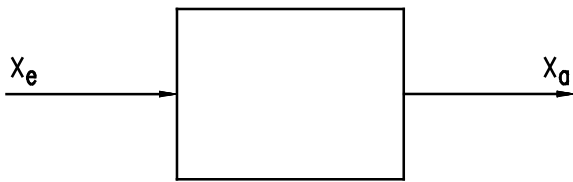


Abbildung 2 Blockschaltbild mit einer Eingangsgröße

Das Blockschaltbild für mehrere Eingangsgrößen und mehrere Ausgangsgrößen zeigt Abbildung 3.

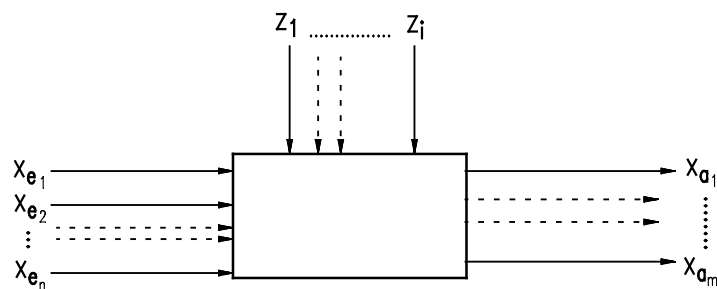


Abbildung 3 Blockschaltbild mit mehreren Eingangsgrößen und Störgrößen

Charakteristisch ist für die Steuerung, dass zwischen Ausgangsgrößen und Eingangsgrößen **keine Rückwirkung** besteht. Die Ausgangsgrößen nehmen also keinen Einfluss auf die Eingangsgrößen. Dies wird auch als **offener Wirkungsablauf** bezeichnet.

Neben den Eingangsgrößen können aber eine oder mehrere Störgrößen eine Änderung des Systemverhaltens bewirken. Diese Störgrößen verändern die Ausgangsgröße oder -größen. Der offene Wirkungsablauf bedeutet, dass die durch eine Störgröße veränderte Ausgangsgröße keine Änderung der Eingangsgröße oder -größen nach sich zieht. Am Ausgang bleibt für den Zeitraum der Störungseinwirkung eine gegenüber der Grundeinstellung veränderte Ausgangsgröße bestehen.

Störgrößen beeinflussen in unerwünschter und unbeabsichtigter Weise die Steuergröße. Ihr Einfluss wird bei der Steuerung **nicht** automatisch ausgeglichen.

Die Störgrößen werden durch auf den Block hinweisende Pfeile wie die Eingangsgrößen dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, weist der Störgrößenpfeil meist auf die obere Kante des Systemblockes.

Am Beispiel einer Ventilsteuerung sollen die theoretischen Überlegungen konkret aufgezeigt werden. Abbildung 4 zeigt ein Ventil zur Steuerung einer Durchflussmenge.

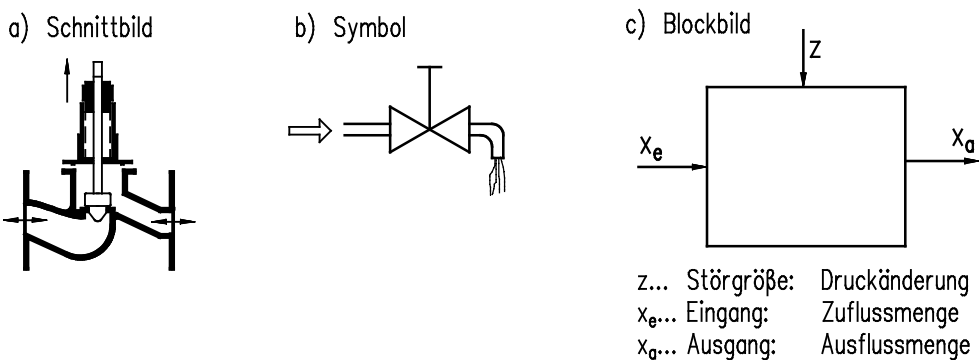


Abbildung 4 Ventil

Die Eingangsgröße  $x_e$  der Steuerung ist z.B. die aktuelle Ventilstellung, die Ausgangsgröße  $x_a$  ist z.B. die Ausflussmenge der Flüssigkeit. Druckänderungen im Zufluss wirken sich als Störgröße  $z$  aus.

In der Ventilsteuerung wird der Flüssigkeitsmengenfluss beeinflusst. Dies geschieht durch ein **Stellglied**. Durch die Eingangsgröße  $x_e$  wird die Einstellung des Stellgliedes festgelegt. In der **Strecke** wird der Massenfluss entsprechend der Aufgabenstellung beeinflusst. Aus dem Zustand am Ausgang der Strecke wird die Ausgangsgröße  $x_a$  abgeleitet.

Das System aus Stellglied und Strecke wird als **Steuerstrecke** bezeichnet. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 5 dargestellt.

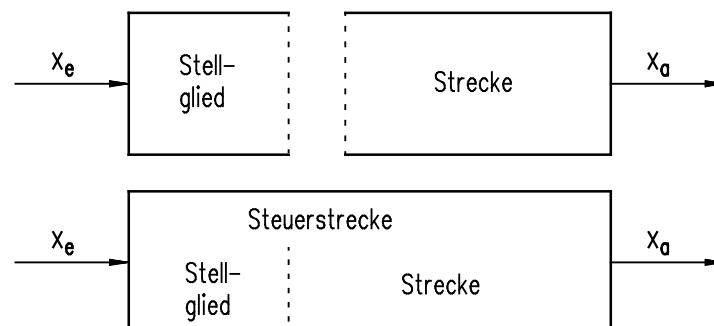


Abbildung 5 Steuerkette

## Regeln - Aufbau und Arbeitsweise einer Regelung

Der Begriff „Regeln“ ist ebenso wie der Begriff „Steuern“ in DIN 19226 festgelegt:

„Das Regeln - die Regelung - ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die zu regelnde Größe, fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, vergleicht und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleiches im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis, statt“.

### 1.2 Blockschaltbilder

Abbildung 6 zeigt ein Blockschaltbild für den Regelkreis, das die wirkungsmäßigen Abläufe erkennen lässt.

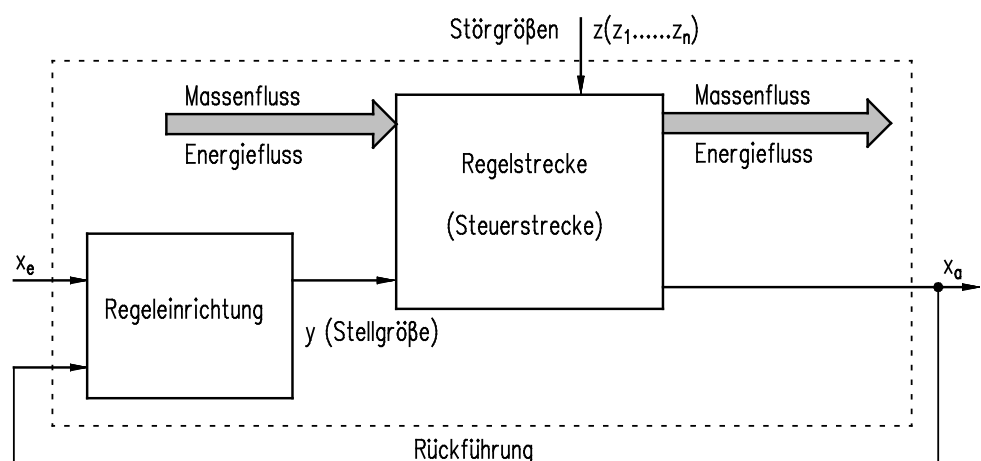


Abbildung 6 Blockschaltbild eines Regelkreises

Der Aufbau des Blockschaltbildes entspricht weitgehend dem einer Steuerung. Mit der Aufschaltung der Ausgangsgröße  $x_a$  auf die Regeleinrichtung (Rückführung) ist der Wirkungskreislauf im Gegensatz zur Steuerung jedoch geschlossen. Dies ist das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zwischen Regelung und Steuerung.

Die Steuerstrecke, bestehend aus Stellglied und Strecke, wird beim Regeln sinngemäß als Regelstrecke bezeichnet. Die Ausgangsgröße  $x_a$  wird, als Basis für die Regelung, als Regelgröße  $x$  bezeichnet. Sie wird der Regeleinrichtung zugeführt.

In der Regeleinrichtung wird in einem Vergleich die Differenz von Regel- und Führungsgröße ermittelt. Aus der Differenz bildet der Regler die funktionsgerechte Anpassung der Stellgröße  $y$ . Die Stellgröße  $y$  steuert dann das Stellglied in der Regelstrecke. Die Begriffe „Sollwert“ und „Istwert“ werden entsprechend auf die Regelung übertragen.

Der Wert der Ausgangsgröße  $x_a$  wird fortlaufend erfasst und in geeigneter Form dem Vergleich in der Regeleinrichtung zugeführt. Wird nach dem Vergleich mit der Führungsgröße  $w$  festgestellt, dass keine Differenz zwischen den beiden Größen vorliegt, so bleibt die Stellgröße  $y$  unverändert. Damit liegt eine Regelung vor.

Wirkt aber eine Störgröße auf die Regelstrecke ein, dann wird die Ausgangsgröße  $x_a$  verändert. Der Vergleich von Regelgröße  $x_a$  und Führungsgröße  $w$  ergibt jetzt eine Differenz. Diese Differenz bewirkt eine von der Art des Reglers abhängige Veränderung der Stellgröße  $y$  in der Weise, dass die Reaktion des Stellgliedes der weiteren Veränderung der Ausgangsgröße  $x_a$  entgegenwirkt und sich somit  $x_a$  wieder in Richtung des Ursprungswertes verändert. Dieses Entgegenwirken wird als „Gegenkopplung“ bezeichnet.

### Größen und Bereiche im Regelkreis

Abbildung 7 zeigt eine noch erweiterte, detaillierte Darstellung eines Regelkreises.

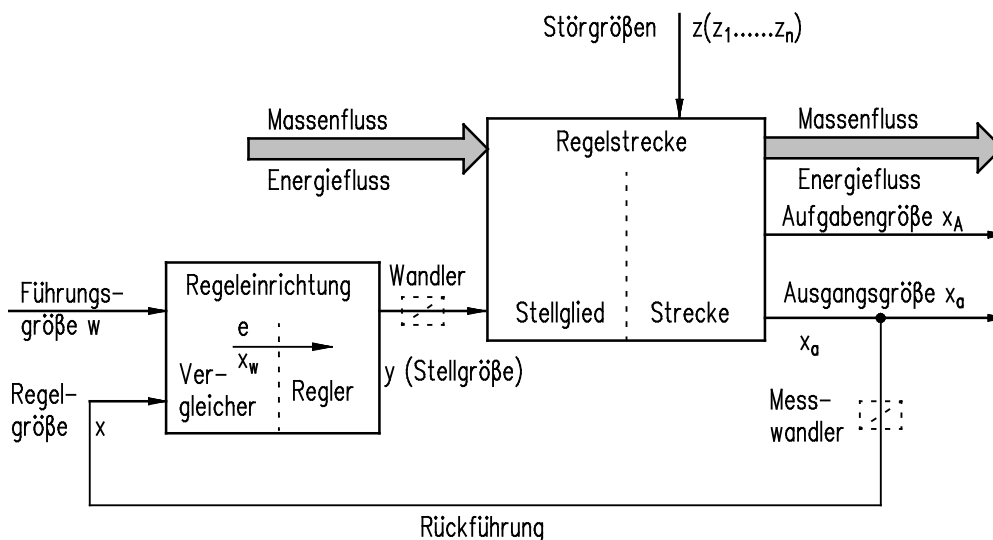


Abbildung 7 Regelkreis

Nachfolgend werden die wichtigsten Begriffe des Regelns näher erläutert:

#### Aufgabengröße $x_A$

Die Aufgabengröße  $x_A$  ist die Größe, die sich aus der Aufgabenstellung für die Regelung ergibt.

### Aufgabenbereich $X_{AH}$

Der Aufgabenbereich  $X_{AH}$  ist der Bereich, in dem die Aufgabengröße  $x_a$  noch liegen darf, damit die richtige Funktion der Regelung gegeben ist.

### Regelgröße $x$

Die Regelgröße  $x$  ist die Größe, die zur aufgabenmäßigen Ausführung der Regelung messtechnisch erfasst wird. Sie ist Ausgangsgröße  $x_a$  der Regelstrecke, muss aber nicht gleich der Aufgabengröße  $x_A$  sein, wenn eine Aufgabengröße messtechnisch direkt nur schwierig messbar ist. Als Regelgröße wird dann eine Größe gewählt, von der die Aufgabengröße in bekannter Weise beeinflusst wird.

### Regelbereich $X_h$

Der Regelbereich  $X_h$  ist der Bereich, in dem die Regelgröße eingestellt werden kann und bei definiertem Störungseinfluss noch ausgeregelt wird.

### Führungsgröße $w$

Die Führungsgröße  $w$  wird dem Regelkreis von außen zugeführt und von ihm selbst nicht beeinflusst. Die Führungsgröße wird der Regeleinrichtung zugeführt und beeinflusst nach Vergleich mit der Regelgröße  $x$  die Stellgröße  $y$ . Führungsgröße  $w$  und Regelgröße  $x$  können unterschiedliche physikalische Größen sein.

### Führungsbereich $W_h$

Der Führungsbereich  $W_h$  ist der Bereich, in dem die Führungsgröße eingestellt werden kann und die Regelung aufgabengemäß folgt.

### Störgrößen $z_1 \dots z_n$

Die Störgrößen  $z$  wirken von außen auf den Regelkreis störend ein. Ihre Einwirkung ist nicht auf die Regelstrecke begrenzt, sondern eine Einwirkung auf die Regeleinrichtung ist möglich. Störungen können ausgehen von Änderungen im Energie- oder Massenfluss oder können Temperaturänderungen, Laständerungen usw. sein.

### Störbereich $Z_h$

Der Störbereich  $Z_h$  ist der Bereich, in dem eine Störung noch ausgeregelt werden kann, also die Regelung aufgabengemäß (stabil) arbeitet.

### Regeldifferenz $e$

Die Regeldifferenz  $e$  ist die Differenz zwischen Führungsgröße  $w$  und Regelgröße  $x$  ( $e = w - x$ ). Die Regeldifferenz  $e$  wird innerhalb der Regeleinrichtung durch den Vergleich der beiden Eingangsgrößen  $w$  und  $x$  gebildet. Mithilfe von  $e$  lässt sich im Signalflussplan die Wirkungsumkehr im geschlossenen Regelkreis verdeutlichen.

### Regelabweichung $x_w$

Die Regelabweichung  $x_w$  ist die Differenz zwischen Regelgröße  $x$  und Führungsgröße  $w$  ( $x_w = x - w$ ). Es gilt also  $x_w = -e$ .

Die Regelabweichung wird vorzugsweise zur Anzeige benutzt, da hiermit leichter erkennbar ist, ob die Regelgröße  $x$  größer ( $x > w \rightarrow x_w$  positiv) oder kleiner ( $x < w \rightarrow x_w$  negativ) als die Führungsgröße  $w$  ist.

### Stellgröße $y$

Die Ausgangsgröße der Regeleinrichtung ist die Stellgröße  $y$ , die der Regler aufgabengemäß aus seiner Eingangsgröße  $e$  bildet. Die Stellgröße  $y$  ist gleichzeitig Eingangsgröße der Regelstrecke und beeinflusst die Regelgröße  $x$ .

### Stellbereich $Y_h$

Der Stellbereich  $Y_h$  ist der Bereich, in dem die Stellgröße  $y$  geändert werden kann.

### Stellgeschwindigkeit $v_y$

Die Stellgeschwindigkeit  $v_y$  ist die Geschwindigkeit, mit der die Stellgröße geändert wird.



**Stellzeit  $T_y$** 

Die Stellzeit  $T_y$  ist die Zeit, in der die Stellgröße  $y$  den Stellbereich  $Y_h$  bei maximaler Stellgeschwindigkeit  $v_y$  durchläuft.

**Wirkungsmäßige Zusammenhänge im Signalflussplan**

Die Blöcke sind Übertragungsglieder, die bestimmte, von den Signalen gesteuerte Vorgänge darstellen. Der einfache Block hat ein Eingangssignal  $x_e$  und ein Ausgangssignal  $x_a$ . Es sind auch mehrere Eingangssignale  $x_{e1} \dots x_{en}$  möglich.

Die Blöcke haben jedoch nur ein Ausgangssignal. Die Darstellung von mehreren Ausgangssignalen aus den gleichen Eingangssignalen erfolgt wegen der besseren Übersichtlichkeit und leichteren mathematischen Beschreibung in mehreren Blöcken.

Für eine Vorzeichenumkehr oder Signalinvertierung ist kein Block erforderlich, sie wird nur mit einer Vorzeichenumkehrstelle dargestellt.

Abbildung 8 zeigt Blöcke in unterschiedlichen Darstellungen.

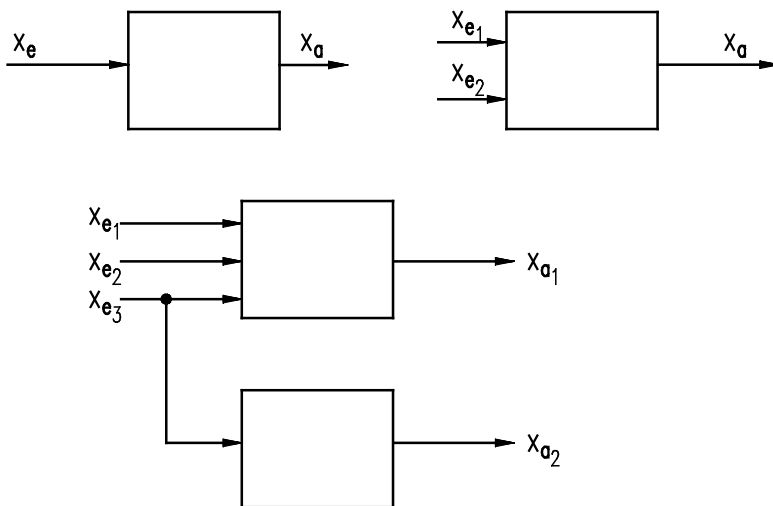


Abbildung 8 Blöcke

In die Blöcke werden bei Bedarf zur genaueren Beschreibung Zusatzinformationen eingetragen, die den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen darstellen (Abbildung 9). Die Zusatzinformation kann als Gleichung, Diagramm oder als Graphik erfolgen.

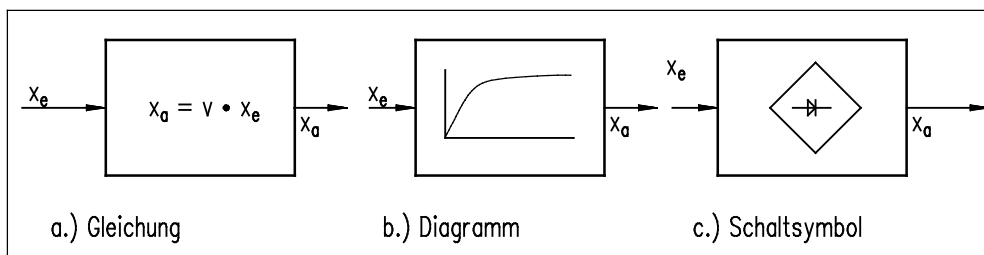


Abbildung 9 Signalflusspläne

Mit Blöcken und Wirkungslinien werden die unterschiedlichen Strukturen gebildet. Dabei lassen sich drei Grundstrukturen unterscheiden:

- Kettenstruktur
- Parallelstruktur
- Kreisstruktur

### Kettenstruktur

Die Aneinanderreihung von Blöcken wird als Kette bezeichnet. Dabei ist das Ausgangssignal des ersten Blocks gleich dem Eingangssignal des zweiten Blocks. Dies setzt sich bei weiteren Blöcken entsprechend fort (Abbildung 10).

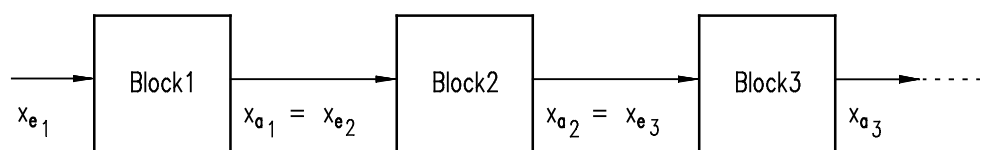


Abbildung 10 Blockkette

### Parallelstruktur

Bei der Parallelstruktur wird ein Eingangssignal zwei oder mehreren parallel liegenden Blöcken zugeführt. Die Ausgangssignale der unterschiedlichen Blöcke werden über eine Additionsstelle wieder zusammengeführt (Abbildung 11).

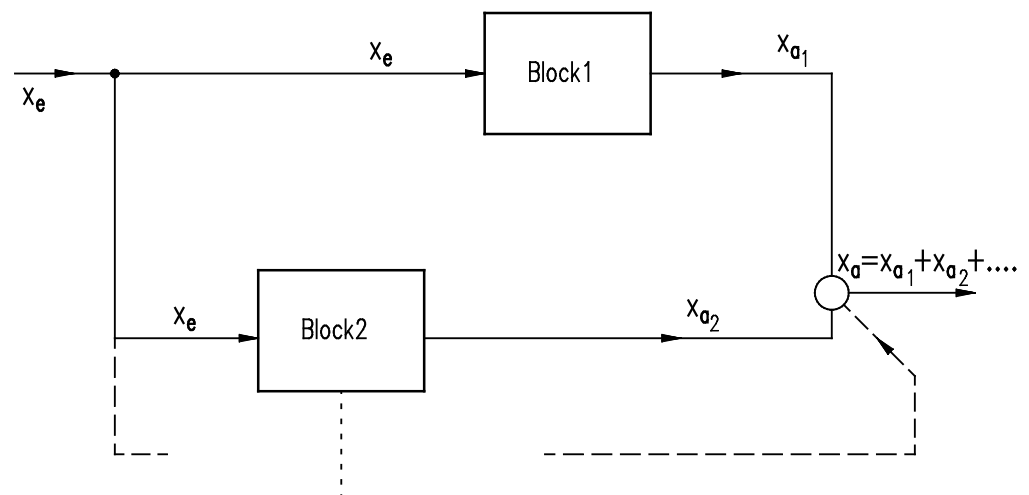


Abbildung 11 Parallelstruktur von Blöcken

### Kreisstruktur

Bei der Kreisstruktur wird das Ausgangssignal eines Blockes direkt oder nach Durchlauf eines oder mehrerer weiterer Blöcke mit dem Eingangssignal des ersten Blocks verknüpft.

Abbildung 12 zeigt einige Beispiele für Kreisstrukturen.

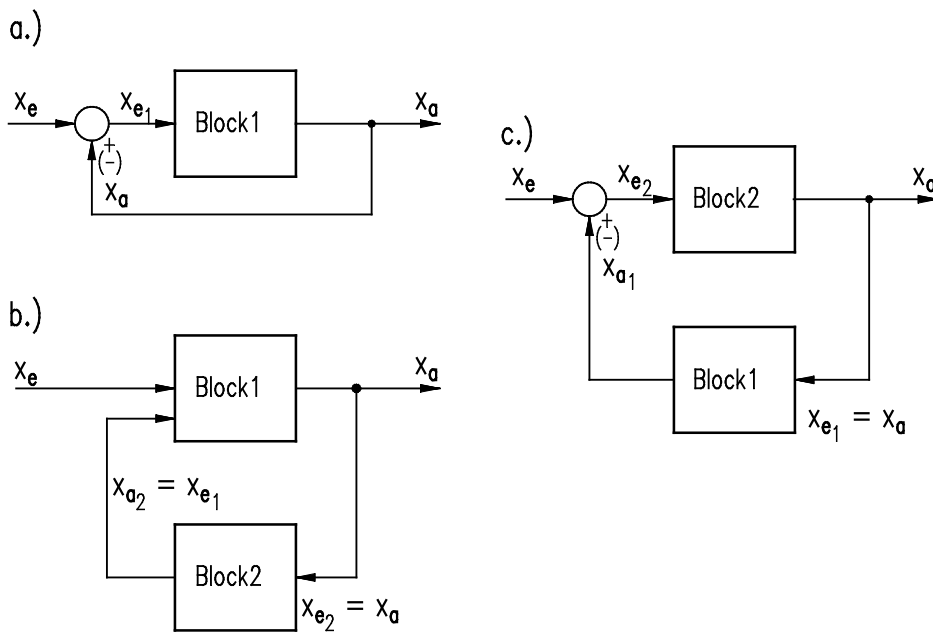


Abbildung 12 Kreisstruktur von Blöcken

Bei den Kreisstrukturen wird der vom Ausgang auf den Eingang zurückwirkende Weg als Rückführung oder Rückkopplung bezeichnet. Unterschieden werden zwei Arten der Rückkopplung (Abbildung 13).

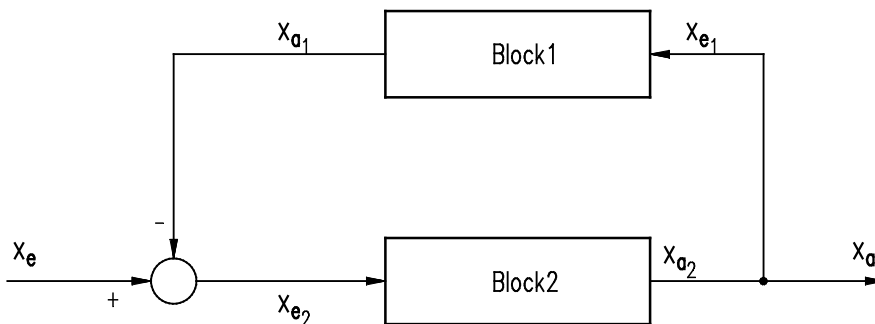


Abbildung 13 Rückkopplung

**Gegenkopplung:** Das Ausgangssignal wirkt nach Durchlaufen des Blockes 1 abschwächend auf sich selbst zurück. Additionsstelle mit  $-x_{a1}$ .

**Mitkopplung:** Das Ausgangssignal wirkt nach Durchlaufen des Blockes 1 verstärkend auf sich selbst zurück. Additionsstelle mit  $+x_{a1}$ .

### 1.3 Zeitverhalten von Übertragungsgliedern

Eine Steuerung oder Regelung besteht aus einzelnen Gliedern. Bei der gerätetechnischen Betrachtung spricht man von **Baugliedern** und bei der wirkungsmäßigen Betrachtung von **Übertragungsgliedern**. In der Praxis werden Steuer- oder Regelstrecken oft für den eingeschwungenen oder Beharrungszustand untersucht (statisches Verhalten).

Für zahlreiche technische Anwendungen in der Regelungstechnik ist aber auch das Verhalten eines technischen Gerätes unmittelbar nach dem Einschalten oder beim

Übergang von einem Betriebszustand zum anderen wichtig. Dieses **Übergangsverhalten** lässt sich rechnerisch meist nur mithilfe der „Höheren Mathematik“ ermitteln, da hier häufig Umladevorgänge bei mehreren Energiespeichern auftreten.

Statt der schwierigen Berechnung verwendet man Messverfahren, die über das Übergangsverhalten Aufschluss geben. Die verwendeten Messverfahren müssen für elektronische Schaltungen, Baugruppen und Systeme die Darstellung der Signalverläufe über die charakteristischen Eigenschaften der untersuchten Funktionsblöcke übersichtlichen Aufschluss ermöglichen.

### Statisches Verhalten

Im Ruhe- oder Beharrungszustand wird die Abhängigkeit der Ausgangsgröße  $x_a$  von der Eingangsgröße  $x_e$  bei Übertragungsgliedern durch eine Kennlinie beschrieben. In der senkrechten Achse ist die abhängige Ausgangsgröße, in der waagerechten Achse die unabhängig veränderliche Eingangsgröße aufgetragen. Die Kennlinie veranschaulicht den Zusammenhang im eingeschwungenen Zustand, hier gilt eine zeitunabhängige Zuordnung von Eingangs- und Ausgangsgrößen. Das Übertragungsglied befindet sich im statischen Zustand.

Im Allgemeinen haben derartige Kennlinien einen nichtlinearen Verlauf (Abbildung 14).

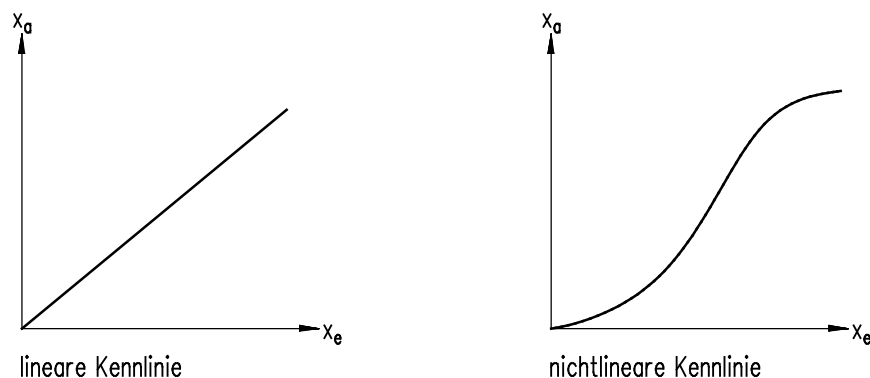


Abbildung 14 Kennlinien

Bei nichtlinearen Kennlinien können gleich bleibende Übertragungseigenschaften nur in sehr kleinen Teilabschnitten angenommen werden. Treten größere Änderungen auf, so müssen die Werte der Ausgangsgröße über die Kennlinie bestimmt werden. Dies ist jedoch sehr umständlich, daher versucht man meist mit vereinfachten, linearen Kennlinien auszukommen.

