



WISSEN

Regeltechnik

[siemens.com/buildingtechnologies](https://www.siemens.com/buildingtechnologies)

SIEMENS

Inhalt

1	Einleitung.....	6
1.1.	Behaglichkeit.....	6
1.1.1.	Physikalische Größen.....	6
1.1.2.	Gewährleistung der Behaglichkeit.....	6
1.1.3.	Behaglichkeitsfelder.....	7
1.1.4.	Einfluss von HLK-Anlagen auf die Behaglichkeit.....	8
1.2.	Energieaufwand für den Betrieb der HLK-Anlage.....	8
1.3.	Regel- und Steuereinrichtungen für HLK-Anlagen.....	8
1.3.1.	Funktionen für die Automation von HLK-Anlagen.....	8
2	Steuern und Regeln.....	9
2.1.	Vergleich zwischen Steuern und Regeln.....	9
2.2.	Wichtige Fachbegriffe.....	10
2.3.	Steuern.....	11
2.3.1.	Ziel einer Steuerung:.....	11
2.3.2.	Funktion einer Steuerung.....	11
2.3.3.	Arten von Steuerungen.....	11
2.3.4.	Typisches Beispiel einer Steuerung.....	11
2.3.5.	Das Steuerungsmodell.....	12
2.3.6.	Der Wirkungsplan.....	13
2.4.	Regeln.....	13
2.4.1.	Ziele einer Regelung.....	13
2.4.2.	Funktion einer Regelung.....	14
2.4.3.	Das Regelkreismodell.....	14
2.4.4.	Der Wirkungsplan.....	15
2.4.5.	Automatische Regelung.....	17
3	Die Regelstrecke.....	18
3.1.	Anlageteile.....	18
3.1.1.	Stellglied.....	18
3.1.2.	Übertrager.....	18
3.1.3.	Messort.....	18
3.1.4.	Fühler.....	19
3.2.	Übertragungsverhalten.....	20
3.2.1.	Leistungszufuhr.....	20
3.2.2.	Ablauf in der Regelstrecke.....	20
3.2.3.	Zeitliches Verhalten der Regelgröße.....	20
3.3.	Einfache Strecke.....	21
3.3.1.	Schema einer einfachen Strecke (Einspeicherstrecke).....	21
3.3.2.	Sprungantwort der Regelstrecke.....	21
3.3.3.	Übertragungsbeiwert K_s der Regelstrecke.....	22
3.3.4.	Stellbereich Y_h und Regelbereich X_h der Strecke.....	23
3.3.5.	P-T ₁ -Glied (Strecke 1. Ordnung).....	24
3.3.6.	Kenngrößen.....	25
3.3.7.	Regelkennlinie.....	28
3.3.8.	Zusammenfassung Einfache Strecke.....	30