Diese vereinfachten Kennlinien beschreiben das Übertragungsverhalten jedoch nur näherungsweise. Abbildung 15 zeigt solche Vereinfachungen der Kennlinien.

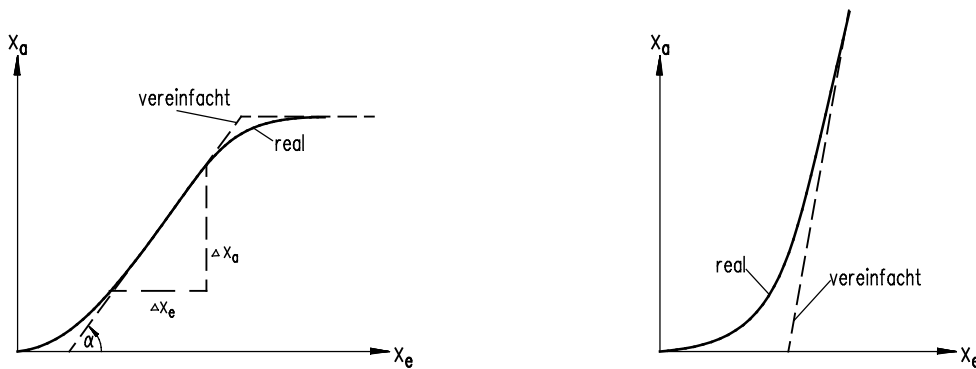


Abbildung 15 Vereinfachung von Kennlinien

Die Vereinfachung gilt hinreichend genau nur für bestimmte Bereiche. Soll das statische Übertragungsverhalten in anderen Bereichen bestimmt werden, so ist entweder eine andere Auswahl der vereinfachten Kennlinie oder eine Aufteilung in mehrere Bereiche mit jeweils linearer Kennlinie zweckmäßig. Für eine lineare oder abschnittsweise linearisierte Kennlinie lässt sich ein **Übertragungsfaktor K** angeben. Der Übertragungsfaktor ergibt sich als Steigung der Kennlinie im betrachteten Bereich:

$$K = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} = \tan \alpha$$

Die Ausgangsgröße  $x_a$  ist in diesem Fall durch einen konstanten Faktor mit der Eingangsgröße  $x_e$  verknüpft.

$$\Delta x_a = K \cdot \Delta x_e = \tan \alpha \cdot \Delta x_e$$

Ist die Kennlinie nicht linear, jedoch in der Nähe des Arbeits- oder Betriebspunktes näherungsweise linear, so wird häufig ein linearer Verlauf angenommen und der Zusammenhang entsprechend dargestellt:

$$\Delta x_a \approx K \cdot \Delta x_e = \tan \alpha \cdot \Delta x_e$$

Auch für eine nichtlineare Kennlinie kann in jedem Arbeits- oder Betriebspunkt ein Übertragungsfaktor K angegeben werden. Hierzu wird im Betriebspunkt eine Gerade an die Kurve gelegt. Diese Gerade wird als Tangente bezeichnet. In Abbildung 16 ist dieses Verfahren für verschiedenen Arbeitspunkte dargestellt.

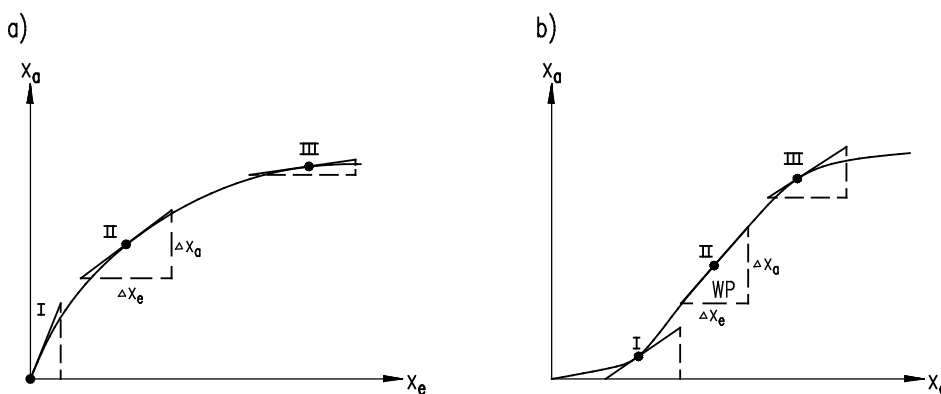


Abbildung 16 Ermittlung des Übertragungsfaktors bei nichtlinearer Kennlinie

Im Bereich des Arbeitspunktes II (Abbildung 16 b) ist die Steigung und damit der Übertragungsfaktor am größten. Dieser Punkt wird auch als **Wendepunkt WP** bezeichnet, weil die Steigung im Kurvenverlauf auf diesen Punkt hin zunimmt, jenseits des Wendepunktes jedoch wieder abnimmt.

Viele Übertragungsglieder erreichen den laut statischer Kennlinie zugehörigen Ausgangswert nach Änderung der Eingangsgröße erst nach einer gewissen Zeit. Das Zeitverhalten kommt bei der statischen Kennlinie, die das Verhalten im eingeschwungenen Zustand wiedergibt, nicht zum Ausdruck.

### Dynamisches Verhalten (Übergangsverhalten)

Neben dem statischen Verhalten des Übertragungsgliedes ist in der Praxis besonders auch die Reaktion (Antwort) des Übertragungsgliedes auf eine **Änderung** der Eingangsgröße  $x_e$  zu beachten. Nur in wenigen Fällen lässt sich das dynamische Verhalten mit einfachen Mitteln berechnen.

Vorhandene Systeme enthalten meist mehrere Energiespeicher, hier ist dann bereits höhere Mathematik zur Berechnung einer Übertragungsfunktion erforderlich. Aus normierten messtechnischen Untersuchungen lassen sich mit einfachen Mitteln Rückschlüsse auf das Verhalten ziehen und charakteristische Daten ermitteln. Die Untersuchungen erfolgen mit **Eingangstestfunktionen**.

Erfolgt am Eingang eines Übertragungsgliedes z.B. ein Signalsprung (plötzliches Aufdrehen eines Ventils am Heizkörper um eine halbe Umdrehung), so ist das hierdurch hervorgerufene Ausgangssignal die Antwort auf das Eingangssignal. Sie wird als **Sprungantwort** bezeichnet, weil die Änderung des Eingangssignals sprunghaft erfolgt ist.

#### 1.3.1 Sprungantwortverfahren

Die gebräuchlichste und meist auch am einfachsten zu erzeugende Testfunktion zur Untersuchung von Übertragungsgliedern ist die, bei der die Eingangsgröße sprunghaft verändert wird. Bei dieser Sprung-Testfunktion, auch kurz **Sprungfunktion** genannt, wird die Eingangsgröße von einem Ruhezustand aus, möglichst sprunghaft um einen bestimmten Betrag geändert und der zeitliche Verlauf der Ausgangsgröße gemessen.

Sprungförmig in mathematischem Sinn bedeutet eine Änderung eines Wertes in einem Zeitraum, der Null, also unmessbar klein, ist. In der Praxis ist dies nicht durchführbar, hier reicht es aus, wenn die Änderung der Eingangsgröße wesentlich schneller erfolgt als das Übertragungsglied am Ausgang reagieren kann.

Für eine Raumheizung ist eine Einstellungsänderung am Stellventil, die sich in Sekunden vollzieht, schnell. Für eine elektronische Schaltung müsste die Änderung des Eingangssignals in Mikrosekunden oder Nanosekunden erfolgen, damit auch hier die Änderung des Eingangssignals schnell gegenüber der verursachenden Änderung des Ausgangssignals ist.

Der zeitliche Verlauf der Ausgangsgröße wird als **Sprungantwort  $x_a(t)$**  bezeichnet. Abbildung 17 zeigt zwei unterschiedliche Darstellungen.

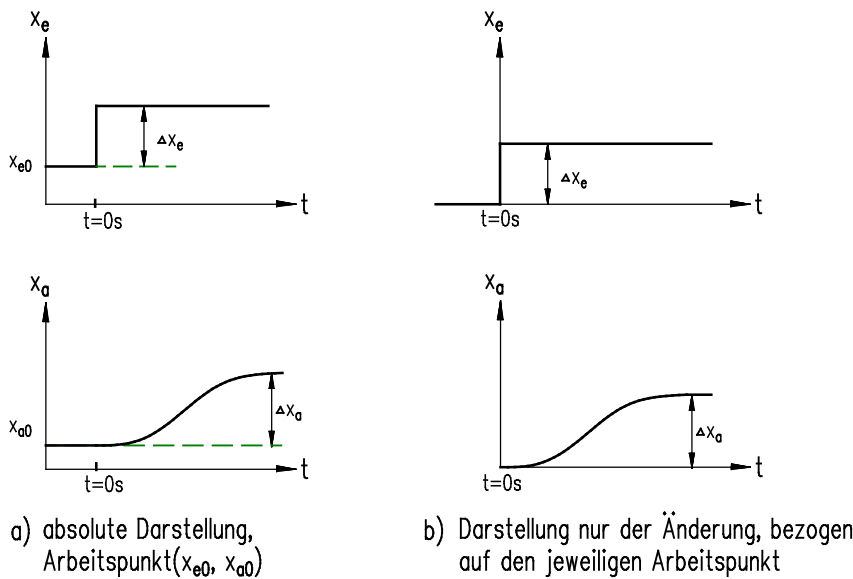


Abbildung 17 Sprungantwort eines Übertragungsgliedes

Abbildungsteil a) geht von bestimmten Anfangszuständen  $x_{e0}$  und  $x_{a0}$  aus. Die Eingangsgröße  $x_e$  wird sprunghaft um die Größe  $\Delta x_e$  geändert, die Ausgangsgröße ändert sich dann um  $\Delta x_a$ . Hier sind also die aktuellen Arbeitspunkt- oder Betriebspunktgrößen berücksichtigt.

Im Abbildungsteil b) sind nur die Änderungen eingetragen. In der Regelungstechnik ist diese Darstellung üblich, weil sie die Reaktion eines Übertragungsgliedes sehr übersichtlich darstellt, während sich das Diagramm a) mehr an praxisgerechten Funktionen orientiert.

Die Wirkungen in einem Regelungssystem können physikalische Größen sehr unterschiedlicher Natur sein. Es kann daher vorkommen, dass z.B. die Eingangsgröße  $x_e$  eines Blocks eine elektrische, die Ausgangsgröße  $x_a$  eine mechanische Größe ist. Damit treten auch im Signalflussplan oder Strukturplan unterschiedliche Größen auf.

Für alle Berechnungen kann dies sehr umständlich werden, deshalb vereinfacht man die Rechnungen durch eine **Normierung** der Eingangs- und Ausgangsgrößen. Soll eine Größe normiert werden, so ist eine geeignete Kenngröße, auf die die Größe bezogen werden soll, zu wählen. Häufig verwendet werden als Kenngrößen: Nennwerte, Maximalwerte oder Bereichsgrenzen von Mess- oder Einstellbereichen. Die zur Normierung verwendeten Größen erhalten den Index N und lauten dann:

$$\frac{x_e}{x_{eN}} \quad ; \quad \frac{x_a}{x_{aN}}$$

Lage und Verhalten der normierten Größen relativ zu den Nennwerten sind einfacher zu überblicken, deshalb bietet die Normierung folgende Vorteile:

- Die normierten Gleichungen haben keine Einheiten.
- Ein normiertes System hat einen einfachen und übersichtlichen Signalflussplan.
- Der Vergleich von normierten Systemen ist einfacher als der von unnormierten Systemen.

Wendet man die normierte Darstellung auf die Sprungfunktion an, so erhält man die Darstellung der bezogenen Sprungantwort oder **Übergangsfunktion  $h(t)$**  (Abbildung 18).

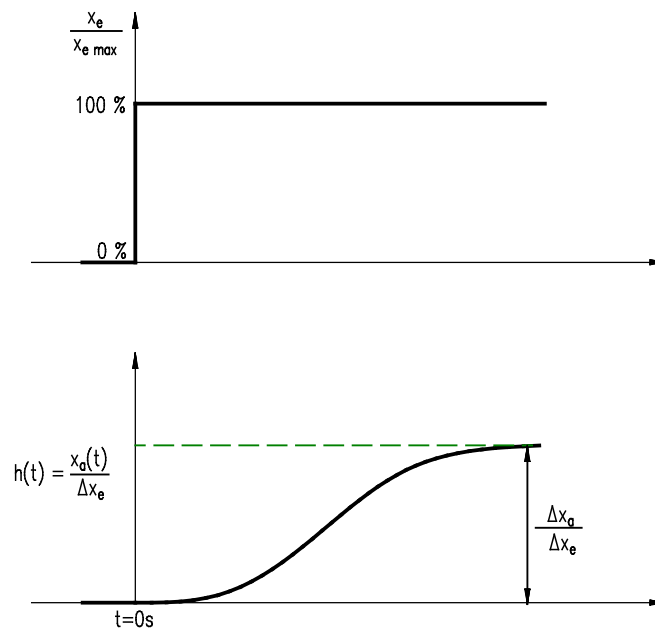


Abbildung 18 Übergangsfunktion  $h(t)$

Der Sprung der Eingangsfunktion  $\Delta x_e$  wird als Sprung von 0 % auf 100 % betrachtet. Die Übergangsfunktion  $h(t)$

$$h(t) = \frac{x_a(t)}{\Delta x_e}$$

ergibt den gleichen qualitativen Kurvenverlauf, nur der Maßstab ist anders. Der Vorteil liegt im Vermeiden des Mitschleppens von Absolutwerten. Ebenso fallen die Einheiten weg bei gleichen physikalischen Größen am Eingang und Ausgang.

Aus der Sprungantwort oder der Übergangsfunktion eines Übertragungsgliedes können wichtige Kenngrößen, wie die Zeitkonstante und die Verstärkung oder Dämpfung, ermittelt werden. Bei der praktischen Anwendung der Sprungfunktion müssen allerdings gewisse Randbedingungen (Parameter) berücksichtigt werden. So darf der Sprung z.B. nicht so groß gemacht werden, dass das Übertragungsglied an seine Begrenzung gefahren wird.

Für nichtlineare Übertragungsglieder muss der Eingangssprung so klein sein, dass der von der Ausgangsgröße durchlaufene Antwortbereich auf der Kennlinie noch als linear betrachtet werden kann. Lassen sich diese Forderungen nicht erfüllen, so müssen in Abhängigkeit der Eingangsgröße mehrere Sprungantworten bestimmt werden. Übertragungsglieder werden in Signalflussplänen als Blöcke dargestellt, die Sprungantwort kann in den Block eingetragen werden. Die Achsenbezeichnungen werden dabei häufig weggelassen (Abbildung 19).

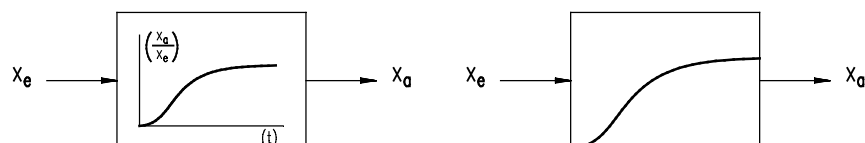


Abbildung 19 Übertragungsglied in Blockdarstellung mit Sprungantwort

Zur messtechnischen Ermittlung von Sprungantworten eignen sich schreibende Messgeräte, Oszilloskop und Speicheroszilloskop.



## Zusammenfassung

Wird die **Änderung** des Ausgangssignal  $\Delta x_a$  durch Quotientenbildung auf die Sprunghöhe des Eingangssignals  $\Delta x_e$  bezogen, dann entsteht die bezogene Sprungantwort, genannt Übergangsfunktion  $h(t)$ . Zur Ermittlung einer Übergangsfunktion ist immer von einer sprunghaften Änderung des Eingangssignals  $\Delta x_e$  auszugehen.

### 1.3.2 P-Verhalten

Übertragungsglieder, bei denen die Ausgangsgröße  $x_a$  und die Eingangsgröße  $x_e$  proportional, also durch einen konstanten Faktor verknüpft sind, werden als Proportionalglieder bezeichnet. Das Proportional-Glied wird kurz auch P-Glied genannt. Für das P-Glied gilt folgender mathematischer Zusammenhang:

$$\Delta x_a = K_P \cdot \Delta x_e$$

Der Proportionalitäts- oder Verknüpfungsfaktor  $K_P$

$$K_P = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e}$$

wird auch als **Proportionalbeiwert** bezeichnet. Der Index P weist auf die Zugehörigkeit des Beiwertes zu einem P-Glied hin.

Reine Proportionalglieder weisen **keine** Zeitverzögerungen auf, daher gibt es auch keine Phasenverschiebungen zwischen der Eingangsgröße  $x_e$  und der Ausgangsgröße  $x_a$ . In der Praxis lassen sich P-Glieder wegen der fehlenden Zeitverzögerung nur näherungsweise realisieren.

Abbildung 20 zeigt einen Hebel mit dazugehöriger Übergangsfunktion. Hier hängt das Kräfteverhältnis zwischen  $F_1$  und  $F_2$  von den Hebelarmenlängen  $l_1$  und  $l_2$  ab.

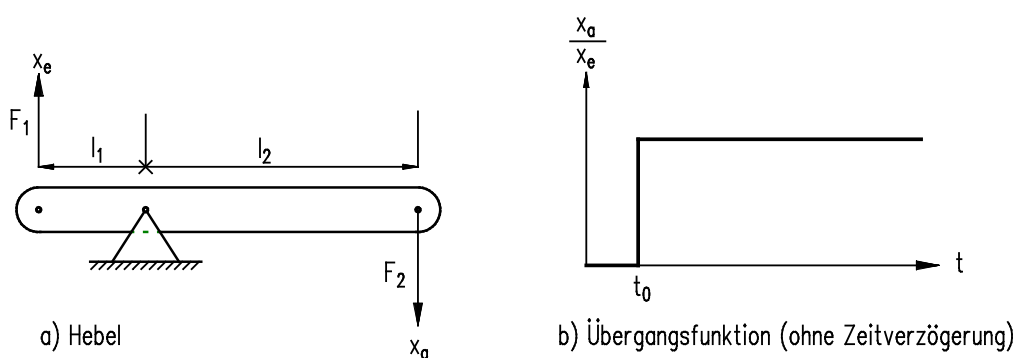


Abbildung 20 Hebel als P-Glied

Der Proportional-Beiwert wird entsprechend ermittelt und lautet (Hebelgesetz):

$$K_P = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}$$

Die Eingangsgröße  $x_e$  und die Ausgangsgröße  $x_a$  sind beides Kräfte, daher ist auch hier der Proportionalbeiwert eine reelle Zahl.

Proportional-Glieder werden messtechnisch mit der Sprung-Testfunktion untersucht. Der Sprung kann dabei in positiver oder negativer Richtung erfolgen. Abbildung 21 zeigt Eingangsgröße und Sprungantwort für ein P-Glied.

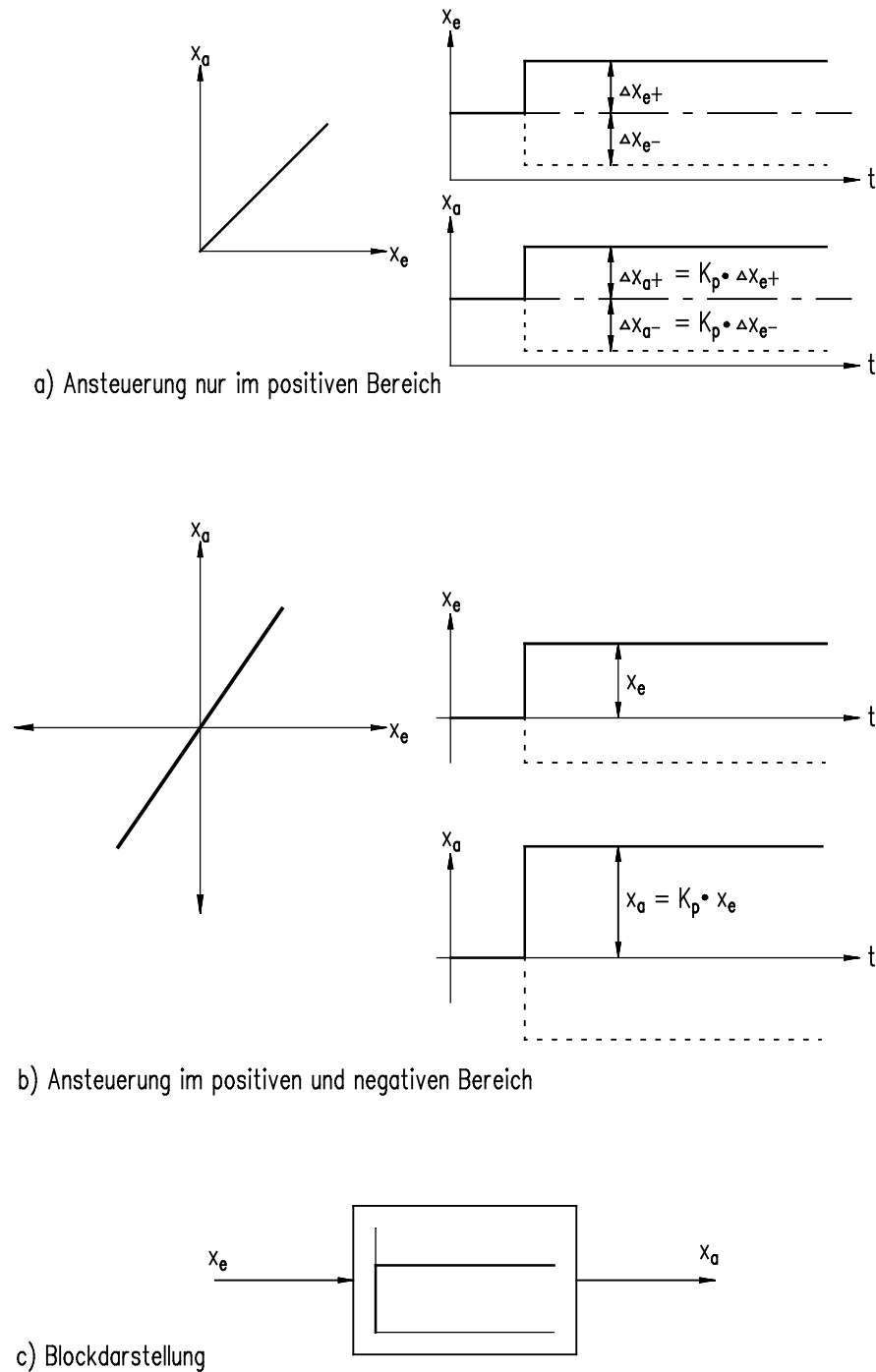


Abbildung 21 Eingangssignal und Sprungantworten für das P-Glied

In der bezogenen Darstellung ( $x_e/x_a$ ) lässt sich der Proportional-Beiwert  $K_p$  einfach ermitteln. Bei elektronischen Übertragungsgliedern wird häufig der  $K_p$ -Beiwert als Ver-

stärkung oder Dämpfung bezeichnet, wenn Eingangs- und Ausgangsgrößen gleiche Einheiten haben,  $K_p$  also einheitenlos ist.

Bei der Blockdarstellung wird nur die Änderung der Ausgangsgröße dargestellt. Die Kenngröße  $K_p$  steht oben links an den Block geschrieben (Abbildung 22).

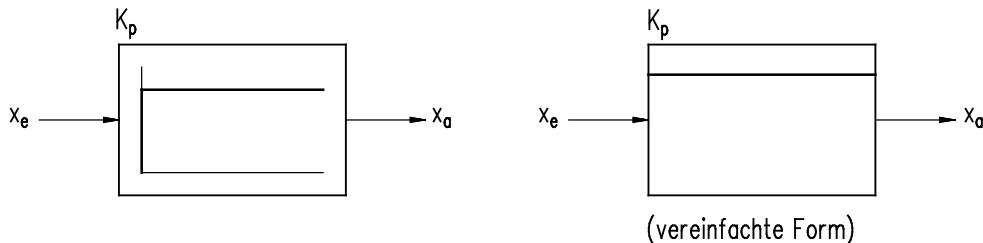


Abbildung 22 P-Glied in Blockdarstellung

Als P-Glied im regelungstechnischen Sinne werden Übertragungsglieder immer dann bezeichnet, wenn die gegenüber dem Eingangssignal auftretende Verzögerung klein ist.

Deshalb muss darauf hingewiesen werden, dass bisher immer angenommen wurde, ein P-Glied sei ideal. In der Praxis ist dies jedoch nicht der Fall. Jedes P-Glied benötigt eine kleine aber doch vorhandene Zeit, um auf ein Eingangssignal zu reagieren. Hinzu kommt weiterhin, dass auch die Eingangssignale in der Praxis nicht unendlich schnell zwischen zwei Signalzuständen hin- und herspringen können. In Abbildung 23 sind diese realen Verhältnisse etwas übertrieben dargestellt.

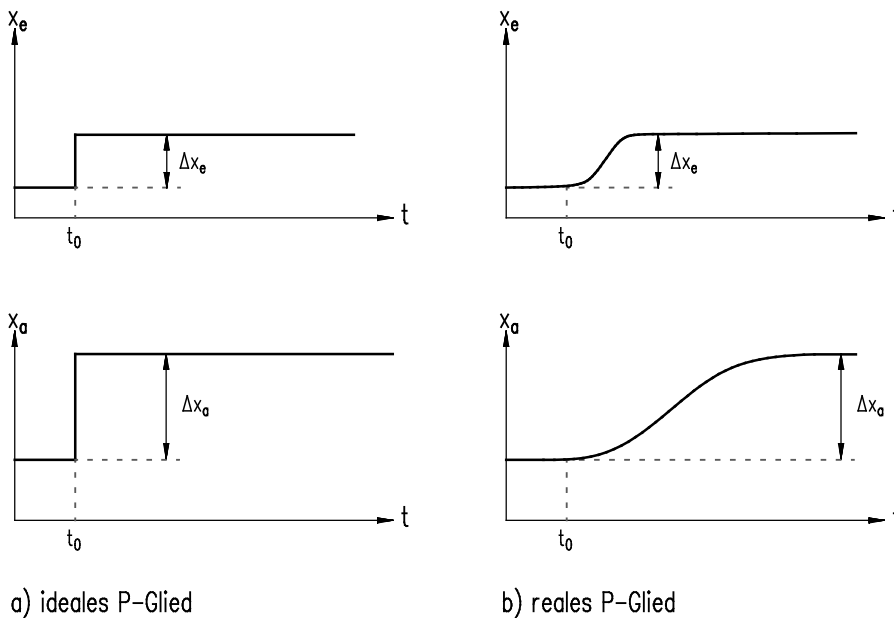


Abbildung 23 Ideale und reale Sprungfunktion sowie Sprungantworten des idealen und realen P-Gliedes

### 1.3.2.1 PT<sub>0</sub>-Verhalten

Übertragungsglieder, die Energiespeicher oder Massen enthalten, werden als Verzögerungsglieder bezeichnet. Die Ausgangsgröße erreicht erst nach einiger Zeit den sich aus der Eingangsgrößenänderung ergebenden Ausgangsgrößenwert.

Besonders einfach gestalten sich die Verhältnisse bei nur einem Energiespeicher im System. Hier lässt sich der Verlauf der Ausgangsgröße auch mathematisch einfach bestimmen. Bei mehreren Energiespeichern sind für die rechnerische Bestimmung des Verlaufes der Ausgangsgröße Kenntnisse der höheren Mathematik erforderlich. In der Praxis werden daher oft Näherungslösungen verwendet.

Proportionalglieder, die keine Speicher enthalten, reagieren auf eine sprunghafte Änderung der Eingangsgröße sofort, d.h. ohne Zeitverzögerung. Dies stellt aber das Verhalten eines idealen P-Gliedes dar, deshalb wird das ideale Übergangsverhalten auch als PT<sub>0</sub>-Verhalten beschrieben.

Für das PT<sub>0</sub>-Glied gelten deshalb die gleichen mathematischen Zusammenhänge wie für das P-Glied.

### 1.3.2.2 PT<sub>1</sub>-Verhalten

Bei einem Proportionalglied mit Verzögerungsverhalten kann die Ausgangsgröße einer sprunghaft veränderten Eingangsgröße nicht sofort wie beim idealen P-Glied (PT<sub>0</sub>-Verhalten), sondern nur langsam folgen. Diese Eigenschaft hat dem Verzögerungsglied seinen Namen gegeben.

Ursache für die Verzögerung sind Energiespeicher (z.B. Wärmekapazität, rotierende Masse, Induktivität). Der Begriff 1. Ordnung besagt, dass nur ein Energiespeicher bzw. eine Masse im Übertragungsglied vorhanden ist. Auf- oder Entladevorgänge von einem Energiespeicher sind durch eine Zeitkonstante T bestimmt, daher ist für ein Verzögerungsglied 1. Ordnung auch die Bezeichnung T<sub>1</sub>-Glied üblich. Der Buchstabe „T“ weist auf die charakteristische Zeitkonstante T, der Index „1“ auf die Anzahl der Energiespeicher im Übertragungssystem hin.

Das PT<sub>1</sub>-Glied besteht aus einer Reihenschaltung eines Proportional-Gliedes und eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung. Da die einzelnen Übertragungsglieder als rückwirkungsfrei betrachtet werden, ist die Reihenfolge beliebig. Die Kettenschaltung P-T<sub>1</sub> kann also erst ein P-Glied und dann ein T<sub>1</sub>-Glied enthalten oder auch aus einer Reihenschaltung von erst einem T<sub>1</sub>-Glied und dann einem P-Glied bestehen. Die Übertragungsfunktion der Kettenschaltung ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Übertragungsfunktionen.

Sprungantwort des P-Gliedes:  $\frac{x_a}{x_e} = K_P$

Sprungantwort des T<sub>1</sub>-Gliedes:  $\frac{x_a}{x_e} = 1 - e^{-\frac{t}{T}}$

mit  $e \approx 2,718$  (Eulersche Zahl),  
K<sub>P</sub> Proportionalbeiwert

Für das PT<sub>1</sub>-Glied gilt folgender mathematischer Zusammenhang:

$$x_a = K_P \cdot x_e \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

In Prinzipschaltbildern wird das  $PT_1$ -Übertragungsglied als Block mit symbolisiertem Aufladevorgang dargestellt (Abbildung 24).

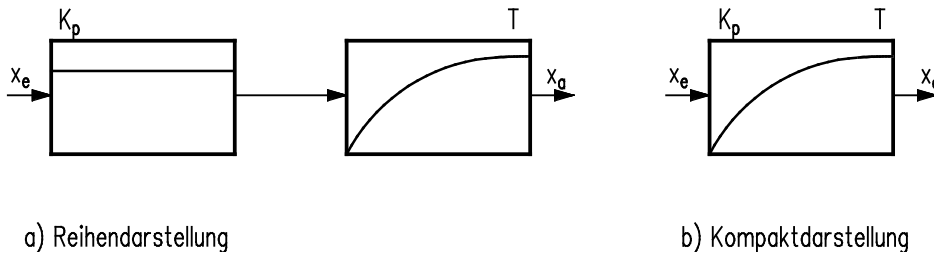


Abbildung 24 Blockschaltbild für das  $PT_1$ -Glied

Als Beispiel für eine Regelstrecke 1. Ordnung sei hier eine elektrische Kochplatte angeführt: Nach dem Einschalten wird die Masse der Kochplatte aufgeheizt, was zunächst angenähert einen linearen Temperaturanstieg zur Folge hat, weil bei kleinen Kochplattentemperaturen die Wärmeabgabe an die Umgebung gering ist. Mit zunehmender Kochplattentemperatur nimmt die Wärmeabgabe an die Umgebung zu. Die für die Temperaturerhöhung der Kochplattenmasse zur Verfügung stehende Energie wird dadurch geringer. Mit dem Erreichen der Beharrungstemperatur ist diese Energie Null. Abbildung 25 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kochplattentemperatur.

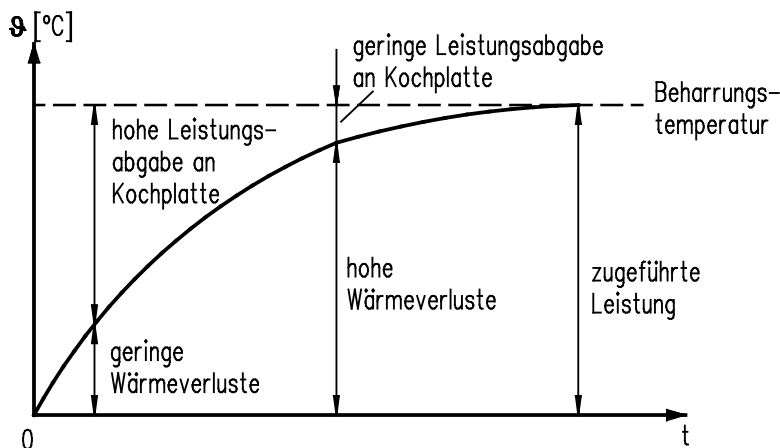


Abbildung 25 Kochplattentemperatur in Abhängigkeit von der Zeit

Die Masse der Kochplatte ist ein Energiespeicher. Das Speichervermögen ist abhängig von der Kochplattenmasse. Umso größer die Kochplattenmasse ist, desto länger dauert der Aufheizvorgang.

Eine charakteristische Kenngröße der Sprungantwort einer Energiespeicherstrecke ist die Zeitkonstante  $T_s$ , die vom Speichervermögen des Speichers bestimmt wird. Durch die Zeitkonstante wird die Zeit angegeben, die verstreicht, bis 63,2 % des Endwertes der Ausgangsgröße erreicht sind. Nach Ablauf von fünf Zeitkonstanten ( $5 \cdot T_s$ ) sind bereits 99,3 % der Ausgangsendgröße erreicht. Die Zeitkonstante kann zeichnerisch einfach ermittelt werden. Im Anfangspunkt der Sprungantwort wird eine Tangente an die Kurve gelegt. Der Schnittpunkt der Tangente mit dem Beharrungswert ergibt die Zeitkonstante  $T_s$ .

Abbildung 26 zeigt die Sprungantwort eines  $PT_1$ -Gliedes in normierter Form.

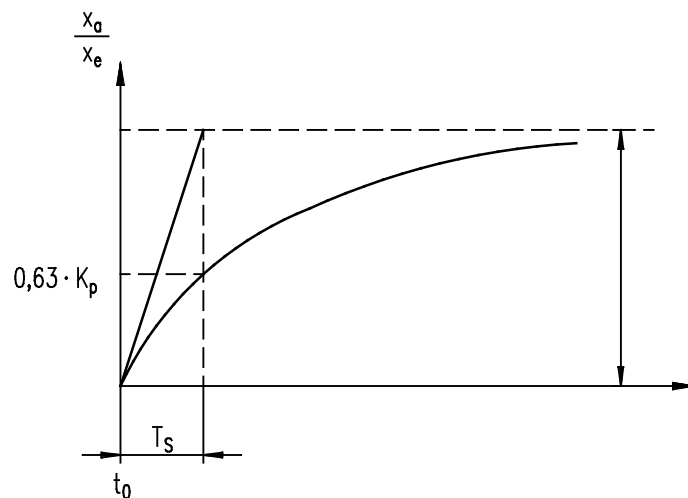


Abbildung 26 Sprungantwort eines  $PT_1$ -Gliedes in normierter Form

Sowohl das P-Glied als auch das  $T_1$ -Glied kann als Spezialfall des  $PT_1$ -Gliedes betrachtet werden. Wird beim  $PT_1$ -Glied der Proportionalitäts-Beiwert  $K_p$  zu 1 gemacht, so verhält sich das  $PT_1$ -Glied wie ein reines  $T_1$ -Glied. Für  $T_1 = 0$  s dagegen wirkt das  $PT_1$ -Glied als reines P-Glied.

### 1.3.2.3 $PT_n$ -Verhalten

Bei einem Proportionalglied mit Verzögerungsverhalten 2. Ordnung oder höher sind mindestens zwei oder mehr Energiespeicher wirksam. Für jeden Energiespeicher gilt eine eigene Zeitkonstante.

Die Anzahl der Zeitkonstanten wird als Ziffernangabe bei den Kurzbezeichnungen mitgeführt. Ein Verzögerungsglied 2. Ordnung trägt daher auch kurz die Bezeichnung VZ 2-Glied oder  $T_2$ -Glied. Verzögerungsglieder 2. Ordnung können sehr unterschiedliche Eigenschaften haben, daher werden drei Fälle unterschieden:

Verzögerungsglieder 2. Ordnung

- mit gleichartigen Energiespeichern und gleichen Zeitkonstanten
- mit gleichartigen Energiespeichern und ungleichen Zeitkonstanten
- ungleichartigen Energiespeichern

#### VZ 2-Glieder mit gleichartigen Energiespeichern und gleichen Zeitkonstanten

Ein Verzögerungsglied mit zwei gleichen Zeitkonstanten und zwei gleichartigen Energiespeichern ist ein einfacher Fall. Das  $T_2$ -Glied kann als eine rückwirkungsfreie Hintereinanderschaltung von zwei gleichen  $T_1$ -Gliedern betrachtet werden. Abbildung 27 zeigt das Verhalten eines  $T_2$ -Gliedes bei Sprungtestfunktion.

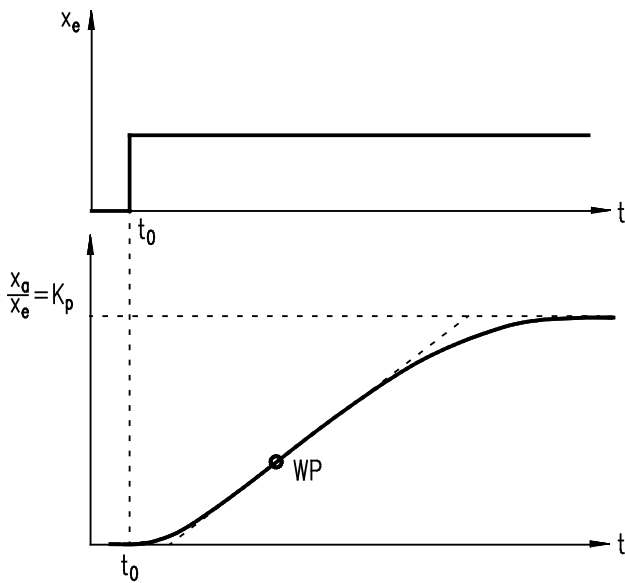


Abbildung 27  $PT_2$ -Glied bei Sprungtestfunktion in normierter Darstellung

Charakteristisch für diese Sprungantwort ist der Wendepunkt WP, bei dem der Kurvenverlauf die größte Steigung hat. Wird im Wendepunkt eine Tangente an den Kurvenzug gelegt, so wechselt der Kurvenverlauf im Wendepunkt von der einen auf die andere Seite der Tangente.

In Abbildung 28 ist die Blockdarstellung eines  $PT_2$ -Glieder angegeben. Mit dargestellt ist die Kettenschaltung der beiden VZ 1-Glieder.

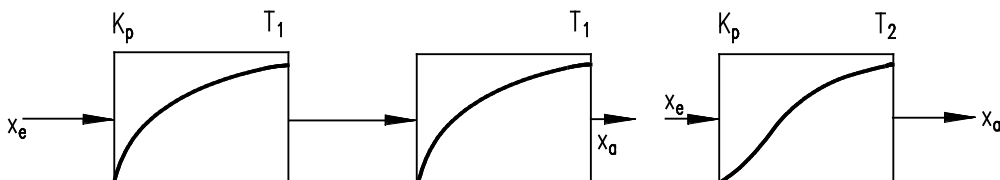


Abbildung 28 Blockdarstellung des  $PT_2$ -Glieder

Abbildung 29 zeigt mit Ergänzungen die Sprungantwort für ein VZ 2-Glied in normierter Darstellung. Über den Wendepunkt und die Tangente in diesem Punkt an den Sprungantworten ergeben sich zwei Zeitabschnitte  $T_u$  und  $T_g$ .

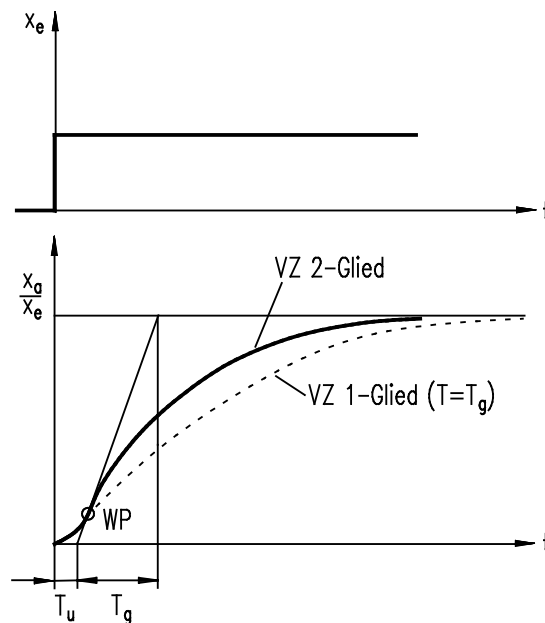


Abbildung 29 normierte Sprungantwort des VZ 2-Gliedes mit  $T_u$  und  $T_g$

In Abbildung 29 wird die Sprungantwort des VZ 2-Gliedes mit der Sprungantwort einer Hintereinanderschaltung aus einem Totzeitglied und einem VZ 1-Glied verglichen. Die Totzeit  $T_t$  ist dabei so groß wie  $T_u$ , die Zeitkonstante  $T$  so groß wie  $T_g$  gewählt.

Wegen der näherungsweisen Übereinstimmung wird in der Praxis für ein VZ 2-Glied eine Ersatzsprungantwort verwendet. Die Ersatzsprungantwort hat eine Totzeit  $T_t$ , als Ersatztotzeit oder Verzögerungstotzeit bezeichnet, und eine Zeitkonstante  $T_g$ , als Ersatzzeitkonstante oder Ausgleichszeit bezeichnet. Die Werte für  $T_u$  und  $T_g$  lassen sich aus der Sprungantwort eines VZ 2-Gliedes ermitteln.

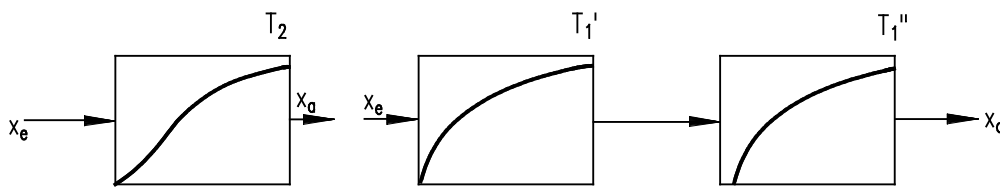
Für viele Anwendungen reicht die Kenntnis der Ersatzsprungantwort mit ihren charakteristischen Zeitkonstanten  $T_u$  und  $T_g$  aus, um das Verhalten des  $PT_2$ -Gliedes zu beurteilen.

### Verzögerungsglieder mit gleichartigen Energiespeichern und ungleichen Zeitkonstanten

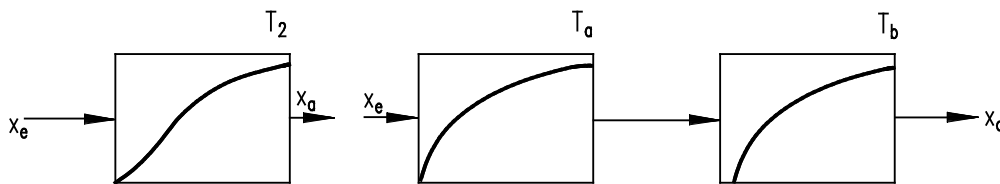
Der Fall eines VZ 2-Gliedes mit gleichartigen Energiespeichern und gleichen Zeitkonstanten ist als einfacher Sonderfall zu betrachten. Häufig stimmen jedoch die Zeitkonstanten nicht überein.

In Abbildung 30 ist dieser Fall als Blockschaltbild dargestellt. Hier ist angenommen, dass das erste VZ 1-Glied die kleinere Zeitkonstante hat.





a) Normgerechte Darstellung



b) Darstellung unter Berücksichtigung der Zeitkonstanten

Abbildung 30 VZ 2-Glied als Reihenschaltung von zwei VZ 1-Gliedern mit unterschiedlichen Zeitkonstanten  $T_a$  und  $T_b$ 

Die Reihenschaltung zeigt die charakteristische Sprungantwort. Aus der Sprungantwort lassen sich die Verzugszeit  $T_u$  und die Ausgleichszeit  $T_g$  ermitteln. In der Praxis haben die absoluten Werte von  $T_u$  und  $T_g$  nicht die ausschlaggebende Bedeutung, wichtig ist das Verhältnis  $T_u / T_g$ , das Verzugszeitanteil genannt wird.

Für ein aus zwei VZ 1-Gliedern mit gleichen Energiespeichern sowie gleichen Zeitkonstanten  $T_a$  (1. VZ 1-Glied) und  $T_b$  (2. VZ 1-Glied) bestehendes VZ 2-Glied ist  $T_u / T_g = 0,104$ . Ist in der Reihenschaltung  $T_a$  kleiner als  $T_b$ , so ergibt sich ein Wert von  $T_a / T_b < 1$ . Für diese Art Reihenschaltung wird der Wert  $T_u / T_g < 0,104$ . Der Einfluss einer Verzögerung selbst mit kleiner Zeitkonstante hat sehr starke Auswirkungen und führt zu deutlich ausgeprägten Verzugszeitanteilen.

### Verzögerungsglieder mit ungleichartigen Energiespeichern

Enthält ein Verzögerungsglied verschiedenartige Speicher, so kann es nach einer sprunghaften Anregung infolge der wirksamen Verzögerungen und Phasenverschiebungen zum Hin- und Herpendeln der Energie zwischen den Speichern kommen. Der Pendelvorgang der Energie wird wegen der praktisch immer vorhandenen Energieverluste mehr oder weniger ausgeprägt ablaufen.

Aus dem qualitativen Verlauf der Sprungantwort lassen sich vier charakteristische Fälle unterscheiden (Abbildung 31).

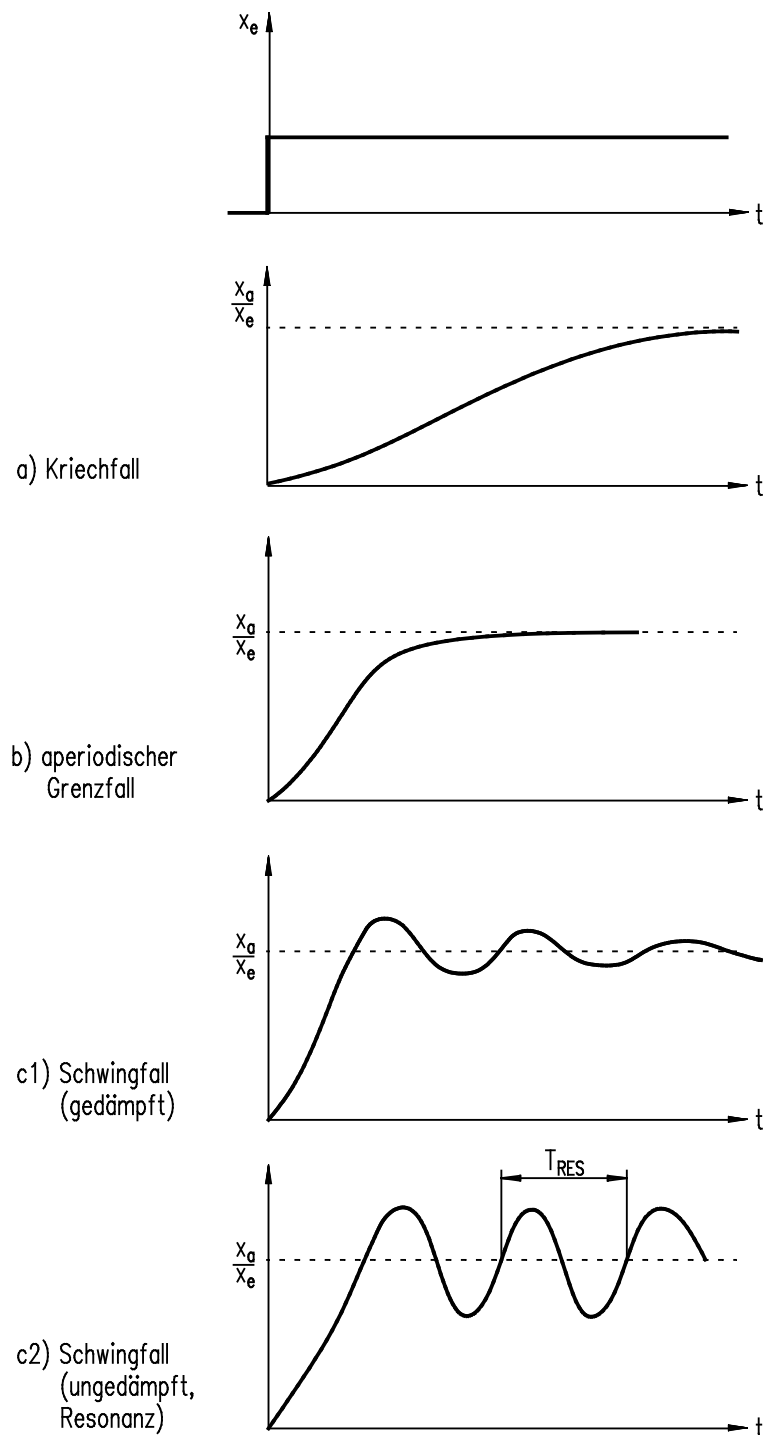


Abbildung 31 Sprungantworten eines VZ 2-Gliedes mit verschiedenartigen Speichern

Der in Abbildung 31b dargestellte Verlauf ähnelt dem eines VZ 2-Gliedes mit gleichen Energiespeichern. Es sind gerade noch keine Schwingbewegungen erkennbar.

Dieser Sonderfall wird als **aperiodischer Grenzfall** bezeichnet.

Eine näherungsweise Beschreibung kann wieder über die Ersatzsprungantwort vorgenommen werden. Aus der Verzugs- und Ausgleichszeit, die aus der Sprungantwort ermittelt werden, kann jedoch nicht auf die Größe und die Art der beteiligten Energiespeicher zurückgeschlossen werden. Insbesondere lassen sich VZ 2-Glieder mit gleichen Speichern und solche mit verschiedenen Energiespeichern, deren Sprungantwort die aperiodische Form aufweist, nicht eindeutig unterscheiden.

### VZ 2-Glieder mit schwingendem Verhalten werden in drei Gruppen unterteilt:

#### Fall 1 VZ 2-Glieder mit gedämpftem Schwingverhalten (Abbildung 31 c1)

Verzögerungsglieder dieser Gruppe weisen Verluste auf, sodass die Energie, die zwischen den Speichern hin und her transportiert wird, kontinuierlich abnimmt. Bei VZ 2-Gliedern mit gedämpftem Schwingverhalten ist nicht ausgeschlossen, dass Energie nachgeliefert wird, diese reicht jedoch zum Ausgleich der Verluste nicht aus.

#### Fall 2 VZ 2-Glieder mit konstantem Schwingverhalten (Abbildung 31 c2)

Dieser Fall ist als Grenzfall zwischen gedämpften und aufschwingendem Schwingverhalten anzusehen. Ohne Energiezufuhr von außen würde dies bedeuten, dass der Energieaustausch zwischen den Speichern verlustfrei abläuft. In der Praxis trifft dies meist nicht zu. Konstantes Schwingverhalten kann jedoch auch auftreten, wenn die Energiezufuhr genau die auftretenden Verluste ausgleicht.

#### Fall 3 VZ 2-Glieder mit aufschwingendem Verhalten

Bei diesen Gliedern ist notwendigerweise die Energiezufuhr größer als die auftretenden Verluste. Die Amplitude der Schwingung nimmt zu, wenn Energie weiter zugeführt wird. Dies geschieht solange, bis die Schwingung durch konstruktive Einflüsse begrenzt wird.

### Dämpfung bei Verzögerungsgliedern 2. Ordnung

Die verschiedenen Verhaltensweisen von VZ 2-Gliedern lassen sich auch durch einen Dämpfungsfaktor  $D$  charakterisieren. Folgende Fälle werden unterschieden:

- $D > 1$  (aperiodischer Fall/Kriechfall)
- $D = 1$  (aperiodischer Grenzfall)
- $1 > D > 0$  (gedämpfte Schwingung)
- $D = 0$  (ungedämpfte Schwingung)
- $D < 0$  (aufschaukelnder Schwingfall);  
Während alle anderen Fälle als **stabile** Verzögerungsglieder bezeichnet werden, wird dieser Fall als **instabil** bezeichnet.

Neben den  $PT_2$ -Gliedern mit aperiodischem Verhalten kommen auch  $PT_2$ -Glieder mit gedämpftem Schwingverhalten in der Praxis häufiger vor.

Je größer der Dämpfungsfaktor  $D$  wird, desto flacher verläuft der Anstieg der Sprungantwort. Mit Werten von  $D > 1$  liegt aperiodischer Fall vor. Für einen Dämpfungsfaktor  $D < 1$  tritt schwingendes Verhalten auf. Aus der Sprungantwort lassen sich einige charakteristische Größen ermitteln. Die Zeit bis zum Erreichen des Amplitudenverhältnisses  $x_a / x_e = K$  wird als Anregelzeit  $t_{an}$  bezeichnet. Je kleiner der Dämpfungsfaktor  $D$  wird, umso kleiner wird auch die Anregelzeit.

Eine weitere wichtige Größe ist das Überschwingen. Die Überschwingungsweite  $x_m$  ist der Abstand des ersten Maximum der Sprungantwort von der Linie  $x_a / x_e = K$ . Für das Überschwingen gilt, dass die Überschwingungsweite  $x_m$  umso größer wird, je kleiner der

Dämpfungsfaktor  $D$  wird. Die rechnerischen Zusammenhänge zwischen den Größen  $D$ ,  $x_m$ ,  $t_{an}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  sind sehr komplex und lassen sich nicht in einfacher Weise darstellen.

Bei der Darstellung von Übertragungsgliedern in Blockform kommt es darauf an, nichtschwingendes und schwingendes Verhalten zu unterscheiden. Dies erfolgt durch Eintragung der charakteristischen Sprungantworten in die Blöcke (Abbildung 32).

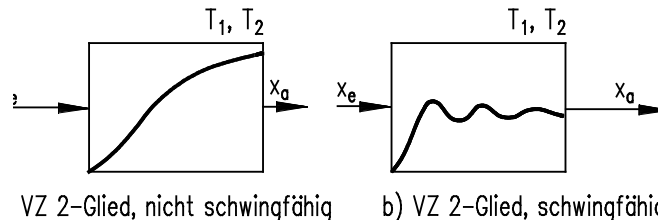


Abbildung 32 Blockdarstellung von VZ 2-Gliedern

### Verzögerungsglieder höherer Ordnung

Verzögerungsglieder mit mehreren Energiespeichern werden entsprechend als Verzögerungsglieder höherer Ordnung bezeichnet. Die Anzahl der Speicher bestimmt die Ordnungsziffer.

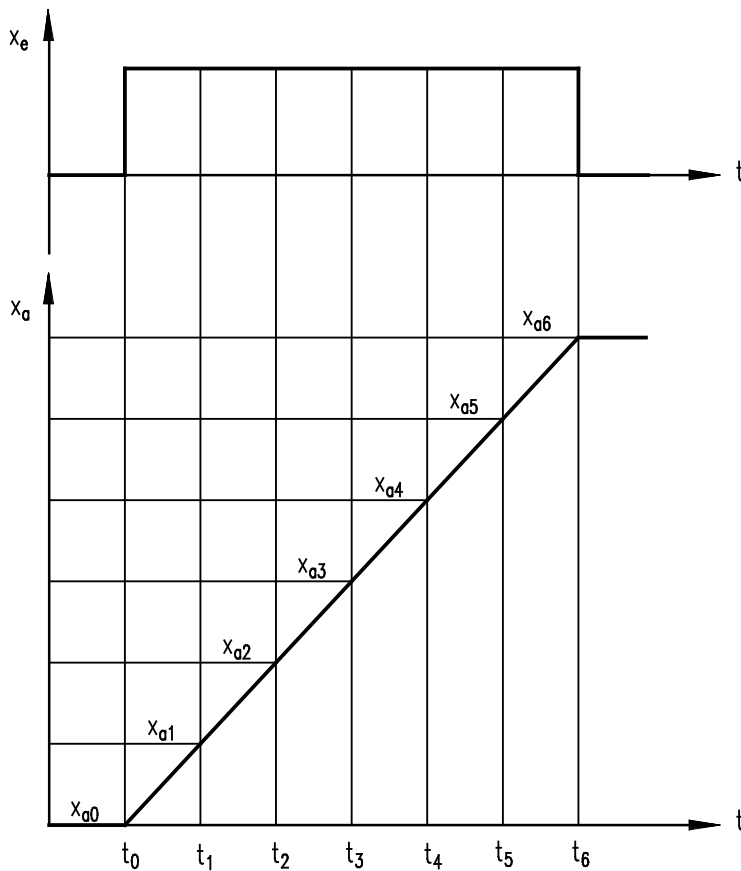
Für VZ  $n$ -Glieder ohne Schwingungsanteil lassen sich als charakteristische Größen wie bei den VZ 2-Gliedern  $T_u$  (Verzugszeit = Ersatztotzeit) und  $T_g$  (Ausgleichszeit = Ersatzzeitkonstante) ermitteln. Mit den ermittelten Werten  $T_u$  und  $T_g$  lassen sich  $PT_n$ -Glieder wieder näherungsweise durch ein Totzeitglied mit der Totzeit  $T_u$  und ein  $PT_1$ -Glieder mit der Zeitkonstanten  $T_g$  darstellen.