3.4.	Mehrspeicherstrecken	31
3.4.1.	Speicher	31
3.4.2.	Kenngößen	32
3.4.3.	Zusammenfassung Mehrspeicherstrecke.....	35
4	Regeleinrichtung	36
4.1.1.	Der Sollwertgeber (Führungsgeber)	36
4.1.2.	Der Regler	36
4.1.3.	Der Stellantrieb.....	37
4.1.4.	Stellgeräte	37
4.1.5.	Funktion einer Regeleinrichtung.....	38
4.1.6.	Anwendungstechnischer Wirksinn einer Regeleinrichtung.....	40
5	Regler	41
5.1.	Ziel der Regelung	41
5.2.	Verwendete Reglertypen	41
5.2.1.	Reglertypen	41
5.2.2.	Kombination von Reglern und Regelgliedern	42
5.3.	P-Regler (Proportional-Regler).....	42
5.3.1.	Übertragungsverhalten	42
5.3.2.	Eigenschaften des P-Reglers	44
5.3.3.	Der Proportionalbereich X_P (P-Band)	44
5.3.4.	Offset des P-Reglers (Grundeinstellung).....	47
5.3.5.	Übertragungsbeiwert K_P	49
5.3.6.	Wirkssinn.....	50
5.3.7.	Typische Anwendung für P-Regler.....	51
5.3.8.	Zusammenfassung P-Regler.....	52
5.4.	I-Regler (Integral-Regler).....	53
5.4.1.	Beispiel für einen I-Regler	54
5.4.2.	Übertragungsverhalten	54
5.4.3.	Richtungsänderung von e	57
5.4.4.	Erkenntnis.....	58
5.4.5.	Zusammenfassung I-Regler	59
5.5.	PI-Regler	60
5.5.1.	Kombination von P- und I-Regler	60
5.5.2.	Übertragungsverhalten	60
5.5.3.	Nachstellzeit T_n	62
5.5.4.	Erkenntnis.....	63
5.5.5.	Typische Anwendungen für PI-Regler.....	63
5.5.6.	Zusammenfassung PI-Regler.....	64
5.6.	D-Glied (Differential-Glied)	65
5.6.1.	Übertragungsverhalten	66
5.6.2.	Differenzierbeiwert K_D	67
5.7.	PD-Regler.....	68
5.7.1.	Übertragungsverhalten	68
5.7.2.	Vorhaltezeit T_v	69
5.7.3.	Wie arbeitet der D-Anteil mit der Vorhaltezeit T_v ?	70
5.7.4.	Erkenntnis.....	71
5.7.5.	Typische Anwendung für PD-Regler	72

5.8.	PID-Regler	74
5.8.1.	Übertragungsverhalten.....	74
5.8.2.	Erkenntnis PID-Regler	75
5.8.3.	Typische Anwendung für PID-Regler.....	76
5.8.4.	Zusammenfassung.....	77
6	Der geschlossene Regelkreis	78
6.1.	Mögliche Einschwingverhalten der Regelgröße.....	78
6.2.	Ziel der Regelung.....	79
6.3.	Einflüsse auf das Regelverhalten.....	81
6.3.1.	Führungsverhalten	81
6.3.2.	Störverhalten.....	81
6.4.	Reglerparameter	81
6.5.	Reglereinstellregeln	82
6.5.1.	Reglereinstellregeln nach Ziegler / Nichols.....	82
6.5.2.	Reglereinstellregeln nach Chien / Hrones / Reswick (C/H/R).....	83
6.5.3.	Kreisverstärkung V_0	84
6.6.	Einschwingvorgänge.....	86
6.6.1.	Begriffe.....	86
6.6.2.	Optimierter Einschwingvorgang eines P-Reglers.....	87
6.6.3.	Optimierter Einschwingvorgang eines PI-Reglers.....	88
6.6.4.	Optimierter Einschwingvorgang eines PD-Reglers	89
6.6.5.	Optimierter Einschwingvorgang eines PID-Reglers	90
7	Anhang.....	91
7.1.	DIN IEC 60050-351:2014-09.....	91
7.1.1.	Elementares Regelungssystem	91
7.1.2.	Sprungantwort.....	91

1 Einleitung

Die Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK) hat das Ziel, das Innenklima behaglich zu halten, damit sich die Gebäudenutzer wohl fühlen.

Die Komfortanforderungen sind im Tagesverlauf unterschiedlich. Um den Bedürfnissen der Nutzer jederzeit gerecht zu werden, werden HLK-Anlagen mit Steuerungen und Regeleinrichtungen ausgerüstet. Mit den Steuerungen und Regelungen kann nicht nur die Behaglichkeit gewährleistet, sondern auch Energie gespart werden.

1.1. Behaglichkeit

1.1.1. Physikalische Größen

Die nachfolgenden physikalischen Größen haben Einfluss auf unsere Behaglichkeit.

Lufttemperatur

In einem gewissen Temperaturbereich fühlen wir uns wohl. Bei unveränderter Bekleidung beginnen wir, über diesem Temperaturbereich zu schwitzen und darunter zu frieren.