Das Verhältnis  $T_u / T_g$ , das in den Sprungantworten ermittelt wird, bestimmt nicht nur die Größe einer Ersatzsprungantwort mit näherungsweise Verlauf, sondern ist weiterhin eine Kenngröße, die auch eine Aussage über die Regelbarkeit eines Übertragungssystems ermöglicht.

Alle Aussagen zu den Verzögerungsgliedern höherer Ordnung gelten für Systeme mit gleichen Energiespeichern. Das Verhalten von Verzögerungsgliedern höherer Ordnung mit verschiedenen Energiespeichern lässt sich nicht in einfacher Form darstellen. Prinzipiell ähnelt das Verhalten jedoch dem Verhalten von Verzögerungsgliedern 2. Ordnung mit verschiedenen Energiespeichern. Es können daher auch bei Verzögerungsgliedern höherer Ordnung sowohl Kriechfälle ohne Überspringen als auch die entsprechenden Schwingfälle auftreten.

#### 1.3.3 I-Verhalten

Der Begriff Integration bzw. Integral beruht auf den entsprechenden mathematischen Zusammenhängen. Der jeweils erreichte Wert  $x$  der Ausgangsgröße  $x_a$  ist ein Maß für die Fläche unter der Kurve des Eingangssignals. Abbildung 33 veranschaulicht den Zusammenhang. Die Ermittlung des Integrierbeiwertes  $K_i$  erfolgt aus der Sprungantwort.

Abbildung 33 Darstellung der Integration eines Eingangssignals  $x_e$ 

Bei einem I-Glied ist die Übergangsfunktion eine linear mit der Zeit ansteigende Gerade. Bei einer konstanten Eingangsgröße steigt die Ausgangsgröße mit konstanter Geschwindigkeit an. Je größer das Eingangssignal, desto größer ist auch die Änderungsgeschwindigkeit des Ausgangssignals.

Mathematisch stellt dies einen Integrationsvorgang dar, deshalb wird das Integrierglied auch als I-Glied bezeichnet. Die Ausgangsgröße  $x_a$  hängt von der Größe der Eingangsgröße  $x_e$  aber auch von der Zeit  $t$  ab, für die die Eingangsgröße  $x_e$  an dem Integrierglied anliegt. Hinzu kommt ein Integrier-Beiwert  $K_I$ , dessen Index wieder auf den Zusammenhang mit dem I-Glied hinweist.

In Abbildung 34 ist die Sprungantwort vereinfacht dargestellt, sodass die Eingangsgröße  $x_e$  und die Ausgangsgröße  $x_a$  zu Beginn den Wert Null aufweisen. Dann lässt sich der Zusammenhang von Ausgangs- und Eingangsgröße rechnerisch sehr einfach als

$$x_a = K_I \cdot x_e \cdot t$$

$x_a$  : Ausgangsgröße

$x_e$  : Eingangsgröße

$K_I$  : Integrierbeiwert des I-Gliedes

$t$  : Zeit seit der sprunghaften Veränderung der Eingangsgröße

darstellen.

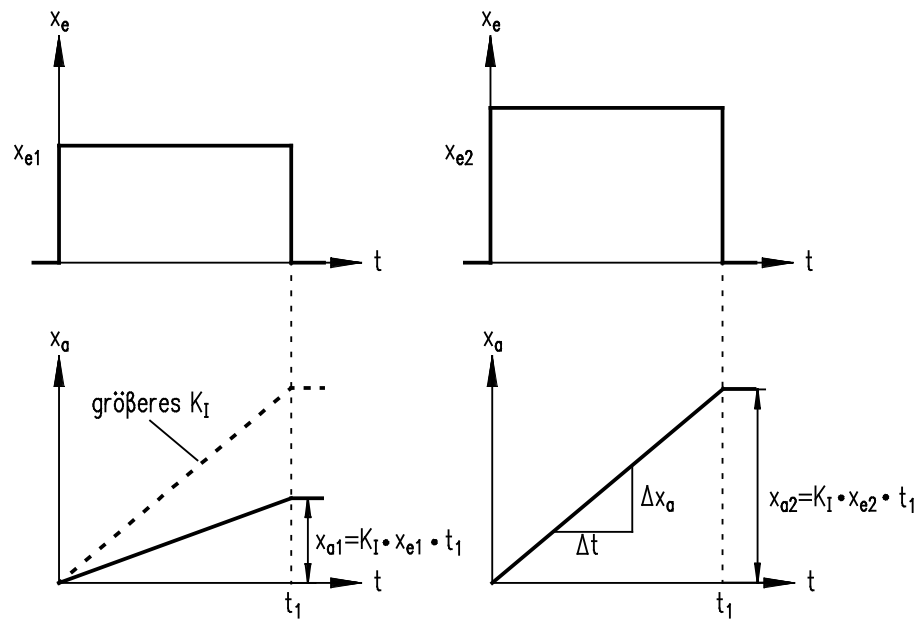


Abbildung 34 Sprungantwort des Integriergliedes

Anschaulich zeigt den Vorgang des Aufsummierens bei positiver Eingangsgröße, des Haltens bei einer Eingangsgröße gleich Null und der Subtraktion bei negativer Eingangsgröße Abbildung 35.

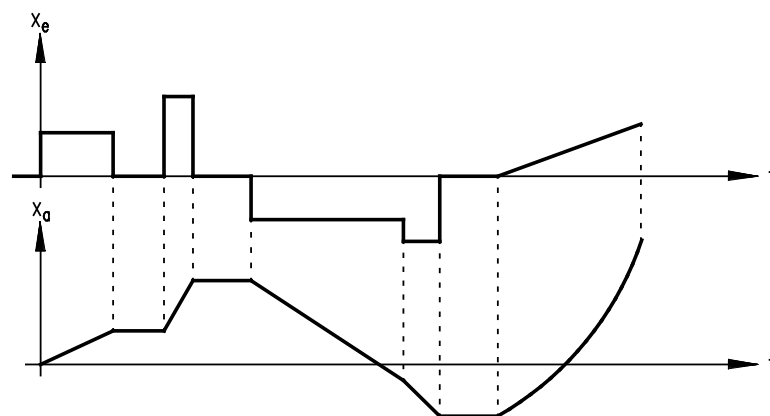


Abbildung 35 Verlauf der Ausgangsgröße in Abhängigkeit der Sprungantwort beim I-Glied

Aus dem dargestellten Verlauf lässt sich auch erkennen, dass bei Beginn einer Integration bereits ein Anfangswert der Ausgangsgröße vorliegen darf. Ändert sich die Eingangsgröße  $x_e$  jedoch als Funktion der Zeit, lässt sich der Verlauf nur mit höherer Mathematik berechnen. Es ist auch möglich, den Verlauf grafisch zu konstruieren.

Die Blockdarstellung wird wieder aus dem Verhalten bei einer Sprungtestfunktion abgeleitet (Abbildung 36).

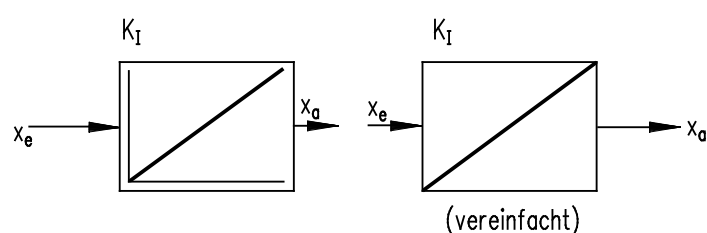


Abbildung 36 Blockdarstellung des I-Gliedes

Charakteristisch für alle I-Glieder ist, dass sich bei anstehendem Eingangssignal kein neuer Beharrungszustand (Stillstand des Ausgangssignals) einstellen wird. Um nachteilige Folgen zu vermeiden, muss deshalb das Eingangssignal rechtzeitig zurückgenommen werden.

Wird in Abbildung 37, ausgehend vom Beharrungszustand, bei dem die zulaufende Wassermenge der ablaufenden Menge entspricht und die Wasserhöhe dabei konstant bleibt, die zulaufende Menge (Eingangsgröße  $x_e$ ) sprunghaft erhöht, so steigt der Füllstand (Ausgangsgröße  $x_a$ ) mit konstanter Geschwindigkeit an.

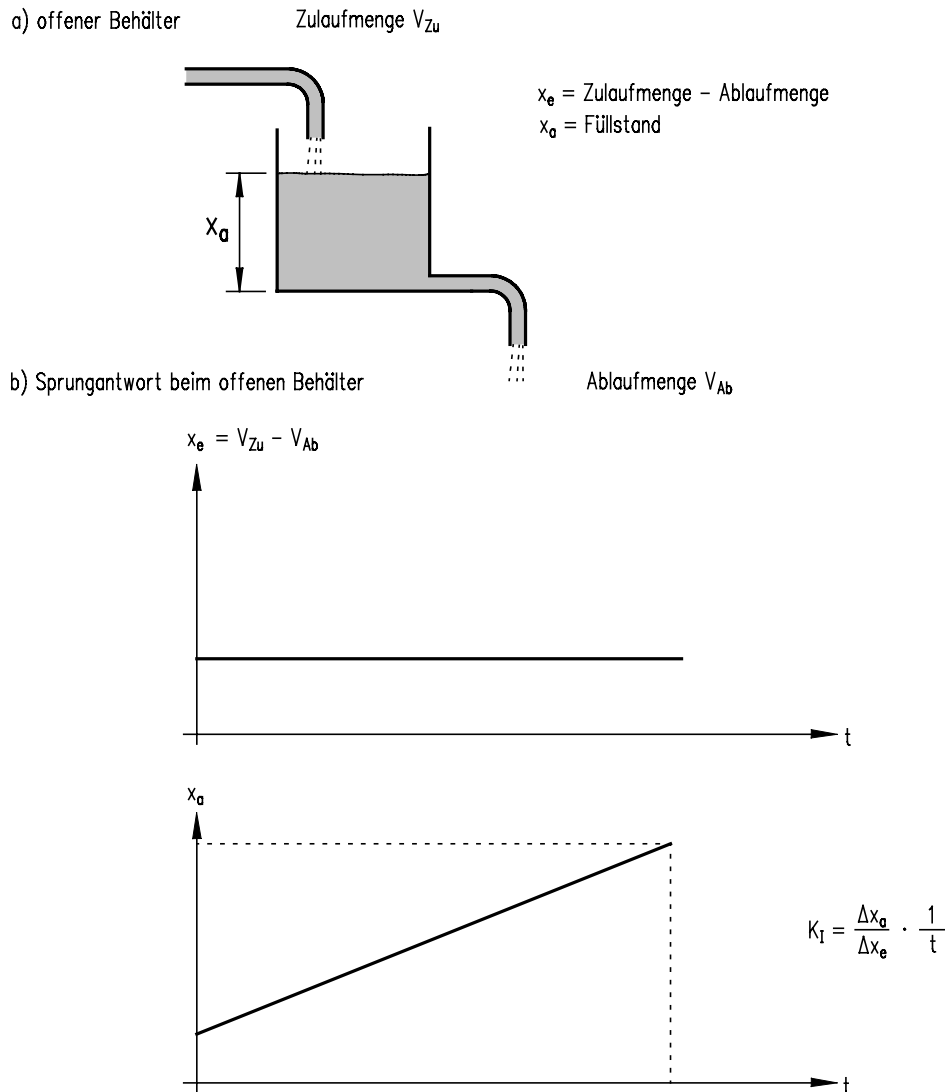


Abbildung 37 Wasserbehälter als I-Glied

Eingangsgröße ist die Differenz zwischen Zulaufmenge und Ablaufmenge. Ausgangsgröße ist der Füllstand. Der  $K_I$ -Wert wird durch den Behälterquerschnitt bestimmt. Je kleiner der Querschnitt ( $K_I$  groß), desto schneller ändert sich der Füllstand. Sind Zulauf- und Ablaufmenge gleich groß, also die Eingangsgröße gleich Null, so bleibt der Füllstand auf konstantem Niveau. Überwiegt die Zulaufmenge um einen konstanten Wert, so wird der Füllstand linear ansteigen bis der Behälter überläuft. Es wird die konstruktive Grenze erreicht. Überwiegt jedoch die Ablaufmenge, so sinkt der Füllstand des Behälters, bis er schließlich leer ist. Die Änderungsgeschwindigkeit von  $x_a$  hängt dabei von der Größe  $x_e$  ab. Der erreichte Wert von  $x_a$  hängt zusätzlich davon ab, wie lange die Eingangsgröße ungleich Null ist.

$$x_a = K_I \cdot x_e \cdot t$$

$$K_I = \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e} \cdot \frac{1}{t} \quad K_I = \text{Integrierbeiwert (= Steigung der Übergangsfunktion)}$$

### 1.3.4 DT<sub>1</sub>-Verhalten

Übertragungsglieder, deren Ausgangsgröße der zeitlichen Änderung der Eingangsgröße proportional ist, heißen Differenzier-Glieder. Kurz ist auch die Bezeichnung D-Glied üblich.

Für die Ausgangsgröße gilt also:

$$x_a = K_D \cdot \frac{\Delta x_e}{\Delta t} \quad K_D = \text{Differenzierbeiwert}$$

Bei D-Gliedern ist die Ausgangsgröße von der Änderungsgeschwindigkeit der Eingangsgröße abhängig. Ändert sich das Eingangssignal mit konstanter Geschwindigkeit, so ist auch die Ausgangsgröße konstant. Es besteht mathematisch ein proportionaler Zusammenhang, z.B. bei Verdopplung der Änderungsgeschwindigkeit des Eingangssignal verdoppelt sich die Ausgangsgröße.

Die messtechnische Untersuchung eines reinen D-Gliedes ist nicht möglich, weil es wegen der Trägheit der physikalischen Systeme nur in angenäherter Form existiert. In mit anderen Übertragungsgliedern zusammengesetzter Form hat das D-Glied jedoch größere Bedeutung.

Die Sprungantwort des reinen D-Gliedes ist ein Nadelimpuls, d.h. die Amplitude ist sehr groß und die Impulsdauer ist sehr klein (Abbildung 38).

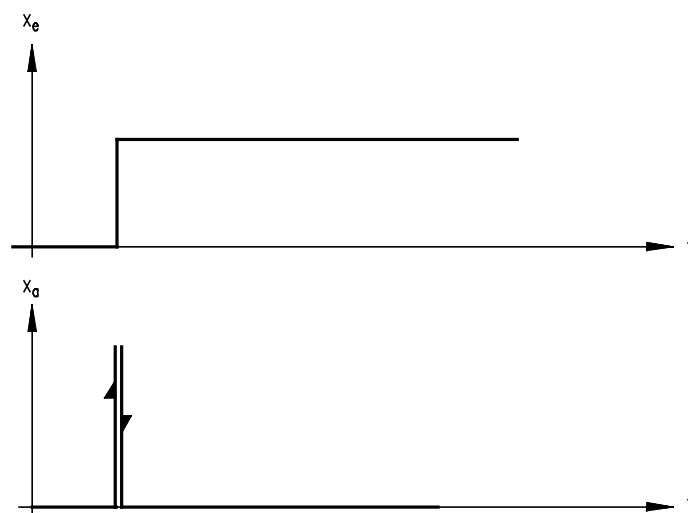


Abbildung 38 Sprungantwort des reinen D-Gliedes

Je größer und schneller (steiler) also der Eingangsgrößen-Sprung wird, umso größer wird auch die Amplitude des Ausgangsgrößen-Nadelimpulses. Wegen der nur kurzfristigen Änderung des Eingangssignals muss das Ausgangssignal kurzfristig auch seinen ursprünglichen Wert wieder annehmen.

Im Blockschaltbild wird das Differenzier-Glied durch seine Sprungantwort charakterisiert (Abbildung 39).



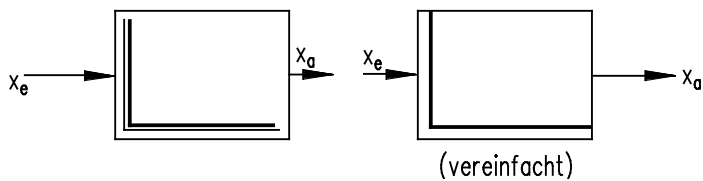


Abbildung 39 Blockschaltbild des Differenzier-Gliedes

Ein nachgeschaltetes Verzögerungsglied 1. Ordnung wird hinzugenommen, da sich in der Praxis Verzögerungen nie vollständig vermeiden lassen. Das  $DT_1$ -Glied besteht aus einer Reihenschaltung eines Differenzier-Gliedes und eines Verzögerungsgliedes. Abbildung 40 zeigt die Blockdarstellung.

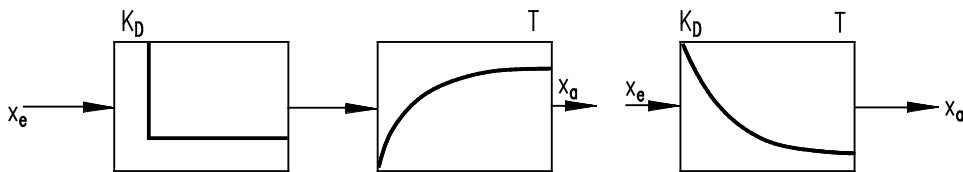


Abbildung 40  $DT_1$ -Glied Blockdarstellung

Die Sprungantworten für D-,  $T_1$ -,  $DT_1$ -Glied sind in Abbildung 41 dargestellt.

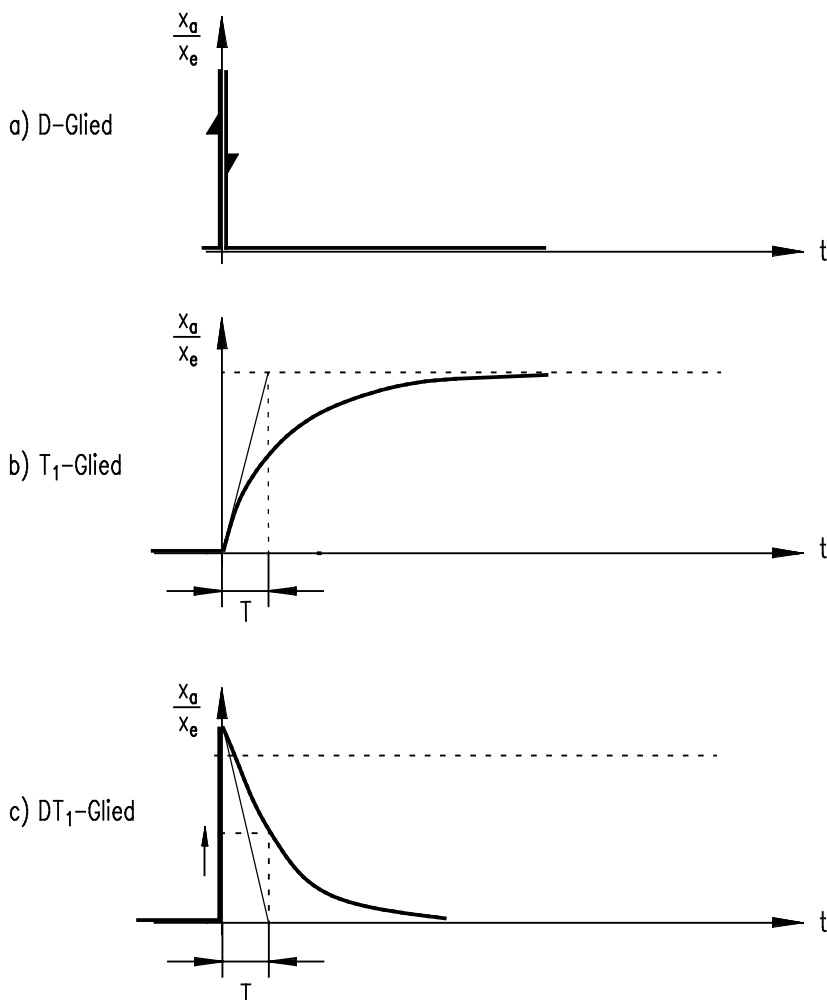


Abbildung 41 Bezogene Sprungantworten für D-,  $T_1$ - und  $DT_1$ -Glied

Da beide Sprungantworten zeitabhängig sind, lässt sich der Verlauf nicht einfach berechnen. Die mathematischen Beschreibungen werden daher nur angegeben:

$$\frac{x_a}{x_e} = K_D \cdot \delta(t) \quad \text{Sprungantwort des D-Gliedes}$$

$$\frac{x_a}{x_e} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{Sprungantwort des } T_1\text{-Gliedes}$$

$$\frac{x_a}{x_e} = K_D \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{Sprungantwort des } DT_1\text{-Gliedes}$$

Die Sprungantwort enthält die Bezeichnung  $\delta(t)$ . Sie ist eine Kurzschreibweise für den Sachverhalt, dass ein D-Glied bei einem Sprung des Eingangssignals mit einem unendlich hohen und unendlich kurzen Nadelimpuls antwortet. In der Praxis kommen reine D-Glieder nicht vor. Sie sind immer mit einem mehr oder weniger großen T-Anteil verknüpft, sodass das  $DT_1$ -Glied trotz seiner Interpretation als Kettenschaltung eine Grundfunktion darstellt.

### 1.3.5 $T_t$ -Verhalten

Erscheint bei einem Übertragungsglied die Eingangsgröße erst nach Ablauf einer bestimmten Zeit originalgetreu am Ausgang, so wird ein solches Übertragungsglied als Totzeit-Glied bezeichnet. Ein anschauliches Beispiel ist das mechanische Förderband zum Transport von Schüttgütern (Abbildung 42).

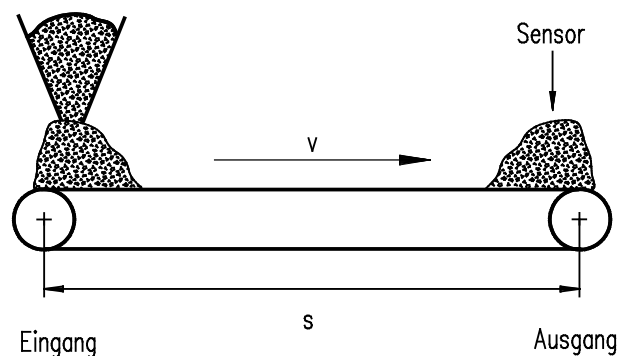


Abbildung 42 Förderband als Totzeit-Glied

Bei dem Förderband wird eine zusätzlich aufgebrauchte Schüttgutmenge von dem am Ende angebrachten Sensor erst erkannt, nachdem sie den Weg  $s$  zurückgelegt hat. Die Totzeit ergibt sich einfach aus dem Weg  $s$  und der Transportgeschwindigkeit  $v$ .

$$T_t = \frac{s}{v} = \frac{\text{zurückgelegter Weg}}{\text{Transportgeschwindigkeit}}$$

Ähnliche Verhältnisse treten stets auf, wenn Eingriffsstellen und Erfassungsstellen räumlich getrennt sind und der Energie- oder Massentransport eine mehr oder weniger endlich große Zeit in Anspruch nimmt. Totzeiten sind unerwünschte Eigenschaften, weil nachgeschaltete Einrichtungen erst verspätet auf die Störung reagieren können. Oft lassen sie sich konstruktiv nicht vermeiden. Es kommt dann darauf an, dass die Totzeit klein gegenüber der Reaktionszeit des Systems gehalten wird.

Zur Untersuchung werden Sprungtestfunktionen verwendet. Abbildung 43 zeigt eine Sprungantwort.

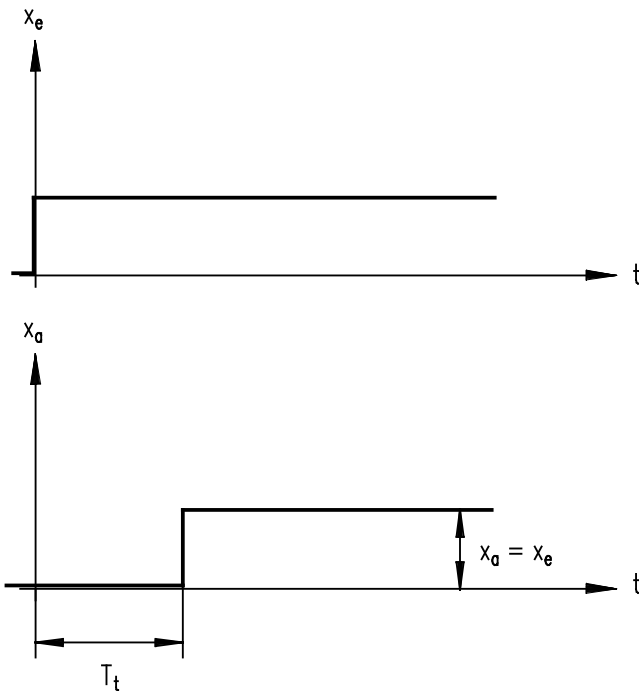


Abbildung 43 Sprungantwort des Totzeit-Gliedes

Für das Totzeit-Glied gilt:

$$\frac{x_a}{x_e} = 0 \quad \text{bei} \quad t < T_t$$

$$\frac{x_a}{x_e} = 1 \quad \text{bei} \quad t > T_t$$

Beim Totzeit-Glied tritt kein Proportionalitäts-Beiwert auf. Abbildung 44 zeigt die Darstellung eines Totzeit-Gliedes als Blockdarstellung.

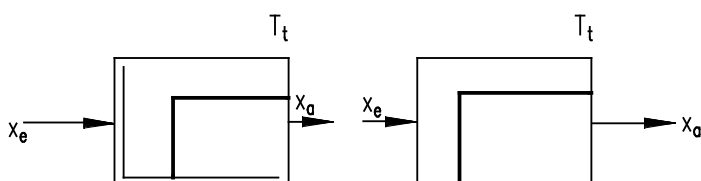


Abbildung 44 Blockdarstellung des Totzeit-Gliedes

**Aufgaben**

Aufgabe 1

Beschreiben Sie den grundsätzlichen Unterschied zwischen einer Steuerung und einer Regeleinrichtung mithilfe von Blockschaltbildern!

Aufgabe 2

Am Beispiel einer Raumheizung (Abbildung 45) soll das zugehörige Blockschaltbild mit den zugehörigen Größen entwickelt werden.

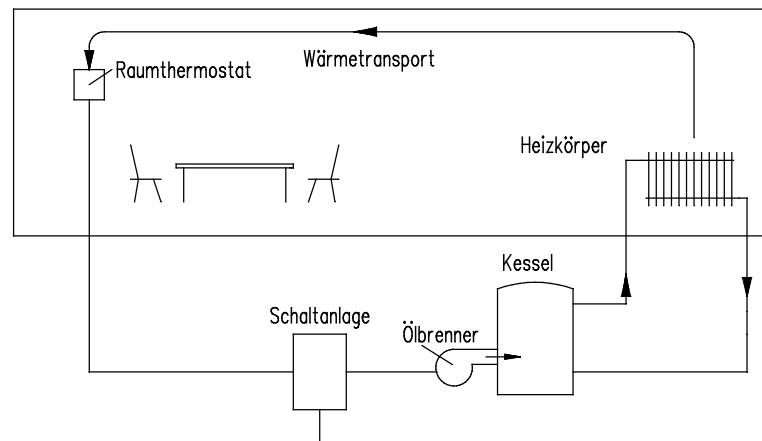


Abbildung 45 Raumheizung

Aufgabe 3

Die Sprungantwort eines  $PT_1$ -Übertragungsgliedes soll skizziert werden. In welcher Weise ändert sich qualitativ die Sprungantwort, wenn die Zeitkonstante  $T_1$  größer gemacht wird?

Aufgabe 4

Welche Sprungantwort liefert das in Abbildung 46 dargestellte Feder-Masse-System? Es soll die Sprungantwort zeichnerisch dargestellt werden. Um welches Übertragungsglied handelt es sich?

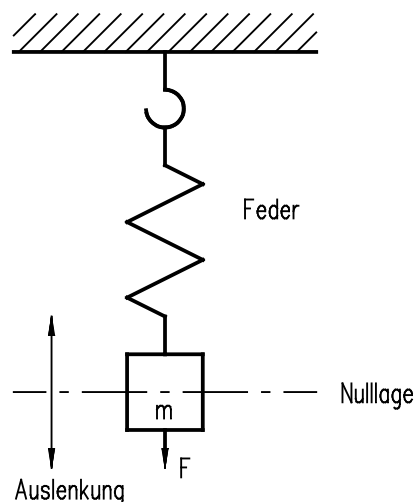


Abbildung 46 Feder-Masse-System

## 2 Regelkreise

Angestrebtes Ziel der Regelungstechnik ist die Realisierung eines **stabilen** Regelkreises. Liegt eine Aufgabenstellung vor, die z.B. wegen auftretender Störungen nicht mit einer Steuerkette (Steuerung) gelöst werden kann, so muss eine Rückkopplungsstruktur (Regelung) angewendet werden. Die Hauptelemente des Regelkreises sind Regelstrecke und Regeleinrichtung (Regler). Die Regelstrecke wird häufig bereits vorgegeben sein, dann muss die Regeleinrichtung aufgabengemäß ausgewählt und eingestellt werden.

Beim Entwurf von Regelkreisen sollte jedoch möglichst ein interaktives Vorgehen angestrebt werden. Die Gesichtspunkte der Reglerauswahl sollten mit in die Konzipierung der Strecke einfließen. Dabei ist allen Baugruppen des Regelkreises - wie Strecke, Messwerterfassung, Messwertübertragung, Regler, Stelleinrichtung - und insbesondere deren **Zeitverhalten**, Aufmerksamkeit zu schenken.

Zusätzlich sind weitere Gesichtspunkte wie Sicherheit, Störanfälligkeit, Ex-Schutz, Preis und Service zu berücksichtigen. Bei der Zusammenschaltung von Strecke und Regler in einer Kreisstruktur werden die bekannten Reaktionen, wie z.B. die Sprungantwort der Einzelglieder, nur noch andeutungsweise zu beobachten sein. Infolge der Gegenkopplung über den Regler wirken die Glieder jetzt mehr oder weniger schnell auf sich selbst zurück. Das Verhalten der Einzelglieder ist nicht mehr unabhängig voneinander zu betrachten.

Ein eingeschwungener Regelkreis ohne Störeinträge befindet sich im Ruhezustand. Diese Ruhe ist jedoch ein Zustand der angespannten Erwartung: Was wird gleich passieren? Sobald irgend etwas auf den Kreis einwirkt, versucht dieser, sich anzupassen oder den ursprünglichen Zustand wiederherzustellen. Wie dies geschieht, hängt von den Eigenschaften aller im Regelkreis wirksamen Übertragungsglieder ab.

### Regelkreise mit stetigen Reglern

Eine stetige Regelung ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Regelkreisglieder stetiges Verhalten zeigen, also kein Regelkreisglied - auch nicht das Stellglied - schaltendes Verhalten hat. Im stetigen Regelkreis gehört daher zu einer Regelgröße  $x$  während eines beliebigen Zeitpunktes  $t$  eine **analoge** Stellgröße  $y$ . Die Stellgröße  $y$  liegt irgendwo im Stellbereich. Eine kontinuierliche Veränderung der Regelgröße  $x$  führt auch zu einer kontinuierlichen Veränderung der Stellgröße  $y$ .

### Führungs- und Störverhalten

In Abbildung 47 ist die Grundform eines geschlossenen Regelkreises dargestellt.

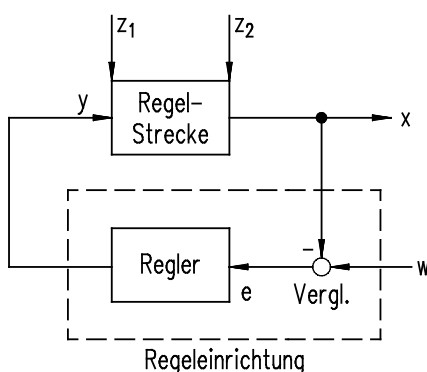


Abbildung 47 Regelkreis

## Lernbereich

Ein sich im Gleichgewicht befindlicher oder eingeschwungener Regelkreis kann durch zwei verschiedene Ereignisse aus dem Gleichgewicht gebracht werden (Abbildung 48):

- Änderung der Führungsgröße (Sollwert)  $w$
- Einwirkung von Störungen  $z_1$  bis  $z_n$  im Kreis (vorwiegend in der Strecke)

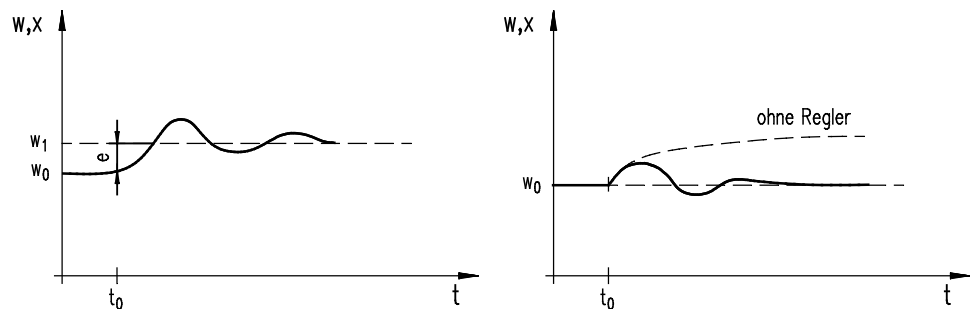


Abbildung 48 a) Änderung der Führungsgröße von  $w_0$  auf  $w_1$  (Führungsgrößensprung)

b) Störgrößensprung mit vorübergehenden Regeldifferenzen  $e$

Die Auswirkungen auf den Regelkreis sind unterschiedlich. Dabei ist der Führungsgrößensprung stets die schwierigste Bedingung für den Regelkreis, da der Sprung unmittelbar auf die Regeleinrichtung einwirkt.

Der Störgrößensprung dagegen wirkt je nach Angriffsort der Störung weniger gravierend, da er meist noch Übertragungsglieder oder Teile davon durchlaufen muss. Demgemäß wird beim Regelkreis zwischen Führungs- und Störverhalten unterschieden.

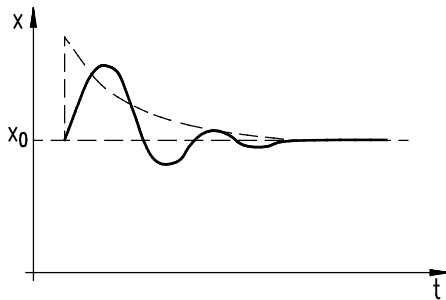
Die Regler-Einstellungen sind folglich auch entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall bzw. der Aufgabenstellung unterschiedlich auf **Führungsverhalten** oder **Störverhalten** vorzunehmen.

### Stabilität

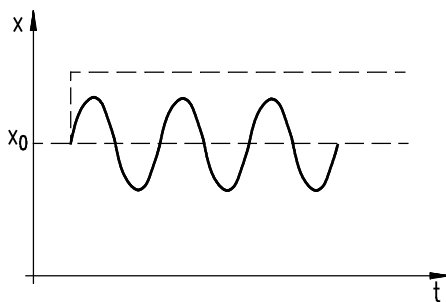
Die wichtigste Forderung an einen Regelkreis ist die, dass er unter allen Betriebsbedingungen stabil sein muss. Dabei gelten folgende Festlegungen:

- **Stabiler Kreis:** Nach einer Änderung oder Störung erreicht der Kreis selbsttätig wieder einen Beharrungszustand (kriechend oder gedämpft schwingend).
- **Stabilitätsgrenze:** Der Kreis schwingt mit konstanter Amplitude auf seiner Eigenfrequenz oder zeigt eine Regeldifferenz, die gleich der Änderung bzw. Störung ist.
- **Instabiler Kreis:** Der Kreis zeigt aufklingende Schwingungen oder die Regelgröße läuft unkontrolliert über die erlaubten Grenzen hinweg.

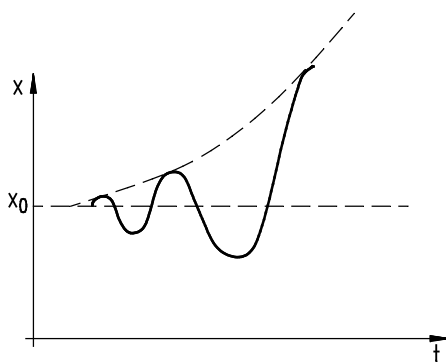
In der folgenden Abbildung 49 ist dies grafisch dargestellt.



a) stabiles Verhalten



b) Stabilitätsgrenze



c) instabiles Verhalten

Abbildung 49 Regelkreisverhalten

Zur Untersuchung und Festlegung der Stabilitätsbedingungen sind eine Vielzahl von mathematischen und grafischen Verfahren entwickelt worden. Sie setzen aber Kenntnisse der höheren Mathematik voraus und werden daher hier nicht im einzelnen abgehandelt.

Von besonderer Bedeutung für die Beschreibung bzw. Charakterisierung von Regelkreisen ist das zeitliche oder dynamische Verhalten. Es beschreibt das Übergangsverhalten zwischen zwei statischen Zuständen. Hauptsächlich interessiert das Zeitverhalten bei auftretenden Störungen oder Änderungen der Führungsgröße.

In der Praxis treten Strecken mit  $PT_n$ -Verhalten, etwa  $PT_2$  oder  $PT_3$ , häufig auf. Abbildung 50 zeigt, welche Regelergebnisse bei sprungförmiger Änderung der Führungsgröße mit verschiedenen Reglertypen an solchen Strecken zu erzielen sind.

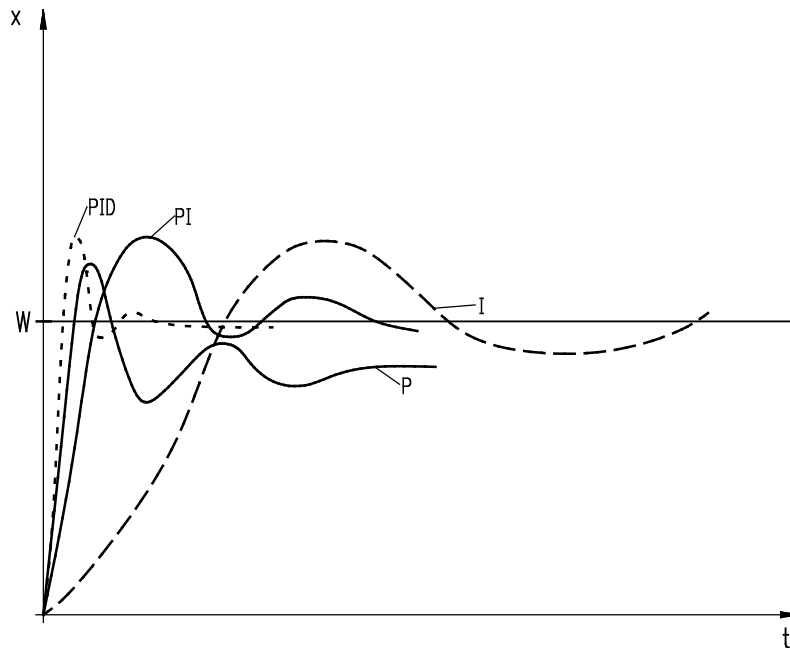


Abbildung 50 Führungs-Sprungverhalten von Regelkreisen mit  $PT_2$ -Strecken und unterschiedlichen Reglertypen

Aus diesen charakteristischen Kurvenverläufen für die Sprungantwort lässt sich das Verhalten der Strecke mit den unterschiedlichen Reglertypen gut erkennen:

- P:** Schnelles Anregeln, bleibende Regelabweichung.
- PD:** Sehr schnelles Anregeln, bleibende Regelabweichung jedoch kleiner als beim P-Regler, da  $V_{\text{Kreis}}$  höher eingestellt werden kann.
- I:** Sehr langsames An- und Ausregeln, keine bleibende Regelabweichung.
- PI:** Schnelles Anregeln, keine bleibende Regelabweichung.
- PID:** Sehr schnelles An- und Ausregeln, keine bleibende Regelabweichung.

P- und PD-Regler schwingen bei den gewählten Einstellungen am geringsten über die Führungsgröße  $w$  hinaus. Bezogen auf die jeweiligen Beharrungswerte sind die Überschwingweiten jedoch etwa vergleichbar groß.



Abbildung 51 zeigt zum Vergleich, welche Regelergebnisse bezüglich des Störverhaltens zu erreichen sind. Die angegebenen Kurvenverläufe dienen nur als grobe Übersicht. Im Einzelfall spielt noch das Verhältnis der Strecken-Zeitkonstanten ( $T_u/T_g$ ) eine wesentliche Rolle.

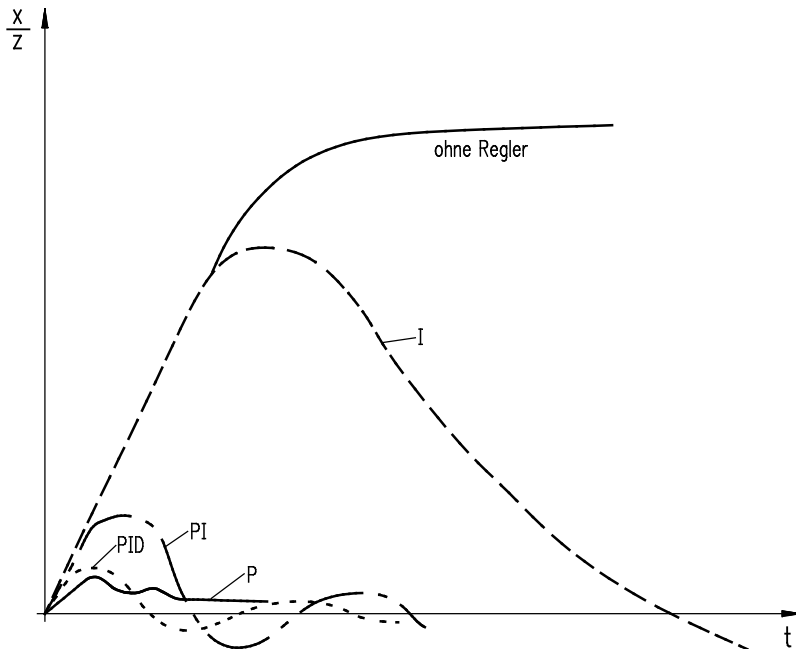


Abbildung 51 Stör-Sprungverhalten von Regelkreisen mit  $PT_2$ -Strecken und unterschiedlichen Reglertypen

Aus diesen charakteristischen Kurvenverläufen für die Sprungantwort lässt sich das Verhalten der Strecke mit unterschiedlichen Reglern bei Störung erkennen.

- P:** Sehr schnelles An- und Ausregeln, geringes Überschwingen, bleibende Regelabweichung.
- I:** Sehr langsames Ausregeln, extremes Überschwingen, keine bleibende Regelabweichung.
- PI:** Langsames Ausregeln, starkes Überschwingen, keine bleibende Regelabweichung.
- PID:** Schnelleres Ausregeln als mit PI-Regler, geringes Überschwingen, keine bleibende Regelabweichung.

## 2.1 P-Regler auf $PT_n$ -Strecken

### P-Regler mit $PT_0$ -Strecke

Die Betrachtung dieser Zusammenschaltung aus P-Strecke und P-Regler ist mehr theoretisch, denn in der Praxis sind Strecken immer mit kleinen Verzögerungen oder Totzeiten behaftet. Abbildung 52 zeigt das ideale Verhalten bei Störung am Eingang der Strecke. Wegen der vorhandenen Totzeiten arbeiten diese sehr schnellen Grundglieder in der Praxis unbefriedigend zusammen.

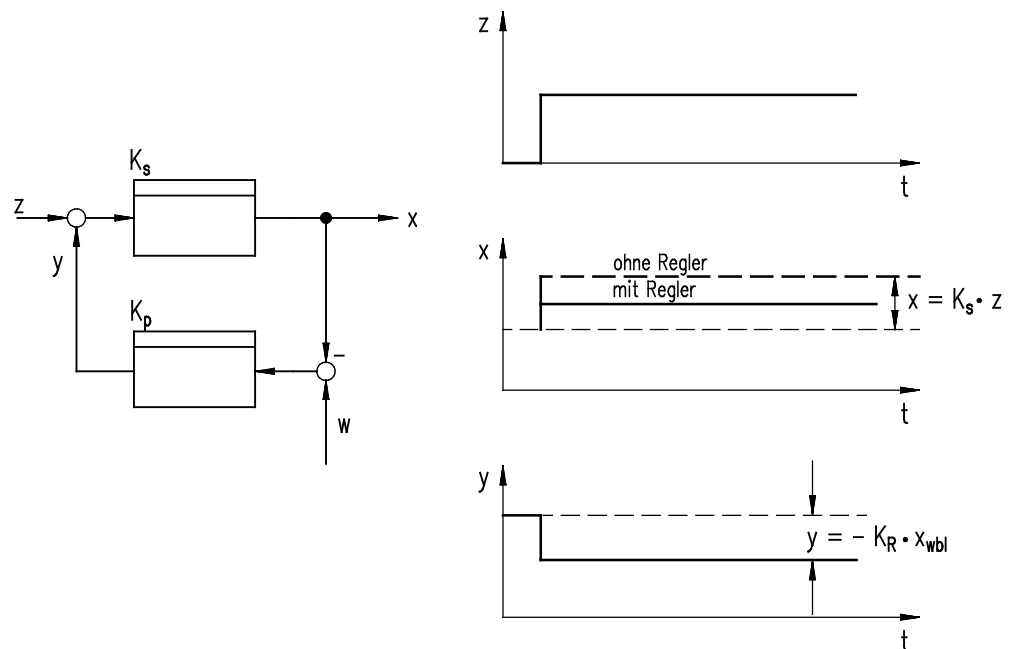


Abbildung 52 Stör-Sprungantwort eines Regelkreises mit P-Strecke und P-Regler

### P-Regler mit $PT_1$ -Strecke

Bei einem Regelkreis mit  $PT_1$ -Strecke und P-Regler bewirkt ein Störsprung am Eingang der Strecke eine Änderung der Regelgröße  $x$  gemäß einer e-Funktion. Entsprechend baut sich die Regeldifferenz  $e$  auf, die unverzüglich die Stellgröße unter Berücksichtigung von  $K_R$  ändert. Hierdurch ändert sich die Regelgröße  $x$  weniger stark. Nach einiger Zeit stellt sich ein Zustand ein, bei dem die bleibende Regeldifferenz  $e_{bl}$  die Stellgröße  $y$  so weit verstellt hat, dass abhängig von  $z$ ,  $K_S$  und  $K_R$  gerade  $e_{bl}$  erzeugt wird (Abbildung 53).

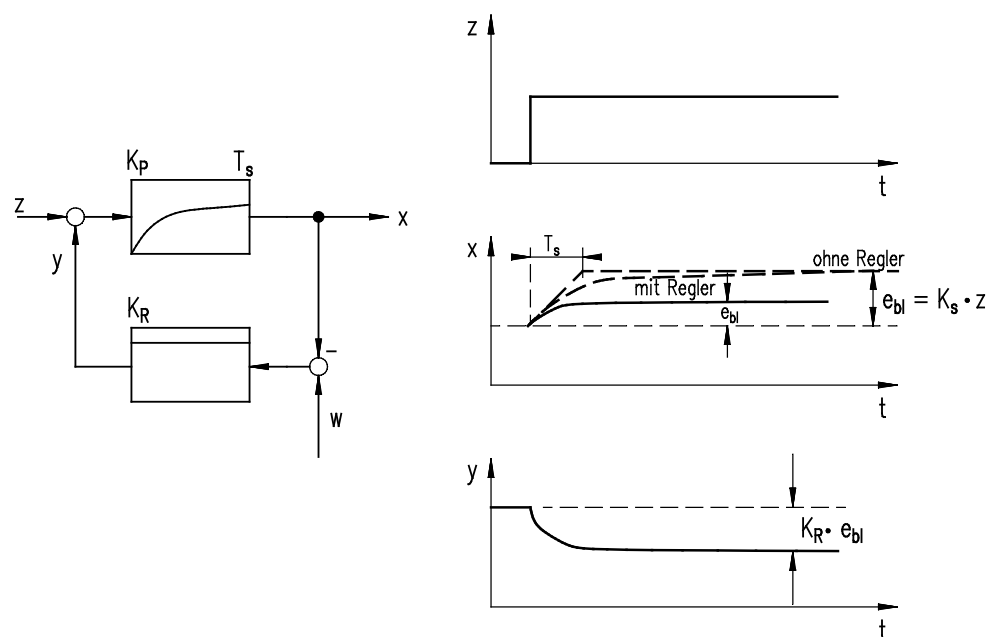


Abbildung 53 Stör-Sprungantwort eines Regelkreises mit  $PT_1$ -Strecke und P-Regler

Durch die Wirkung des P-Reglers wird zusätzlich zur Stör-Unterdrückung auch die Zeitkonstante  $T_S$  der Strecke im geschlossenen Kreis verkleinert. Der Regelkreis hat die Zeitkonstante:

$$T = \frac{T_S}{1 + v_{\text{Kreis}}} \quad T < T_S \text{ für } v_{\text{Kreis}} > 0$$

$$v_{\text{Kreis}} = K_S \cdot K_{\text{PR}} \quad v_{\text{Kreis}} \dots\dots \text{Verstärkung des offenen Kreises}$$

In der Praxis lassen sich auch beim P-Regler kleine Verzögerungen nicht vermeiden, die Überlegungen dieses Abschnittes gelten jedoch auch dann noch, wenn die Verzögerung im P-Regler sehr viel kleiner als die Verzögerung der Strecke ist.

### P-Regler mit $PT_n$ -Strecke

Die gezeigten Verläufe gelten näherungsweise für  $PT_2$ - und  $PT_3$ -Strecken, lassen sich aber auf Strecken mit mehr Energiespeichern prinzipiell übertragen.

Aus Abbildung 54 ist zu ersehen, dass mit größerer Regler-Verstärkung (bzw. kleinerem Proportionalbereich) die bleibende Regelabweichung kleiner und die Anregelzeit kürzer wird. Da aber mit größerer Regler-Verstärkung auch die Schwingneigung des Regelkreises zunimmt, muss ein Kompromiss zwischen Größe der bleibenden Regelabweichung und dem auftretenden Einschwingverhalten gefunden werden.

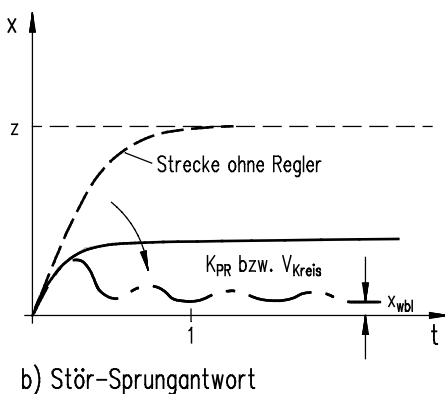
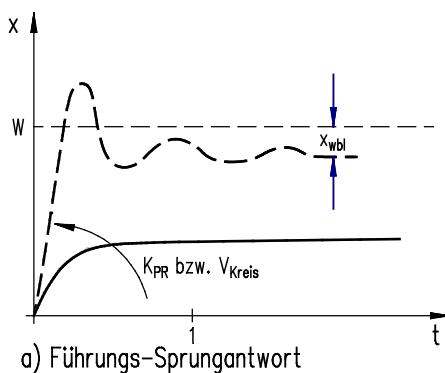


Abbildung 54 Führungs- und Störverhalten der  $PT_n$ -Strecke mit P-Regler

## 2.2 I-Regler auf $PT_n$ -Strecken

### I-Regler mit $PT_0$ -Strecke

Der I-Regler ist eine spezielle Anwendung eines I-Gliedes in einer Regeleinrichtung. Bei einem Regelkreis mit P-Strecke und I-Regler wirkt sich ein Störsprung am Eingang der Strecke wegen des P-Verhaltens zunächst voll, um  $K_S$  verstärkt, auf die Regelgröße  $x$  aus. Danach beginnt der I-Regler mit hoher Stellgeschwindigkeit die Stellgröße  $y$  zu ändern. Dadurch wird die Regelgröße  $x$  bzw. die Regeldifferenz  $e$  kleiner, was zu einer Verkleinerung der Stellgeschwindigkeit führt.

Dieser Vorgang setzt sich entsprechend fort. Die Störung wird langsam aber vollständig ausgeglet, und es tritt keine bleibende Regelabweichung auf. Da die Störung in dem betrachteten Fall nach dem Sprung konstant bleibt, stellt der I-Regler nach einiger Zeit eine neue Stellgröße ein, sodass die Regeldifferenz  $e$  gleich Null wird (Abbildung 55).

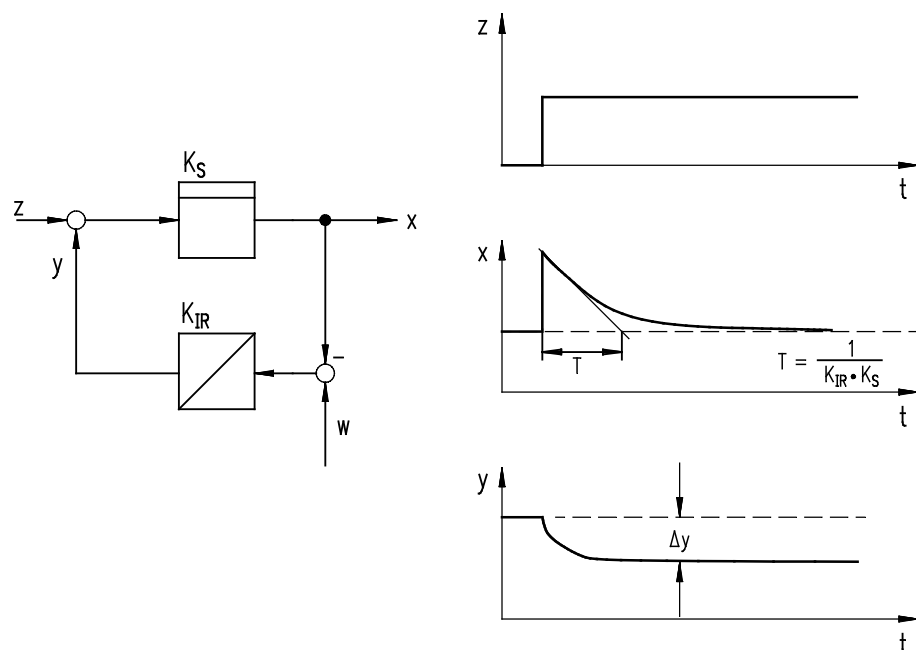


Abbildung 55 Stör-Sprungantwort eines Regelkreises mit P-Strecke und I-Regler

### I-Regler mit $PT_1$ -Strecke

Diese Regeleinrichtung ist gedämpft schwingfähig. Für die Berechnung des Dämpfungsgrades gilt die Beziehung:

$$D = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot K_S \cdot K_{IR}} \cdot \frac{1}{T_S}}$$

Ergibt sich bei Einsetzen der Werte für  $K_S$ ,  $K_{IR}$  und  $T_S$  ein Dämpfungsgrad  $D > 1$ , so zeigt die Regelgröße ein Überschwingen. Für Werte  $D < 1$  treten gedämpfte Schwingungen bei der Regelgröße auf.

### I-Regler mit $PT_n$ -Strecke

Der Regelkreis aus  $PT_n$ -Strecke und I-Regler reagiert sehr langsam, was zu langen An- und Ausregelzeiten führt. Das Überschwingen wird bei größeren  $K_{IR}$ -Werten immer stärker. Die Regelabweichungen werden dagegen völlig ausgeregelt, sodass im Beharrungszustand keine bleibende Regelabweichung auftritt (Abbildung 56).

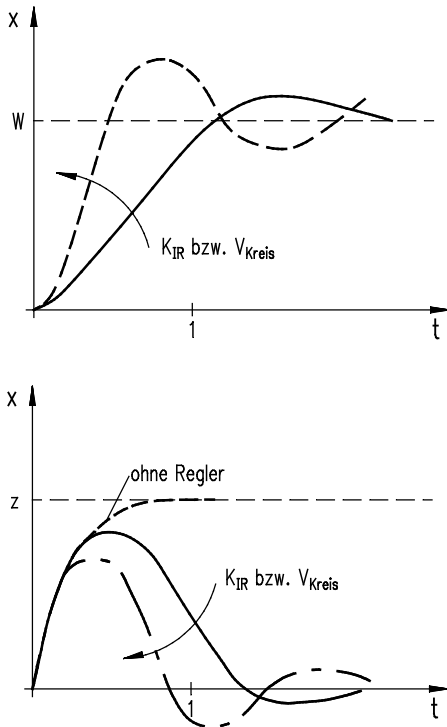


Abbildung 56 Führungs- und Störverhalten der  $PT_n$ -Strecke mit I-Regler

### 2.3 PI-Regler auf $PT_n$ -Strecken

Eingangsgröße des PI-Reglers ist die vom Vergleich gebildete Regeldifferenz  $e$ . Ausgangsgröße ist die Stellgröße  $y$ , die an das Stellglied geht. Die Sprungantwort des PI-Reglers setzt sich additiv aus den Anteilen P- und I-Regler zusammen.

Aus dem Verlauf der Sprungantwort (Abbildung 57) ist zu ersehen, dass der PI-Regler auf Grund der integrierenden Wirkung  $y$  solange vergrößert, wie die Regeldifferenz  $e$  ungleich Null ist. Die Stellgröße  $y$  verharrt erst dann auf einem konstanten Wert, wenn  $e = 0$  geworden ist.

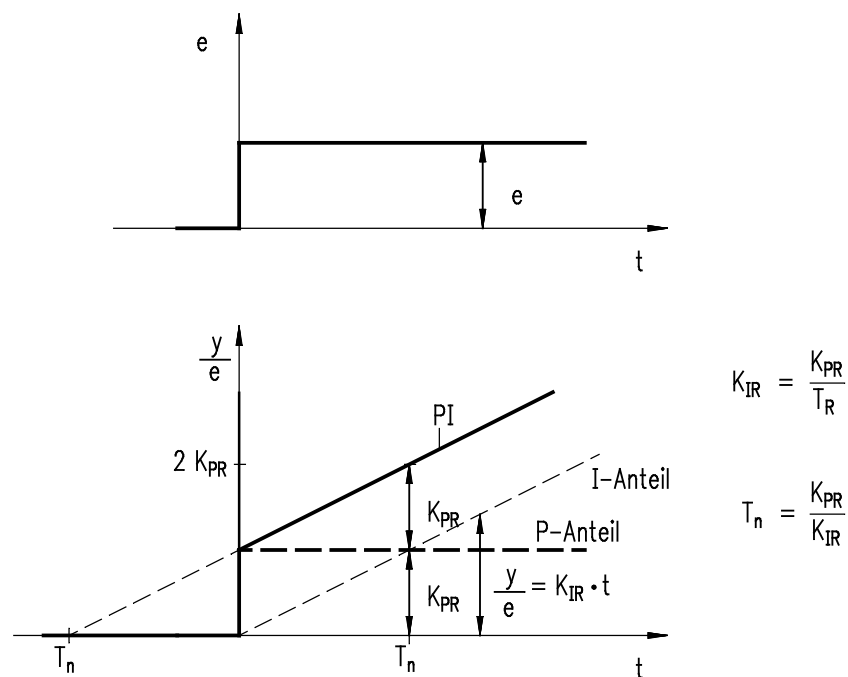


Abbildung 57 Bezogene Sprungantwort des PI-Reglers

Die Sprungantwort des PI-Reglers setzt sich additiv aus den Anteilen P- und I-Regler zusammen:

P-Regler:  $y - y_0 = K_{PR} \cdot e$

I-Regler:  $y - y_0 = K_{IR} \cdot e \cdot t$

PI-Regler:  $y - y_0 = K_{PR} \cdot e + K_{IR} \cdot e \cdot t$  für  $e = \text{konstant}$

Der PI- Regler vereint die Vorteile von P- und I-Regler. Tritt eine Regeldifferenz  $e$  sprungförmig auf, so wird unverzüglich eine Stellgröße  $y$  gebildet (P-Wirkung). Anschließend verstellt der I-Anteil  $y$  so lange, bis  $e$  zu Null wird.

Der PI-Regler ist damit in seiner Wirkung schneller als ein reiner I-Regler. Er wird eingesetzt, wenn eine bleibende Regelabweichung, wie sie ein reiner P-Regler aufweist, vermieden werden soll. Er ist für die Regelung fast aller Regelstrecken gut geeignet. Der bisherigen Betrachtung liegt eine Realisierung des PI-Reglers durch eine Parallelschaltung von einem P- und einem I-Glied zu Grunde (Abbildung 58).

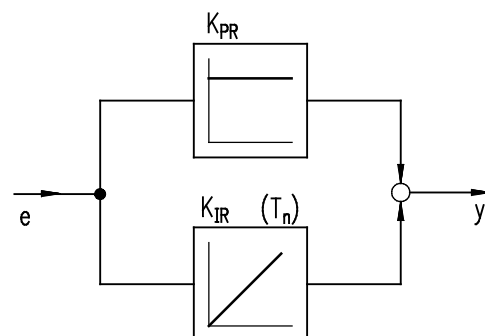


Abbildung 58 PI-Regler als Parallelschaltung eines P- und eines I-Gliedes

Der PI-Regler bietet die Möglichkeit der unabhängigen Einstellung von P- und I-Verhalten. Da er einfach einzustellen ist und das schnelle dynamische Verhalten des P-Reglers mit dem Ausregelverhalten des I-Reglers verbindet, wird er sehr häufig angewendet.

Abbildung 59 zeigt, dass der Regelkreis aus  $PT_n$ -Strecken schnell reagiert. Mit zunehmender Kreisverstärkung nimmt jedoch die Schwingneigung zu. Durch den I-Anteil werden Regelabweichungen völlig ausgeglichen, sodass auch hier im Beharrungszustand die bleibende Regelabweichung verschwindet.

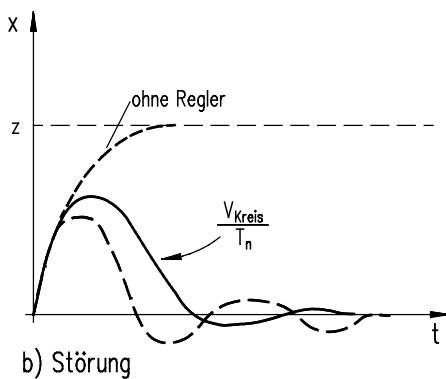
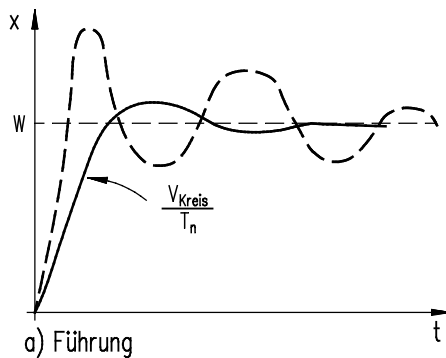


Abbildung 59 Führungs- und Störverhalten der  $PT_n$ -Strecke mit PI-Regler

## 2.4 PIDT<sub>1</sub>-Regler auf $PT_n$ -Strecken

Eingangsgröße des PID-Reglers ist die vom Vergleich gebildete Regeldifferenz  $e$ . Ausgangsgröße ist die Stellgröße  $y$ , die an das Stellglied geht. Wegen des I- und D-Anteils wird auch hier nur das dynamische oder Zeit-Verhalten beschrieben. Die Sprungantwort des PID-Reglers lässt sich durch Addition der einzelnen Anteile gewinnen:

Die Sprungantwort des PI-Reglers setzt sich additiv aus den Anteilen P- und I-Regler zusammen:

$$\text{P-Regler: } y - y_0 = K_{PR} \cdot e$$

$$\text{I-Regler: } y - y_0 = K_{IR} \cdot e \cdot t$$

$$\text{D-Regler: } y - y_0 = K_{DR} \cdot (\Delta e / \Delta t)$$

$$\text{PID-Regler: } y - y_0 = K_{PR} \cdot e + K_{IR} \cdot e \cdot t + K_{DR} \cdot (\Delta e / \Delta t)$$

$K_{PR}$ ,  $K_{IR}$  und  $K_{DR}$  sind die Kenngrößen des Reglers und  $(\Delta e / \Delta t)$  entspricht wegen der unendlich großen Änderungsgeschwindigkeit beim Sprung der Delta-Funktion  $\delta(t)$ .

In Abbildung 60 ist die bezogene Sprungantwort des idealen PID-Reglers dargestellt.

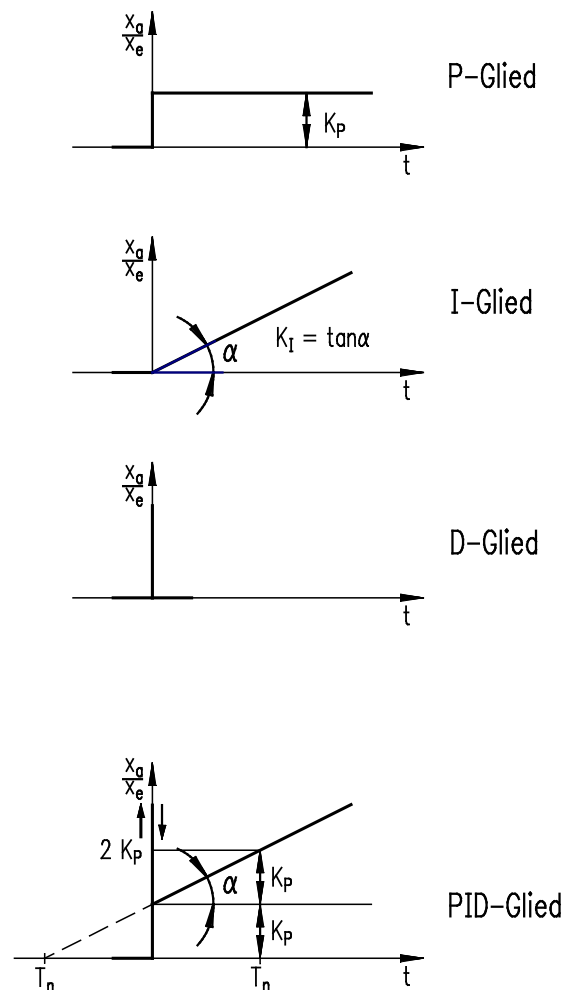


Abbildung 60 Bezogene Sprungantwort (Übergangsfunktion) des idealen PID-Reglers

Sowohl aus der Reglergleichung als auch aus der grafischen Darstellung lässt sich ersehen, dass die Sprungantwort (bezogene Stellgröße) im Moment der sprungförmigen Änderung von  $e$  mit einem sehr hohen und sehr kurzen Impuls (D-Wirkung) beginnt. Danach fällt die Sprungantwort bis auf den Wert  $K_{PR}$  (P-Wirkung) ab und steigt gleichzeitig gleichförmig an (I-Wirkung).

Der PI-Regler verbindet die Vorteile von P-, I- und D-Regler. Bereits bei langsamen Änderungen von  $e$  erzeugt er einen Sprung in der Stellgröße  $y$  (D-Wirkung), die dann auf Grund der P- und I-Wirkung zunehmend schneller weiter verstellt wird. Bei sprungförmigen Änderungen erzeugt der Regler einen Impuls in der Stellgröße, die anschließend solange verstellt wird, bis  $e = 0$  ist. In dem dann erreichten Beharrungszustand ist die bleibende Regelabweichung gleich Null.

Der PID-Regler eignet sich für die Regelung fast aller Strecken, vorzugsweise auch für die schwerer regelbaren. Allerdings lassen sich bei diesem aufwändigsten Regler Einstellwerte für die Kenngrößen (Parameter) nicht einfach bestimmen. Moderne Systemregler sind häufig als PID-Regler konzipiert, werden aber nur jeweils entsprechend den Anforderungen der Regelaufgabe bestückt als P-, PD, PI- und PID-Regler.



Die Darstellung einer PID-Regleinrichtung im Signalflussplan zeigt Abbildung 61.

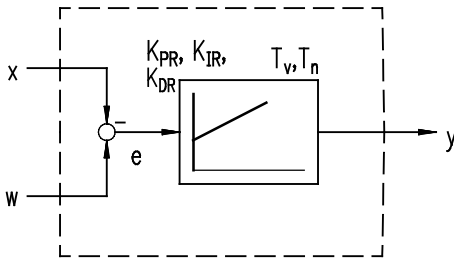


Abbildung 61 PID-Regleinrichtung im Signalflussplan

Wie auch beim PD-Regler lässt sich in der Praxis das D-Glied nur näherungsweise realisieren. Es ist mit einem Verzögerungsanteil  $T_1$  behaftet. Dies führt aber - durchaus wünschenswert - zur Verkleinerung des Nadelimpulses (Abbildung 62).

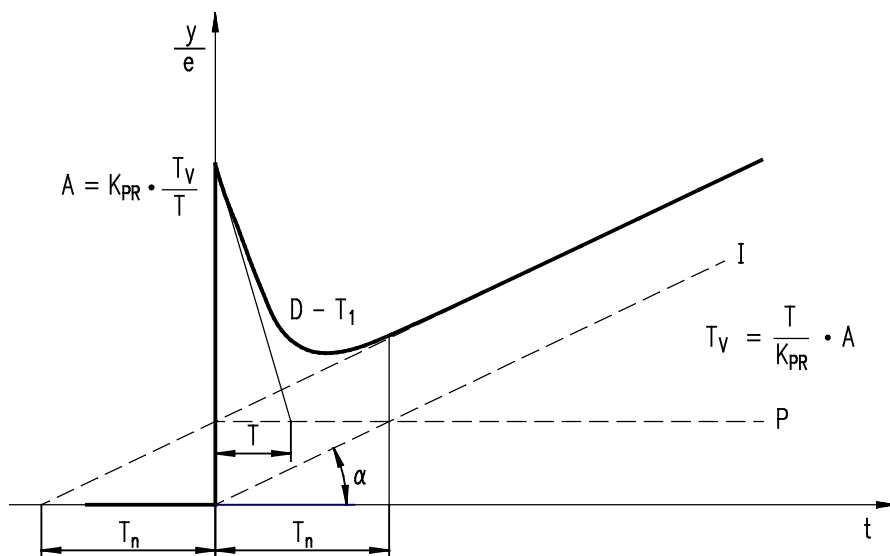


Abbildung 62 Bezogene Sprungantwort des realen PID- bzw. PIDT<sub>1</sub>-Reglers

Der Beschreibung des realen PID-Reglers liegt eine Parallelschaltung von P-, I- und D- bzw. DT<sub>1</sub>-Glied zu Grunde. Abbildung 63 zeigt das zugehörige Blockschaltbild. Der Regler lässt sich aber auch in Form anderer Strukturen realisieren, z.B. Parallelstruktur I und PD oder Kettenstruktur PI und PD oder diverse Kreisstrukturen.

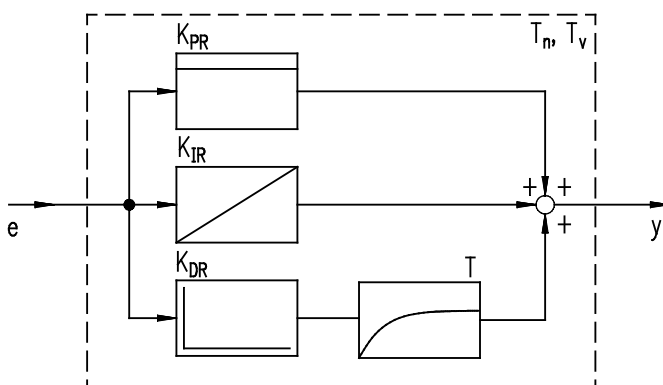


Abbildung 63 Blockschaltbild eines PIDT<sub>1</sub>-Reglers

Der Regelkreis aus  $PT_n$ -Strecke und PID-Regler reagiert durch den sofort wirkenden D-Anteil noch schneller als der Regelkreis mit PI-Regler. Auch hier nimmt bei einer Vergrößerung der Kreisverstärkung die Schwingneigung zu (Abbildung 64).

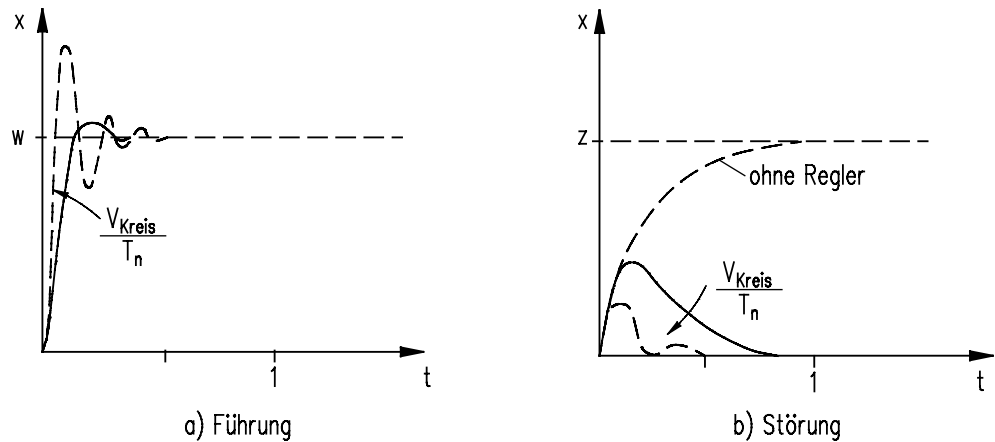


Abbildung 64 Führungs- und Störverhalten der  $PT_n$ -Strecke mit  $PIDT_1$ -Regler

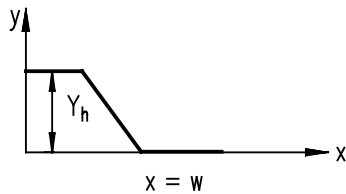
## 2.5 Unstetige Regler auf $PT_n$ -Strecken

Beim Zusammenarbeiten verschiedener Regelstrecken mit stetigen Regeleinrichtungen unterscheidet man zwischen statischem Verhalten (Beharrungszustand) und dynamischem Verhalten der Regelkreise. Das Erreichen eines Beharrungszustandes ist möglich, weil die Stellgröße  $y$  innerhalb des Stellbereiches stufenlos (stetig) auf jeden erforderlichen Wert eingestellt werden kann.

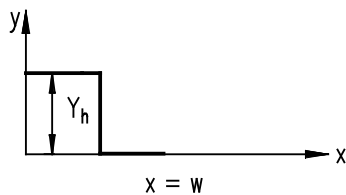
Bei unstetigen Regeleinrichtungen schaltet der Regler wegen der groben Stufung für die Stellgröße  $y$  dauernd zwischen den Stufen hin und her. Der Zweipunkt-Regler hat dabei zwei Stufen für die Stellgröße (z.B. Schalter EIN-AUS), der Dreipunkt-Regler dagegen drei Stufen (z.B. Motor RECHTSLAUF-AUS-LINKSLAUF).

Trotz der dauernden Schaltvorgänge stellt sich in der Strecke über ein Zeitintervall ein mittlerer Massenstrom oder Energiefluss ein. Ein Beharrungsverhalten ist jedoch nicht zu beobachten. Bei Regelkreisen mit unstetigen Regeleinrichtungen ergeben sich dadurch - zwar unerwünschte, aber systembedingte - dauernde Schwankungen der Regelgröße  $x$ .

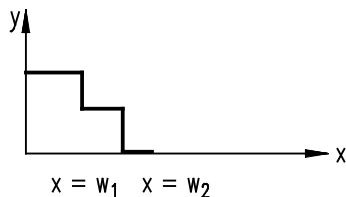
In Abbildung 65 werden drei Kennlinien gegenübergestellt. Es handelt sich dabei um Kennlinien zur stetigen Regeleinrichtung, zur Zweipunkt-Regeleinrichtung und zur Dreipunkt-Regeleinrichtung.



a) stetige Regeleinrichtung



b) Zweipunkt-Regeleinrichtung



c) Dreipunkt-Regeleinrichtung

Abbildung 65 Kennlinien unterschiedlicher Regeleinrichtungen

In Zweipunkt- und Dreipunkt-Regeleinrichtungen werden Elemente mit unstetigen Eigenschaften wie Schalter, Magnet- oder Pneumatikventile, Relais und Schütze verwendet. Als elektronische Schalter gehören auch Transistoren, Thyristoren und Triacs in diese Gruppe. Sie arbeiten als kontaktlose Schalter und sind daher verschleißfest, was für die unstetigen Regeleinrichtungen von besonderer Bedeutung ist.

### 2.5.1 Zweipunktregler

Zweipunktregleinrichtungen sind oft einfach aufgebaut und damit preiswert. Trotzdem lassen sich unter bestimmten Bedingungen ausreichende und befriedigende Regelergebnisse erreichen. Wegen der charakteristischen EIN/AUS-Schaltung werden Zweipunktregleinrichtungen auch als „EIN/AUS-Regler“ oder „schaltende Regler“ bezeichnet.

Sie werden in großem Umfang in Haushaltsgeräten für Temperaturregelungen (Heizung, Kühlung) eingesetzt. Bei der Zweipunktregelung besteht meist ein enger Zusammenhang zwischen Messwertaufnahme und der Schaltfunktion des Reglers. Zweipunktregler wirken als Schalter mit den beiden Schaltzuständen **EIN** ( $y = Y_h$ ) und **AUS** ( $y = 0$ ).

Abbildung 66 zeigt eine Temperaturregeleinrichtung als Zweipunktregleinrichtung. Sie beruht auf einem Bimetallstreifen als Temperaturemesseinrichtung.

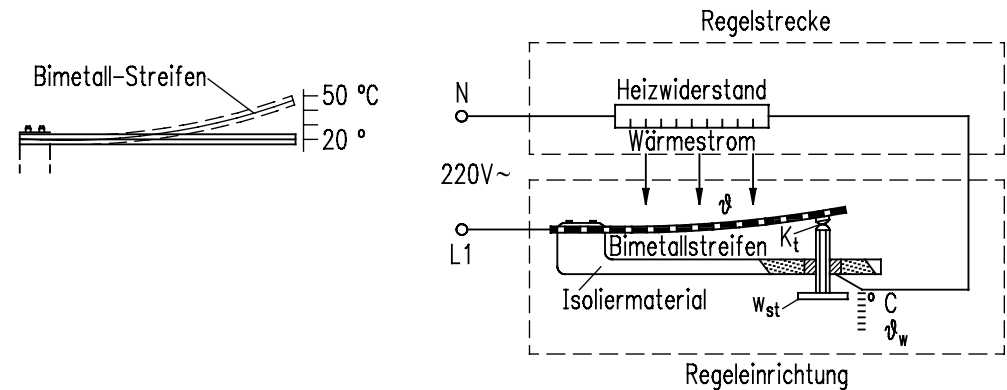


Abbildung 66 Bimetall-Temperaturregeleinrichtung, z.B. Bügeleisen

Bei einem Bimetallstreifen sind zwei unterschiedliche Metalle aufeinander gelötet. Da unterschiedliche Werkstoffe auch verschiedene Temperatúrausdehnungskoeffizienten haben, dehnen sich beide Werkstoffe bei Erwärmung unterschiedlich aus und es tritt in der Folge eine mechanische Krümmung in Richtung des Werkstoffes mit der kleineren Ausdehnung auf. Die Größe des Ausschlags aus der Ruhelage ist ein Maß für die Temperaturänderung.

Durch verspannen über eine Einstellschraube wird der Sollwert  $w$  vorgegeben. Die Kontaktstelle zwischen Bimetall und Sollwert-Einstellschraube erfüllt die Schaltfunktion. Ist die aktuelle Temperatur kleiner als die der Einstellung entsprechenden Temperatur, so bleibt der Kontakt geschlossen. Überschreitet die Temperatur den der Einstellung entsprechenden Sollwert, so öffnet der Kontakt. Bleibt der Kontakt geschlossen, so ist ein entsprechender Heizwiderstand an die elektrische Energieversorgung angeschlossen.

Aus mechanischen Gründen liegt die Temperatur beim Öffnen höher als die Temperatur beim Schließen. Es entsteht dadurch eine Schaltdifferenz oder **Hysterese** (Abbildung 67).

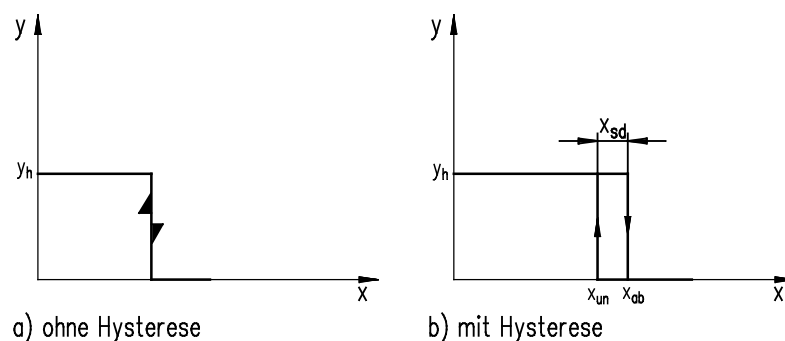


Abbildung 67 Kennlinien von Zweipunktregleinrichtungen

Ist der Praxis kann es zweckmäßig sein, das Ein- bzw. Abschalten der Energiezufuhr für eine Strecke nicht vollständig, sondern nur teilweise durchzuführen. In diesem Anwendungsfall besteht ständig eine bestimmte Grundlast. Dies entspricht einer bestimmten Grundeinstellung  $y_0$  der Stellgröße  $y$ .

Diese Grundeinstellung  $y_0$  wird nicht unterschritten. Ausgehend von  $y_0$  schaltet die Zweipunktregleinrichtung einen Teil entsprechend einer Stellgrößenänderung  $Y_h$  auf Grund der Auswertung des Soll-/Istwert-Vergleiches zu oder ab. Abbildung 68 zeigt die Kennlinie einer Zweipunktregelung mit Grundlast. Dabei ist zwischen einer Ausführung mit und ohne Schalthysterese unterschieden.

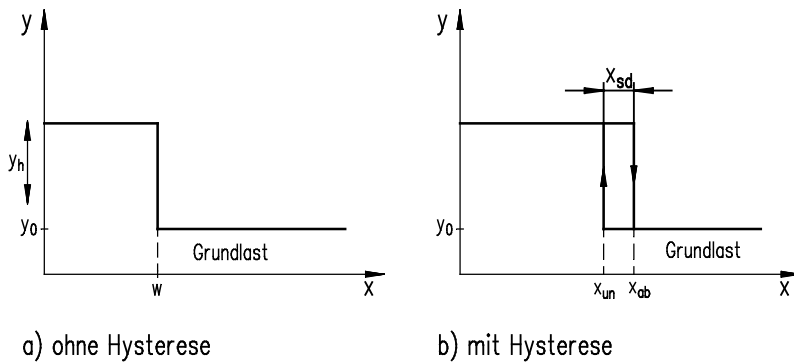


Abbildung 68 Kennlinien von Zweipunktregleinrichtungen mit Grundlast

Die Blockbilddarstellung einer Zweipunkt-Regleinrichtung zeigt Abbildung 69.

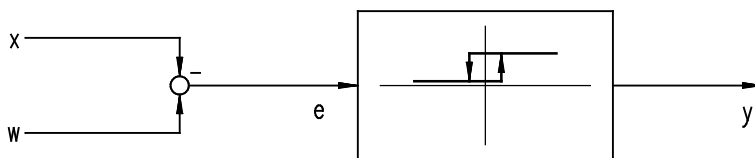


Abbildung 69 Blockbild einer Zweipunkt-Regleinrichtung

### PT<sub>1</sub>-Strecke und Zweipunkt-Regler

Die Zusammenschaltung von PT<sub>1</sub>-Strecke und Zweipunkt-Regleinrichtung zeigt Abbildung 70.

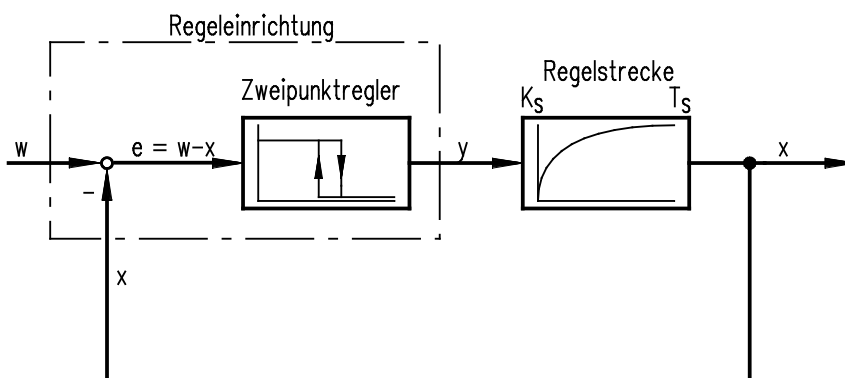


Abbildung 70 Regelkreis mit PT<sub>1</sub>-Strecke und Zweipunkt-Regler

Das Übertragungsverhalten für die Regelstrecke und die Regeleinrichtung (Vergleicher und Regler) ist in Abbildung 71 dargestellt.

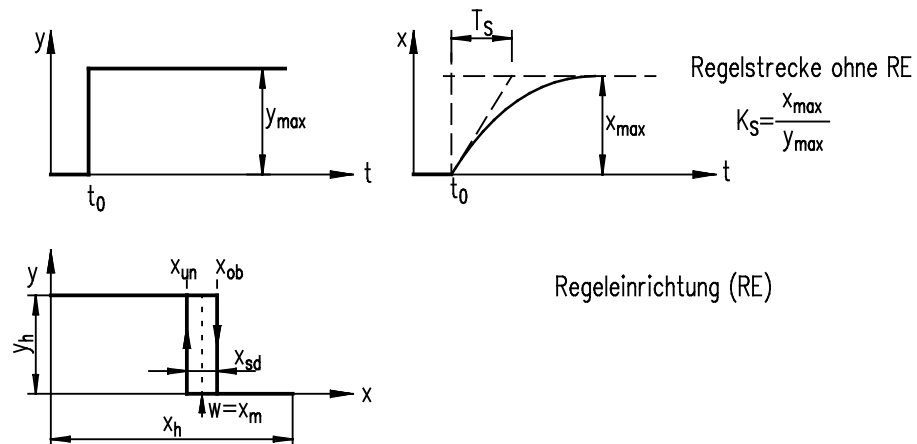


Abbildung 71 Übertragungsverhalten von Regelstrecke und Regeleinrichtung

Das Verhalten des geschlossenen Regelkreises zeigt Abbildung 72. Dabei ist vereinfachend angenommen worden, dass die Zeitkonstanten  $T_{S \text{ auf}}$  und  $T_{S \text{ ab}}$  der Strecke gleich groß sind. In der Praxis sind diese jedoch oft unterschiedlich groß.

Die Führungsgröße ist auf  $w = x_{\text{max}}/2$  eingestellt. Das Übertragungsverhalten der Regeleinrichtung ist um  $90^\circ$  gedreht eingezeichnet, um die Lage der beiden Schaltpunkte besser zu verdeutlichen. Nach dem Einschalten wird zunächst die Stellgröße für längere Zeit auf 100 % geschaltet, bis die Regelgröße  $x$  den oberen Schaltpunkt  $x_{\text{ob}}$  der Regeleinrichtung erreicht. Hier wird die Stellgröße auf 0 % geschaltet und die Regelgröße sinkt ab, bis der untere Schaltpunkt  $x_{\text{un}}$  erreicht ist. An dieser Stelle wird die Stellgröße wieder auf 100 % geschaltet.

Es folgen periodische Schwankungen der Regelgröße im Bereich  $x_{\text{sd}} = x_{\text{ob}} - x_{\text{un}}$  infolge des periodischen Ein- und Ausschaltens der Stellgröße. Der zeitlich gemittelte Verlauf der Stellgröße zeigt PD-ähnliches Verhalten.

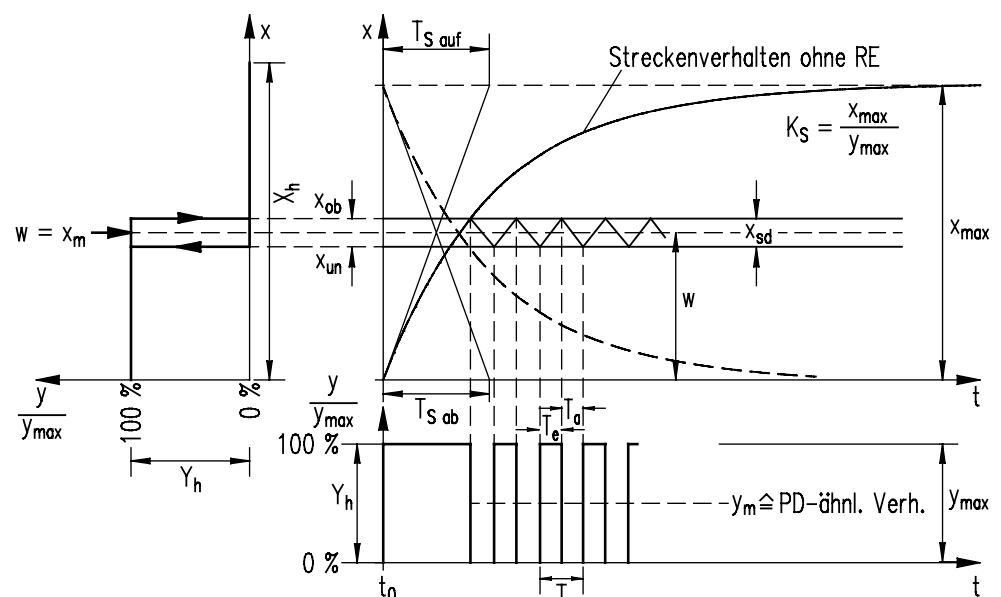


Abbildung 72 Verhalten des Regelkreises mit  $PT_1$ -Strecke ( $T_{S \text{ auf}} = T_{S \text{ ab}}$ ) und Zweipunkt-Regler

Der exakte Zusammenhang von  $w$ ,  $x_{un}$  und  $x_{ob}$  lässt sich für die Zweipunktregelung nicht allgemein angeben, da er von der Konstruktion der Regeleinrichtung abhängt. Bei praktisch eingesetzten Regeleinrichtungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Umschaltpunkte  $x_{un}$  und  $x_{ob}$  etwa symmetrisch zur an der Regeleinrichtung eingestellten Führungsgröße  $w$  sind.

Das Zeitverhalten der Strecke hat wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Regeleinrichtung. Abbildung 73 zeigt den zeitlichen Verlauf der Regelgröße  $x$  und der Stellgröße  $y$  bei zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten der  $PT_1$ -Strecke. Die Einstellung der Regeleinrichtung ist in beiden Fällen unverändert. Es zeigt sich, dass die **Schaltfrequenz**  $f_s$  für das Stellglied mit kleiner werdender Zeitkonstante der Strecke größer wird.

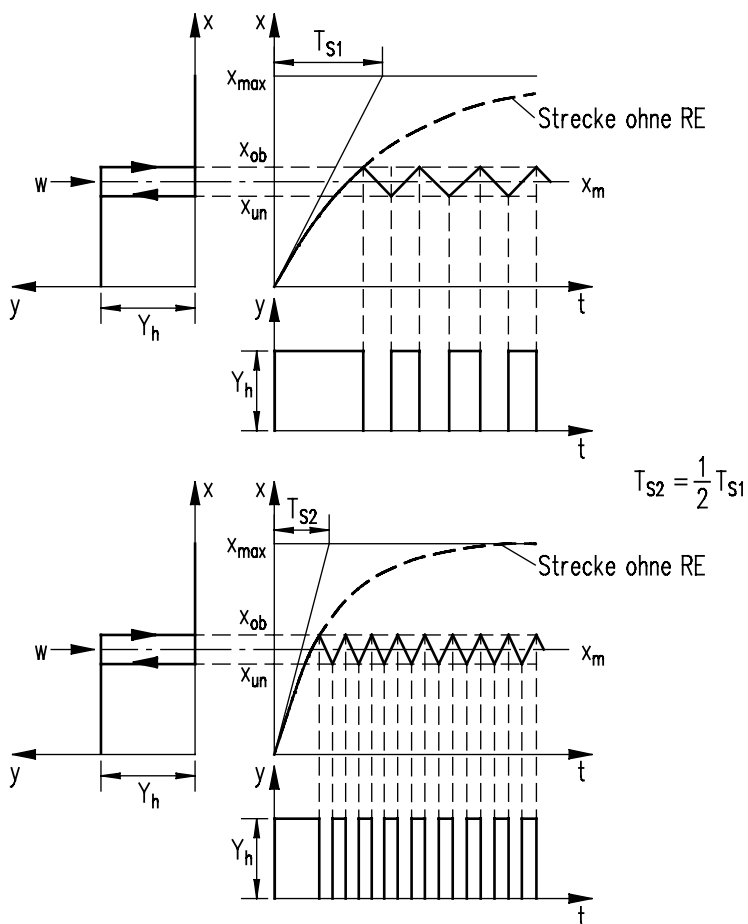


Abbildung 73 Regel- und Stellgrößenverlauf bei unterschiedlichen Streckenzeit-Konstanten ( $T_{S1} > T_{S2}$ )

Den Einfluss der Schalthysterese des Reglers auf den Verlauf der Regelgröße  $x$  und die Stellgröße  $y$  zeigt Abbildung 74 für zwei verschiedene Einstellungen an einer unveränderten Strecke. Eine Verkleinerung der Hysterese bewirkt eine Vergrößerung der Schaltfrequenz und umgekehrt. Die Schwankungsbreite der Regelgröße kann also durch Verkleinern der Schalthysterese verringert werden.

Dieser für die Regelung an sich positive Effekt lässt sich jedoch häufig nicht ausnützen, weil viele Stellglieder aus mechanischen Gründen eine Erhöhung der Schaltfrequenz nicht zulassen. Bei manchen Stellgliedern ist eine Erhöhung der Schaltfrequenz zwar möglich aber nicht sinnvoll, weil die Lebensdauer im allgemeinen durch die Anzahl der möglichen Schaltvorgänge begrenzt ist.

Günstigere Verhältnisse ergeben sich bei Anwendung von kontaktlosen elektronischen Schaltgliedern. Hier bewirkt eine Erhöhung der Schaltfrequenz keinen höheren Verschleiß und damit keine wesentliche Beeinflussung der Lebensdauer.

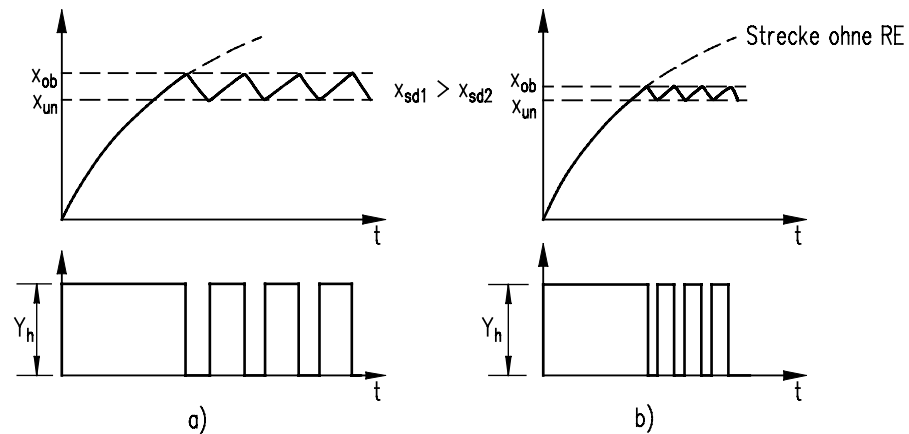


Abbildung 74 Einfluss der Schalthysterese auf die Schaltfrequenz  $f_s$

### PT<sub>n</sub>-Strecke und Zweipunkt-Regler

Bei den PT<sub>1</sub>-Strecken wird die Schwankungsbreite  $\Delta x$  der Regelgröße allein durch die Schalthysterese oder Hysterese  $x_{sd}$  der Regeleinrichtung bestimmt. Bei Strecken mit Verzögerung höherer Ordnung, die sich näherungsweise durch ein Totzeit-Glied (Verzugszeit  $T_u$ ) und ein Verzögerungsglied 1. Ordnung (Ausgleichszeit  $T_g$ ) beschreiben lassen wirkt sich zusätzlich auch die Verzugszeit  $T_u$  auf die Schwankungen der Regelgröße aus. Während der Zeit  $T_u$  reagiert die Strecke nicht auf Signale der Regeleinrichtung. Abbildung 75 zeigt den charakteristischen Verlauf der Regelgröße  $x$  und der Stellgröße  $y$ .

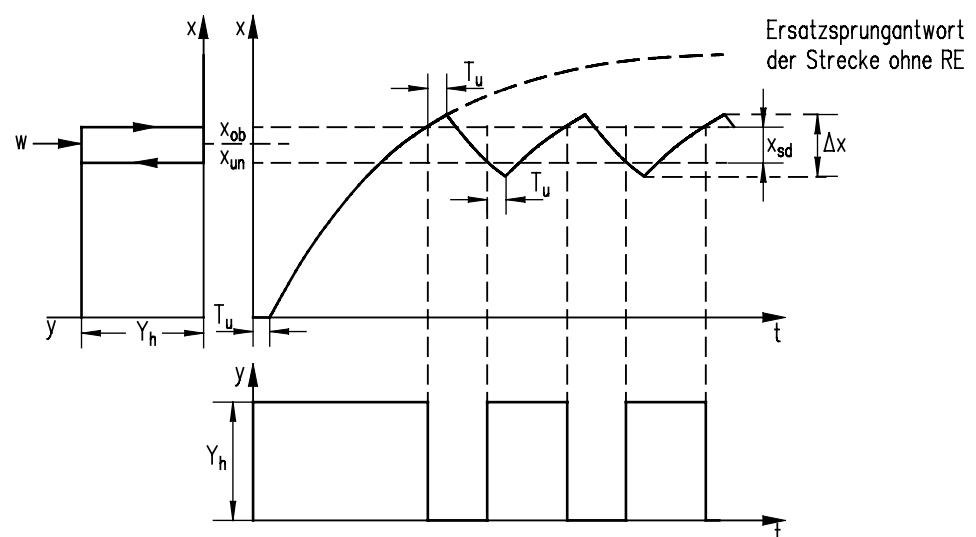


Abbildung 75 PT<sub>n</sub>-Strecke bzw. Ersatzstrecke mit  $T_u$ ,  $T_g$  und Zweipunktregleinrichtung

Deutlich erkennbar ist in Abbildung 75, dass die Verzugszeit  $T_u$  der Strecke die Schwankungsbreite  $\Delta x$  erheblich vergrößert. Je größer die Verzugszeit wird, desto größer wird die Schwankungsbreite. Die gleichzeitig durch die Vergrößerung von  $T_u$  bewirkte Verringerung der Schaltfrequenz kann wegen der damit verbundenen größeren Schwankungsbreite nicht vorteilhaft genutzt werden.



Der allgemeinere Fall mit Hysterese der Regeleinrichtung führt zu einer weiteren Vergrößerung der Schwankungsbreite  $\Delta x$ . Die sich gleichzeitig ergebende Verringerung der Schaltfrequenz ist jedoch nicht ausnutzbar.

Die bisher betrachteten Zusammenhänge galten für die Ersatzstrecke, die durch  $T_u$  und  $T_g$  gekennzeichnet ist. Bei einer realen Strecke höherer Ordnung sind die Verhältnisse etwas einfacher, weil die Sprungantwort der Strecke stetig ist. Der Verlauf der Regelgröße ist folglich, obwohl der Regler das Stellglied schaltend betätigt, ebenfalls stetig (Abbildung 76).

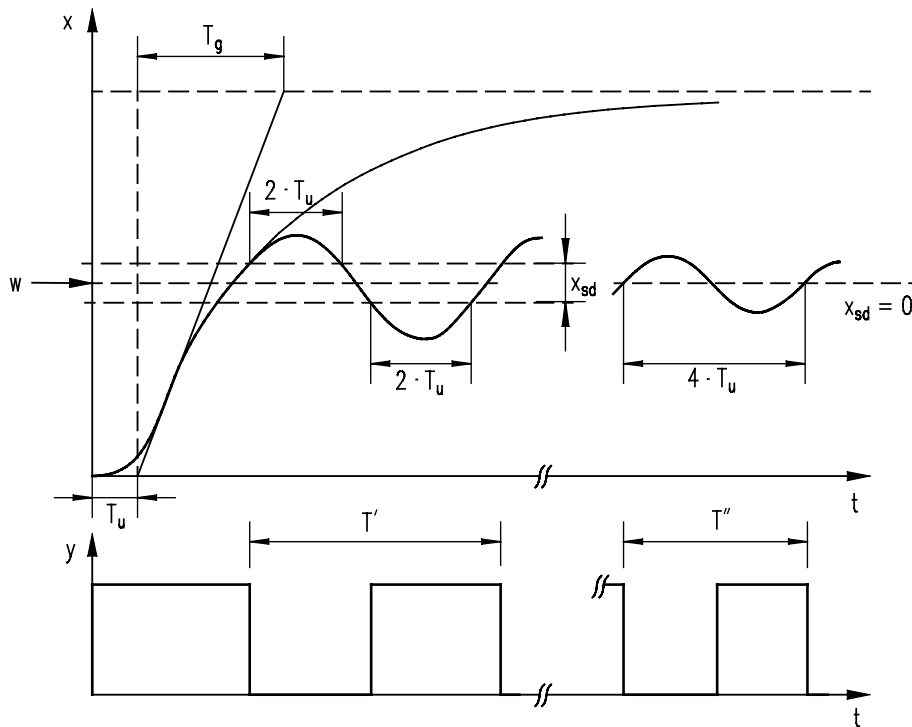


Abbildung 76 Reale  $PT_n$ -Strecke mit Zweipunktregeleinrichtung

In Abbildung 76 ist anschaulich zu sehen, dass für die Schaltdifferenz  $x_{sd} = 0$  die Schaltfrequenz  $f_s \approx \frac{1}{4 \cdot T_u}$  wird und dass  $x_{sd} > 0$  die Schaltfrequenz verkleinert.

## 2.5.2 Dreipunktregler

Bei der Dreipunktregelung werden zwei Sollwerte  $w_1$  und  $w_2$  festgelegt. Diese Sollwerte liegen oft bis etwa 10 %, gelegentlich aber auch erheblich weiter auseinander. Beim Dreipunkt-Regler liegen drei unterschiedliche Schaltzustände vor, die z.B. für die Funktionen Rechtslauf-Stillstand-Linkslauf eines Motors oder Heizen-Aus-Kühlen einer Klimaregelung genutzt werden können. Abbildung 77 zeigt Kennlinien für Dreipunkt-Regeleinrichtungen mit und ohne Schalthysterese.

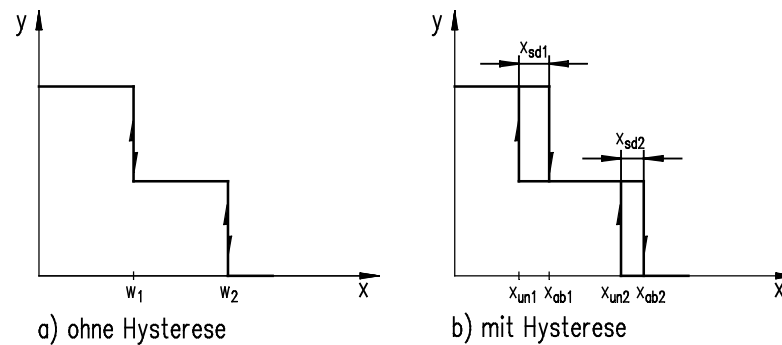


Abbildung 77 Kennlinien von Dreipunkt-Regeleinrichtungen

Neben der in Abbildung 77 dargestellten Lage können auch Kennlinien nach Abbildung 78 erforderlich sein. Hier liegen die Schaltschwellen symmetrisch zur Nulllinie. Gesteuert werden zwei Stellgrößen mit entgegengesetzten Vorzeichen.

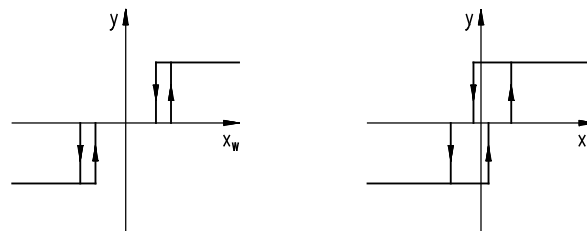


Abbildung 78 Kennlinien für symmetrische Lage des Stellsignals

Abbildung 79 zeigt das Blockschaftbild einer Dreipunkt-Regeleinrichtung.

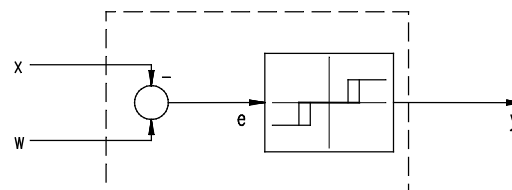


Abbildung 79 Dreipunkt-Regeleinrichtung

### PT<sub>n</sub>-Strecke mit Dreipunkt-Regler ohne Hysterese

Durch Einsatz einer Dreipunkt-Regleinrichtung können die Vorteile für den Regelkreis mit Zweipunktregleinrichtung und Grundlast noch weiter verbessert werden. Zur vereinfachten Darstellung wird in Abbildung 80 die PT<sub>n</sub>-Strecke als Kettenschaltung aus Totzeit-Glied ( $T_u$ ) und Verzögerungsglied 1. Ordnung ( $T_g$ ) angenommen.

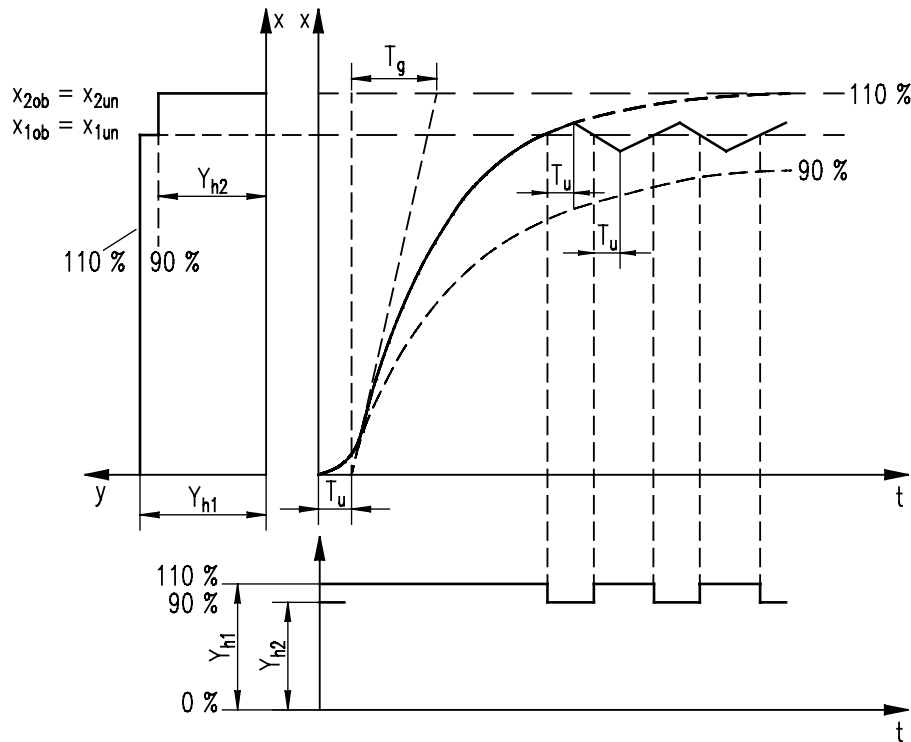


Abbildung 80 Regelkreis mit Ersatzstrecke ( $T_u$ ,  $T_g$ ) und Dreipunkt-Regleinrichtung

Dreipunkt-Regleinrichtungen werden oft so ausgelegt, dass beim Einschalten bis zur Schaltschwelle  $x_{1ob}$  eine Stellgröße auftritt, die zum Erreichen eines Wertes von 110 % des Sollwertes ohne Regelvorgang erforderlich ist. Oberhalb von  $x_{1ob}$  wird das Stellglied so eingestellt, dass nur noch ein Wert von 90 % des Sollwertes ohne Regelvorgang erreicht würde.

Wird dann noch der Wert  $x_{2ob}$  überschritten, so wird der Massen- oder Energiefluss in der Strecke vollständig unterbrochen. In umgekehrter Richtung erfolgen die Umschaltvorgänge entsprechend. Die Regelungsvorgänge spielen sich folglich um den Schaltschwellenpunkt  $w = x_{1ob} = x_{1un}$  ab. Die Schwankungsbreite ist auf Grund der hohen Grundlast klein.

Bei Störungen, die eine Änderung der Regelgröße über 110 % der Führungsgröße  $w$  ergeben, wird der gesamte Massen- oder Energiefluss unterbrochen. Dies ist der wesentliche Unterschied zu einer Regelung mit Zweipunkt-Regleinrichtung und Grundlast.

### PT<sub>n</sub>-Strecke mit Dreipunkt-Regler mit Hysterese

Dreipunkt-Regleinrichtungen werden häufig mit motorgetriebenen Stellantrieben eingesetzt. Abbildung 81 zeigt einen solchen Regelkreis mit Dreipunkt-Regleinrichtung, Motorstellgetriebe und einer Regelstrecke mit Verzögerung höherer Ordnung.

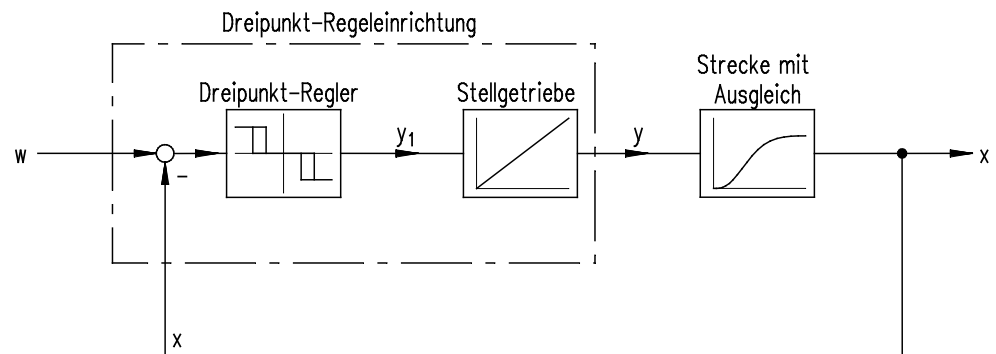


Abbildung 81 PT<sub>n</sub>-Strecke mit Dreipunkt-Regelung und Stellgetriebe

Solange keiner der beiden oberen Schaltpunkte der symmetrischen Dreipunkt-Regelung überschritten ist, hat die Größe  $y_1$  den Wert Null. Dies bedeutet, dass der Stellmotor stillsteht. Wird einer der beiden Schaltpunkte  $x_{1ob}$  oder  $x_{2ob}$  überschritten, so läuft der Motor im Nennbetrieb im Rechtslauf oder Linkslauf. Sind die Zeitkonstanten bei der Regelung und Strecke so aufeinander abgestimmt, dass die Regelgröße  $x$  der Ausgangsgröße  $y$  der Regelung mit gleicher Geschwindigkeit folgen kann, dann lässt sich der Regelvorgang vereinfacht darstellen (Abbildung 82).

Wenn die Verzugszeit  $T_u$  genügend klein ist (Abbildung 82a), kommt der Stellvorgang nach Überschreiten der Schaltschwelle  $x_{1un}$  zur Ruhe, der Motor steht wieder still. Auf Grund der Verzugszeit ändert sich  $x$  aber zunächst noch weiter. Ist die Verzugszeit  $T_u$  jedoch größer (Abbildung 82b), so kann durch den Einfluss der Verzugszeit die Regelgröße  $x$  noch die obere Schaltschwelle  $x_{2ob}$  überschreiten, der Stellmotor läuft dadurch in Gegenrichtung wieder an. Es entstehen in der Folge Pendelbewegungen.

Dreipunkt-Regelungen werden vorwiegend an langsamen Strecken, wie z.B. Temperatur-Strecken, eingesetzt. Seltener Einsatz erfolgt bei schnellen Strecken, wie z.B. Drehzahl-Strecken.

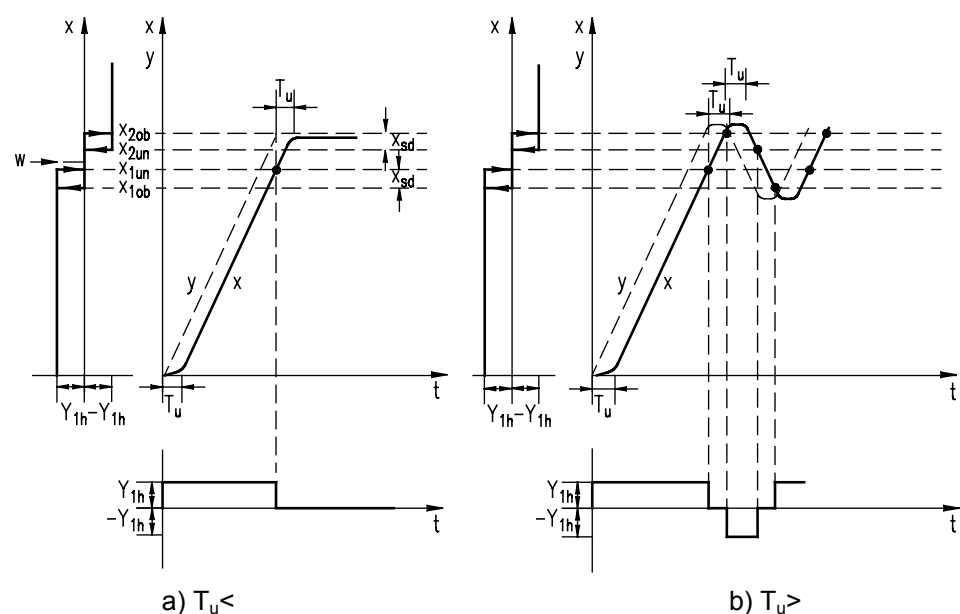


Abbildung 82 Verlauf der Stellgröße  $y$  und der Regelgröße  $x$  bei der Dreipunkt-Regelung

Aufgabe 1

Erklären Sie den Unterschied zwischen Führungs- und Störverhalten eines Regelkreises am Beispiel der Sprungantwort!

Aufgabe 2

Warum ist der PI-Regler für die Regelung von fast allen Regelstrecken gut geeignet? Skizzieren Sie das Zeitverhalten bei Sprungtestfunktion mit der Beschreibung der charakteristischen Größen!

Aufgabe 3

Für die Temperaturregelung eines Warmwasserspeichers wird der in Abbildung 83 dargestellte Stab-Temperaturregler verwendet.

Welches Regelprinzip wird hierbei verwendet? Skizzieren Sie den qualitativen Erwärmungsverlauf nach dem Einschalten der Energieversorgung (Istwert beim Einschalten = 20 °C, Sollwert = 70 °C)!

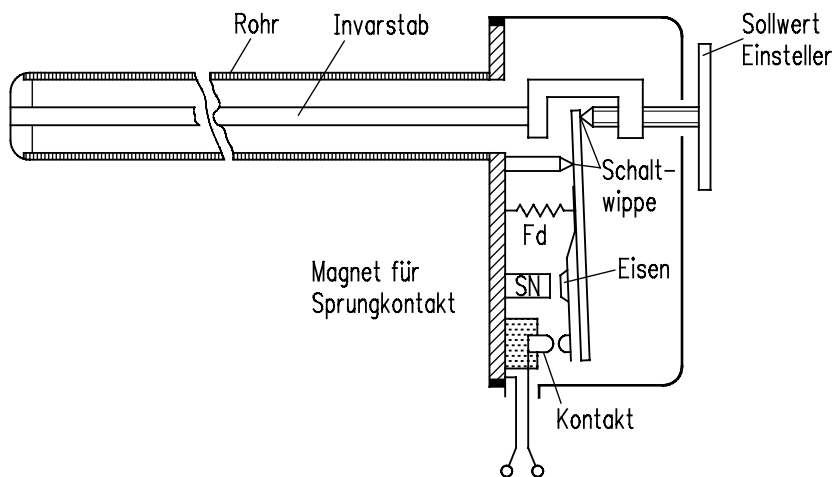


Abbildung 83 Stab-Temperaturregler

Aufgabe 4

Was versteht man beim Zweipunktregler unter Hysterese?

## Aufgaben

**Lernbereich**

### 3 Ermittlung von Einstelldaten für Regler

Bei der Einstellung eines Regelkreises wird vielfach auch von der **Optimierung** des Regelkreises gesprochen. Optimierungskriterien zur Erfüllung bestimmter Aufgabenstellungen einer Regelung können z.B. sein:

- Gutes Führungsverhalten (Ansprechen auf Änderungen der Führungsgröße)
- Gutes Störverhalten (Ausregeln von Störungen)
- Schnellstmögliches Einlaufen der Regelgröße  $x$
- Geringes oder kein Überschwingen der Regelgröße  $x$
- Einfachste Einstellung (geringer Zeitaufwand)
- Niedrige Herstellungskosten bei Erfüllung bestimmter Anforderungen
- Hohe Störsicherheit bzw. niedrige Ausfallsrate
- Geringer Energieverbrauch

Im konkreten Fall sind die Bedingungen mit Zahlenangaben und Toleranzen festgelegt. Oft werden in der Praxis mehrere dieser zum Teil sich widersprechenden Forderungen gleichzeitig bestehen. Dann muss eine optimale Lösung unter Berücksichtigung aller vorgegebenen Kriterien gefunden werden.

Im Folgenden sollen nur Optimierungen hinsichtlich Stör- und Führungsverhalten sowie Einschwingen und Überschwingen betrachtet werden. Das Verhalten von Regelkreisen wird meist mithilfe der Sprung-Testfunktion untersucht. Es muss aber berücksichtigt werden, dass sprunghafte Änderungen einen besonders ungünstigen Fall darstellen. Im allgemeinen treten in der Praxis sehr unterschiedliche Änderungen bzw. Störungen auf:

- Langsame Änderungen
- Sägezahnförmige Störungen
- Impulsförmige Störungen
- Periodische Störungen
- Rauschförmige Störungen

Der Angriffsort von Störungen kann überall im Regelkreis liegen. Bei der Untersuchung werden jedoch meist die durch die Praxis gegebenen Hauptangriffsorte betrachtet: Eingang und Ausgang der Regelstrecke und Eingang der Regeleinrichtung. In Abbildung 84 sind zwei mögliche Sprungantworten eines Regelkreises auf sprunghafte Stör- und Führungsgrößenänderungen dargestellt. Für die Beschreibung des Regelkreis-Verhaltens eignen sich gut die mit eingezeichneten Größen:

- Überschwingweite  $x_m$
- Anregelzeit  $T_{an}$
- Ausregelzeit  $T_{aus}$

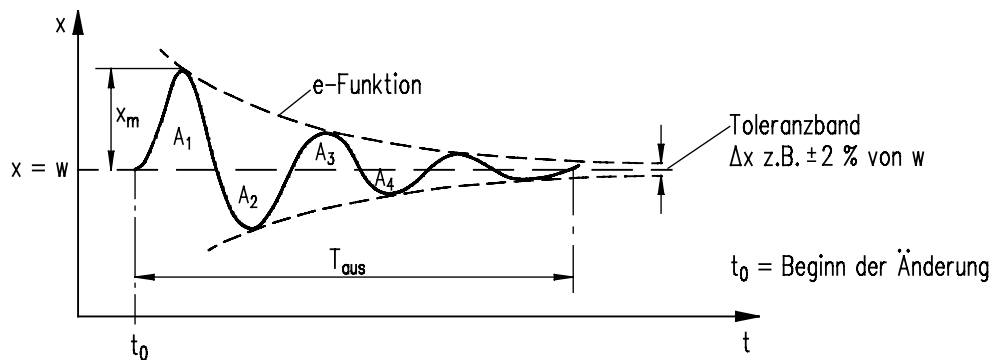
Abbildung 84a zeigt, dass die Regelgröße  $x$  nach einem Störgrößensprung im Zeitpunkt  $t_0$  nach einem maximalen Überschwingen  $x_m$  mehrere gedämpfte Schwingungen um den Sollwert ausführt, um dann bleibend in ein festgelegtes Toleranzband  $\Delta x$  einzutreten. Die hierfür benötigte Zeit ist die Ausregelzeit  $T_{aus}$ .

Abbildung 84b zeigt das Einschwingen der Regelgröße  $x$ , wenn der ursprüngliche Führungsgrößenwert  $w_1$  sprunghaft um  $\Delta w$  auf  $w_2$  geändert wird. Die Zeit für das erstmalige Erreichen des neuen Wertes ist die Anregelzeit  $T_{an}$ . Aus Abbildung 84 lässt sich ableiten, dass eine Reglereinstellung umso besser ist, je kürzer die Anregelzeit  $T_{an}$ , je kleiner die Überschwingweite  $x_m$  und je kürzer die Ausregelzeit  $T_{aus}$  ist. Innerhalb gewisser Grenzen lassen sich Überschwingweite und Ausregelzeit gegeneinander aufrechnen:

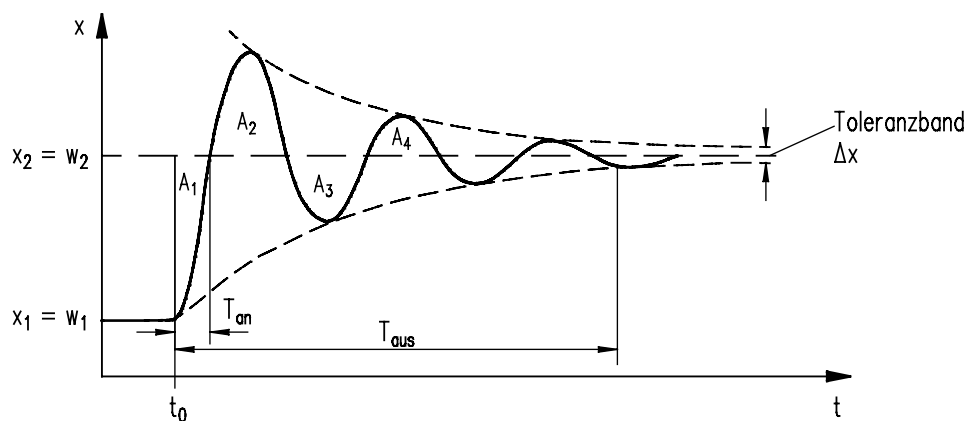
**kleines  $x_m \Leftrightarrow$  großes  $T_{aus}$**

**großes  $x_m \Leftrightarrow$  kleines  $T_{aus}$**

Was zulässig ist, bestimmt jedoch der jeweilige Anwendungsfall der Regelung.



a) Störungsverhalten



b) Führungsverhalten

Abbildung 84 Zeitlicher Verlauf der Regelgröße  $x$

Für die Praxis haben die nachfolgend beschriebenen Verfahren wohl die größte Bedeutung erlangt. Sie führen meist mit vertretbarem Aufwand zu einem stabilen und annähernd optimalen Regelkreisverhalten. Verbesserungen sind dann durch Feineinstellung möglich. Es sind allerdings Verfahren, die nur für bestimmte Bedingungen gelten.

Sind dagegen spezielle Randbedingungen einzuhalten, so müssen unter Umständen völlig andere Einstellwerte gewählt werden. Gegebenenfalls muss sogar das Regelkonzept geändert werden. Auf jeden Fall liefern diese Verfahren erst einmal die Ausgangswerte, um den Regelkreis in Betrieb zu nehmen.

## Auswahl des Reglers

In der Praxis steht der Anwender häufig vor der Frage, für eine gegebene Strecke einen geeigneten Regler auszuwählen, einzubauen und zweckmäßig einzustellen. Die Erfahrungen aus der Praxis, aus Rechnersimulationen sowie grundsätzliche Überlegungen zeigen, dass für die verschiedenen Strecken nur bestimmte Reglertypen mehr oder weniger gut geeignet sind. Neben der Eignung spielt der Gesichtspunkt Aufwand (Kosten, Einstellungsaufwand, Wartung) zu Nutzen eine Rolle.

Abbildung 85 zeigt eine Zusammenstellung häufig vorkommender Streckentypen und üblicher Regler. Dabei werden drei große Bewertungsklassen verwendet:

- ++ gut geeignet
- + geeignet
- nicht geeignet

Streckenverhalten (Bezeichnung)	Sprung- antwort	Beispiel	Regelrichtung				Zwei- punkt
			P-	I-	PD-	PI-	
mit Ausgleich ohne Verzögerung (P)		Durchfluss el. Netzteil	- ++ (F u. S)	++	-	++ (F u. S)	-
eine Verzögerung (P-T <sub>1</sub> )		Drehzahl Druck Spannung	++ (F)	+	+	++ (S)	+
zwei/viele Verzögerungen (P-T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> ) (P-T <sub>n</sub> )		Temperatur	+	-	-	+ auch: (++) da Hauptanwen- dungsgebiet	+
reine Totzeit (P-T <sub>t</sub> )		Förderband	-	+	-	++ (F u. S)	-
Totzeit u. ein/zwei Verzög. (T <sub>t</sub> -PT <sub>1</sub> ) (T <sub>t</sub> -PT <sub>2</sub> )			-	-	-	+	+
ohne Ausgleich reine Integralstrecke (I)		Füllstand	++ (F)	-	++(F)	++ (S)	+
eine Verzögerung (I-T <sub>1</sub> )		Kurs Lage	+	-	+	+	+
mit Totzeit (I-T <sub>t</sub> )		I-Strecke mit Lose	-	-	+	-	-

F = Führung, S = Störung

Abbildung 85 Auswahlhilfe für Regler bei bekanntem Streckentyp



Die Grenzen der Regler-Auswahl sind fließend, weil die Streckenparameter sehr unterschiedlich sein können. Daher stimmen auch die entsprechenden Tabellen in unterschiedlichen Literaturquellen nicht vollständig überein. Außerdem ist die Beurteilung der Störeinflüsse schwierig, da häufig die Eingriffsorte der Störgrößen nicht bekannt sind.

### **P-Regler**

Der P-Regler ist ein sehr schneller Regler. Je größer der Proportional-Beiwert  $K_{PR}$  bzw. je kleiner der Proportionalbereich  $X_P$  gewählt wird, desto stärker wirkt der Regler im Regelkreis. Bei Auftreten einer Störgröße muss der Regler eine neue Stellgröße erzeugen, dies bewirkt eine bleibende Regeldifferenz  $e_{bl}$ . Je größer  $K_{PR}$  ist, desto kleiner wird  $e_{bl}$ . Ein zu großes  $K_{PR}$  führt jedoch zur Instabilität des Regelkreises, daher ist zwischen Stabilität und bleibender Regeldifferenz ein Kompromiss zu treffen.

### **PD-Regler**

Ein zusätzlicher D-Anteil beim P-Regler erlaubt eine Vergrößerung der  $K_{PR}$ -Einstellung, ohne eine entsprechende Stabilitätsminderung wie beim reinen I-Regler. Die bleibende Regeldifferenz wird damit kleiner. Der PD-Regler wirkt bei langsamen Änderungen (Anstieg/Abfall) im Regelkreis schneller und stärker als der reine P-Regler.

### **I-Regler**

Der I-Regler ist ein sehr langsamer Regler. Er integriert die Regeldifferenz  $e$  zeitlich so lange, bis das Stellglied schließlich eine Stellung erreicht hat, bei der die Regeldifferenz zu Null wird. Wegen seiner Trägheit wird er oft in Verbindung mit den schnellen P- und PD-Reglern eingesetzt, um die dort unerwünschte bleibende Regelabweichung langsam auf Null zu regeln.

### **PI-Regler**

Der PI-Regler verbindet die Schnelligkeit des P-Reglers mit dem trägen Ausregelverhalten des I-Reglers. Es tritt keine bleibende Regeldifferenz auf. Dieser Typ wird häufig angewendet, weil er vielfältige Variationsmöglichkeiten bietet und relativ einfach einzustellen ist.

### **PID-Regler**

Der zusätzliche D-Anteil beim PI-Regler erlaubt eine Verringerung der Nachstellzeit  $T_n$ , damit wird die Regeldifferenz schneller ausgeregelt. Der zusätzliche I-Anteil beim PD-Regler ermöglicht eine Vergrößerung der Vorhaltezeit  $T_v$ , sodass der PID-Regler bei langsamen Änderungen im Regelkreis schneller und stärker als der PD-Regler wirkt. Die Regler-Einstellung ist jedoch nicht einfach.

### 3.1 Einstellverfahren nach Ziegler-Nichols

Das Verfahren nach Ziegler-Nichols kann angewendet werden, wenn die Streckenparameter nicht bekannt sind. Voraussetzungen für die Anwendung dieses Verfahrens sind, dass der Regelkreis schwingfähig ist, und dass die Betriebsbedingungen Schwingungen überhaupt zulassen. Der Regelkreis muss nämlich bis an die Stabilitätsgrenze gefahren werden. Die Regelgröße führt dabei ungedämpfte Schwingungen aus. Das kann jedoch leicht zu einem „Durchgehen“ des Regelkreises führen. Zu welchen Konsequenzen dies führt, muss vorher überlegt werden.

Um die Einstellwerte für den Regler zu ermitteln, wird folgendermaßen vorgegangen:

Der Regler wird im geschlossenen Regelkreis zunächst als reiner P-Regler betrieben, d.h. der I-Teil und der D-Teil werden unwirksam gemacht ( $T_n = \infty$  s,  $T_v = 0$  s). Dann wird der Proportionalbereich  $X_P$  des Reglers von großen Werten her verkleinert, bis bei  $X_{P_{krit}}$  periodische, ungedämpfte Regelschwingungen einsetzen.

Gleichbedeutend kann auch die Verstärkung  $K_{PR}$ , von kleineren Werten ausgehend, so lange vergrößert werden bis der Kreis schwingt ( $K_{PR_{krit}}$ ). Die Periodendauer  $T_{krit}$  der Schwingung und der Wert  $X_{P_{krit}}$  bzw.  $K_{PR_{krit}}$  werden ermittelt. Obwohl das Zeitverhalten der Strecke unbekannt ist, wird es genügend genau durch die beiden Werte beschrieben.

Mithilfe dieser beiden Messwerte lassen sich dann gemäß Tabelle 1 in etwa optimale Einstellwerte für verschiedene Reglertypen finden. Sie gelten für einen Dämpfungsgrad von  $D \approx 0,2 \dots 0,3$ . Durch Variieren der Einstellwerte kann der Regler dem jeweiligen Anwendungszweck dann eventuell noch besser angepasst werden.

Reglertyp	Parameter	
P	$X_P \approx 2 \cdot X_{P_{krit}}$	bzw. $K_{PR} \approx 0,5 \cdot K_{P_{krit}}$
PD	$X_P \approx 1,25 \cdot X_{P_{krit}}$ $T_v \approx 0,12 \cdot T_{krit}$	bzw. $K_{PR} \approx 0,8 \cdot K_{P_{krit}}$
PI	$X_P \approx 1,7 \cdot X_{P_{krit}}$ $T_n \approx 0,85 \cdot T_{krit}$	bzw. $K_{PR} \approx 0,45 \cdot K_{P_{krit}}$
PID	$X_P \approx 1,7 \cdot X_{P_{krit}}$ $T_n \approx 0,5 \cdot T_{krit}$ $T_v \approx 0,12 \cdot T_{krit}$	bzw. $K_{PR} \approx 0,6 \cdot K_{P_{krit}}$

Tabelle 1 Reglereinstellwerte nach Ziegler-Nichols (Störverhalten;  $D \approx 0,2 \dots 0,3$ )

### 3.2 Einstellverfahren nach Chien-Hrones-Reswick

Auf Grund umfangreicher Simulationen von Regelkreisen haben Chien, Hrones und Reswick Einstellwerte für Regler angegeben, die für Strecken höherer Ordnung gelten. Die Einstellungen sind unterschieden nach Störungs- und Führungsverhalten. Sie gelten zum einen für den aperiodischen Regelvorgang kürzester Dauer ohne Überspringen, zum anderen für den gedämpft einschwingenden Regelvorgang kürzester Dauer mit ca. 20 % Überspringen. Von der Regelstrecke müssen die Parameter Streckenverstärkung  $K_S$ , Ausgleichzeit  $T_g$  und Verzugszeit  $T_u$  - eine vorhandene Totzeit  $T_t$  ist mit einzurechnen - bekannt sein.

Die Einstellwerte können Tabelle 2 entnommen werden. Der bezogene Proportionalbereich  $x_P$  berechnet sich aus:

$$x_P = \frac{X_P}{X_h}$$

Tabelle 2 zeigt auch, dass nur beim verzögerungsfreien P-Regler die Einstellwerte für Störungsverhalten und Führungsverhalten gleich sind. In allen anderen Fällen muss für optimales Führungsverhalten der Regler schwächer eingestellt werden als für optimales Störverhalten. Je kleiner der Verzugsanteil  $T_u/T_g$  ist, desto größer darf  $K_{PR}$  gewählt werden.

Die Nachstellzeit  $T_n$  wird beim Führungsverhalten durch die lange Ausgleichszeit  $T_g$  bestimmt, während sie beim Störverhalten durch die kurze Verzugszeit  $T_u$  festgelegt wird. Auch für diese Einstellregeln gilt, dass durch Variation der Parameter um die angegebenen Tabellenwerte die für die jeweilig vorliegende Strecke günstigsten Werte noch zu ermitteln sind. Dieser Vorgang wird deshalb als Feinabgleich bezeichnet.

Regler- typ	Einstell- wert	Überschwingen 20 % ( $D \approx 0,45$ )		aperiodisch ( $D \approx 0,8$ )		
		Störung	Führung	Störung	Führung	
<b>P</b>	$X_P \approx$	1,4	1,4	3,3	3,3	$\cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$
	$K_{PR} \approx$	0,7	0,7	0,3	0,3	$\cdot \frac{1}{K_S \cdot \frac{T_u}{T_g}}$
<b>PI</b>	$X_P \approx$	1,4	1,7	1,7	2,9	$\cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$
	$K_{PR} \approx$	0,7	0,6	0,6	0,35	$\cdot \frac{1}{K_S \cdot \frac{T_u}{T_g}}$
	$T_n \approx$	$2,3 \cdot T_u$	$T_g$	$4 \cdot T_u$	$1,2 \cdot T_g$	-
<b>PID</b>	$X_P \approx$	0,83	1,05	1,05	1,7	$\cdot K_S \cdot Y_h \cdot \frac{T_u}{T_g}$
	$K_{PR} \approx$	1,2	0,95	0,95	0,6	$\cdot \frac{1}{K_S \cdot \frac{T_u}{T_g}}$
	$T_n \approx$	$2 \cdot T_u$	$1,35 \cdot T_g$	$2,4 \cdot T_u$	$T_g$	-
	$T_v \approx$	$0,42 \cdot T_u$	$0,47 \cdot T_u$	$0,42 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$	-

Tabelle 2 Einstellwerte für Regler nach Chien, Hrones und Reswick

**Aufgaben**Aufgabe 1

*Warum sind ungedämpfte und aufklingende Schwingungen in der Regelungstechnik unbedingt zu vermeiden?*

Aufgabe 2

*Was bedeutet die Aussage: „Ein Regelkreis arbeitet stabil“?*

Aufgabe 3

Ein Regelkreis mit PI-Regler soll nach Ziegler-Nichols optimiert werden. Als kritische Werte an der Stabilitätsgrenze wurden gemessen:

$$T_{\text{krit}} = 18 \text{ s} \quad \text{und} \quad K_{\text{Pkrit}} = 10$$

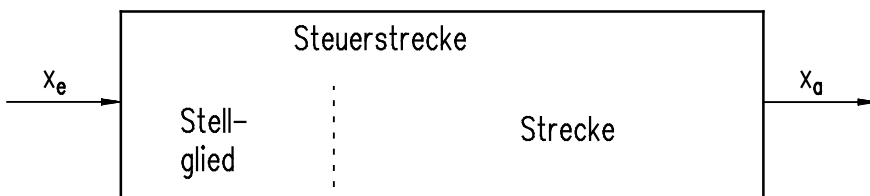
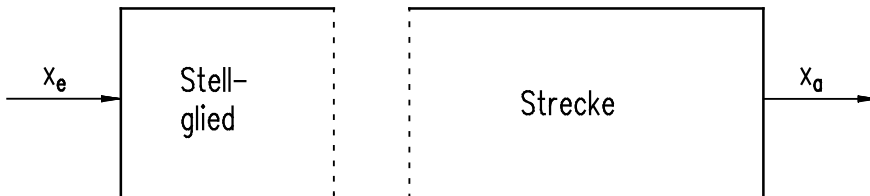
*Bestimmen Sie die Einstellwerte!*

## Lösungsanhang

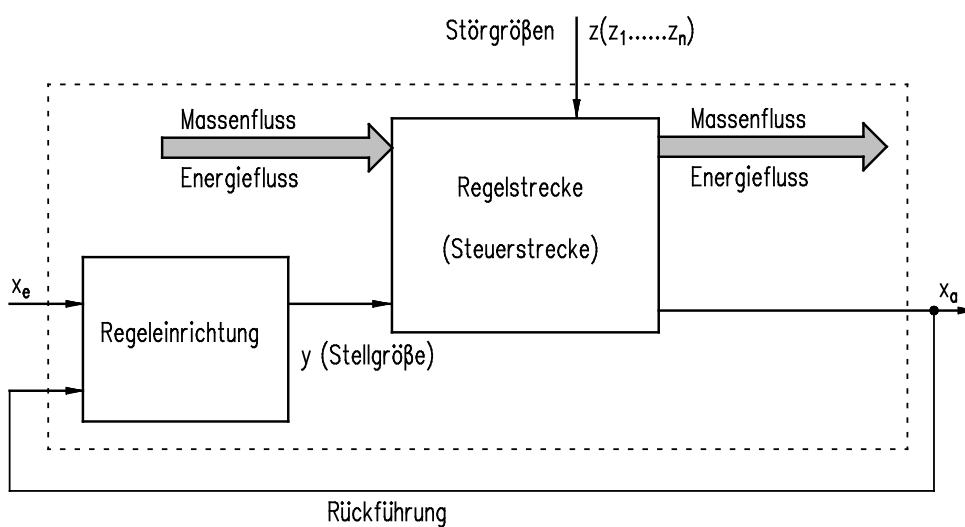
## 1 Regelkreiselemente

## Aufgabe 1

Steuerung:

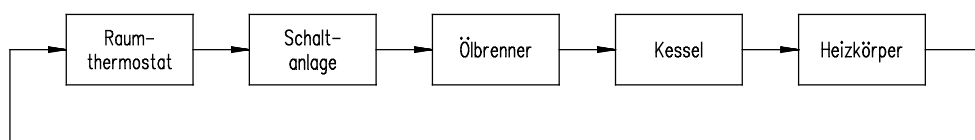


Regelung: Es existiert zusätzlich eine Rückführung und eine Regeleinrichtung.



## Aufgabe 2

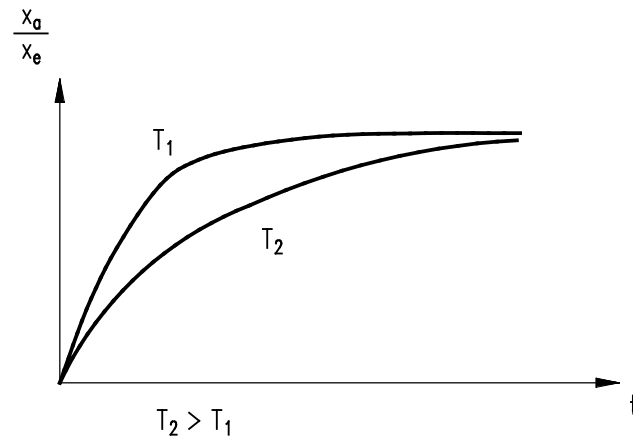
Lösungsskizze:



## Lösungen

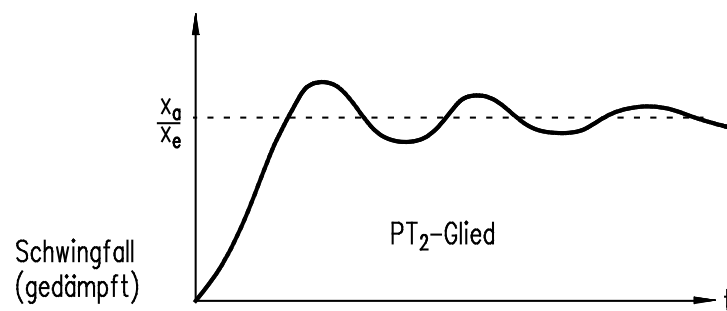
### Aufgabe 3

Lösungshinweis: siehe „PT<sub>1</sub>-Regler“



### Aufgabe 4

Lösungshinweis: siehe „PT<sub>2</sub>-Regler“

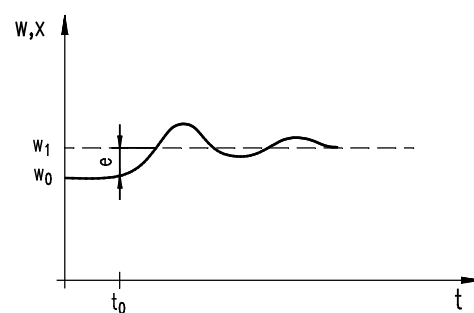


## 2 Regelkreise

### Aufgabe 1

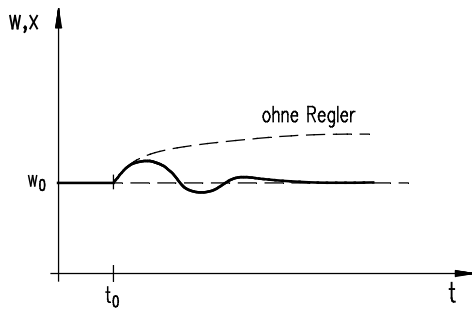
Führungsverhalten:

Änderungen der Führungsgröße wirken direkt auf die Regeleinrichtung.



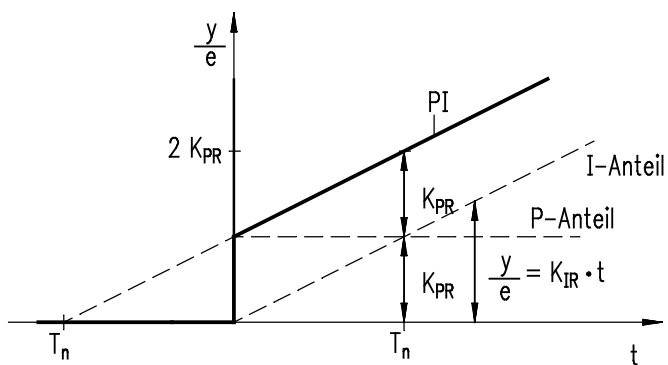
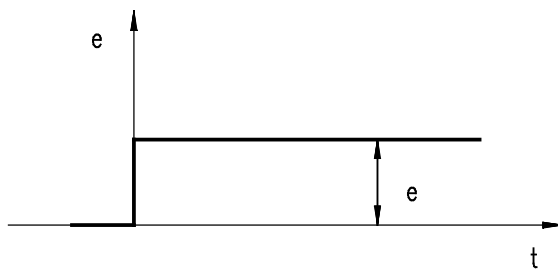
Störverhalten:

Störungen wirken sich unterschiedlich aus.



## Aufgabe 2

Der P-Anteil bewirkt eine schnelle Reaktion. Der I-Anteil verhindert eine bleibende Regelabweichung im Führungs- und Störverhalten.

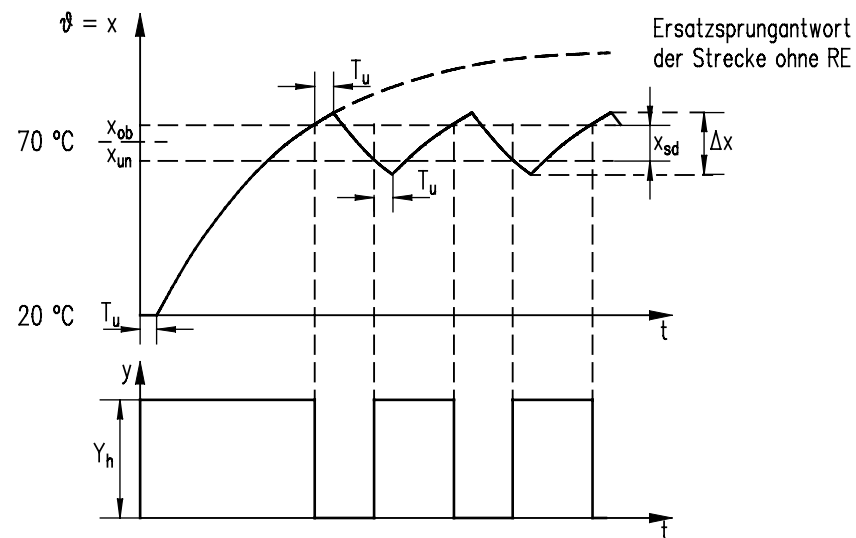


$$K_{IR} = \frac{K_{PR}}{T_R}$$

$$T_n = \frac{K_{PR}}{K_{IR}}$$

### Aufgabe 3

#### Zweipunktregelung



### Aufgabe 4

Die Hysterese ist der Abstand zwischen Ein- und Ausschaltpunkt.

#### 3 Ermittlung von Einstelldaten für Regler

### Aufgabe 1

Die Regelung arbeitet nicht stabil.

### Aufgabe 2

Nach Störgrößenänderung bzw. Führungsgrößenänderung erreicht die Regelgröße wieder einen Beharrungszustand.

### Aufgabe 3

$$K_P = 4,5$$

$$T_n = 15,3\text{ s}$$