Wärmestrahlung

An einem klaren, sonnigen Tag fühlen wir uns draußen auch bei erstaunlich tiefen Temperaturen noch wohl.

In einem Kellerraum mit kalten Betonwänden beginnen wir bei einer Raumtemperatur von 22 °C nach einiger Zeit zu frieren.

Luftfeuchtigkeit

Bei hoher Luftfeuchtigkeit fühlen wir uns nur noch in einem eingeschränkten Temperaturbereich wohl. Hohe Luftfeuchtigkeit über lange Zeit kann zu Schimmelpilzbildung führen.

Bei sehr tiefer Luftfeuchtigkeit können Haut und Schleimhäute unangenehm trocken werden.

Luftgeschwindigkeit

Mit steigender Luftgeschwindigkeit steigt der Wärmeaustausch an der Hautoberfläche. Wir empfinden Luftbewegung als kalt.

Luftqualität

Ist die Luftqualität ungenügend, so sinkt unsere Konzentrationsfähigkeit und Müdigkeit tritt ein.

1.1.2. Gewährleistung der Behaglichkeit

Einige der physikalischen Größen beeinflussen unser Wohlbefinden gegenseitig.

Damit wir uns wohl fühlen, werden Maßnahmen getroffen. Beispiele:

- Wärmestrahlung und Luftgeschwindigkeit können durch bautechnische Maßnahmen an der Gebäudehülle und den Vorrichtungen für den Lufteinlass, sowie durch den Einsatz von Strahlungsflächen beeinflusst werden.
- In Gebäuden können Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftqualität durch Regelung der entsprechenden HLK-Aggregate beeinflusst werden.
- In einem begrenzten Ausmaß beeinflussen wir unser Wohlbefinden auch durch die Wahl geeigneter Bekleidung.

Ein behagliches Raumklima ist wichtig. Unsere Leistungsfähigkeit und Gesundheit werden stark von unserem Wohlbefinden geprägt. Es lohnt sich daher, auch im physikalischen Sinne für ein behagliches Raumklima zu sorgen.

1.1.3. Behaglichkeitsfelder

Ein Behaglichkeitsfeld definiert die Grenzen innerhalb von physikalischen Größen, in denen wir uns wohl fühlen.

Die Grenzwerte (Minimum, Maximum) einer Behaglichkeitsgröße können sich dabei in Abhängigkeit anderer Größen ändern.

Behaglichkeitsfeld Lufttemperatur

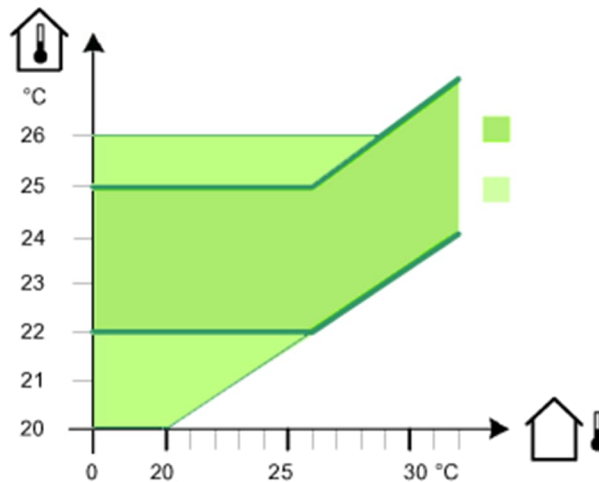


Fig. 1-1 Behaglichkeitsfeld Lufttemperatur

Das Behaglichkeitsfeld der Raumlufttemperatur zeigt, in welchen Grenzen wir uns im Raum bei einer bestimmten Aktivitätsstufe, also der Leistung unseres Körpers, wohl fühlen.

Die Grenzwerte der Behaglichkeit im Raum sind von der Außentemperatur abhängig.

Behaglichkeitsfeld Lufttemperatur / Luftfeuchtigkeit

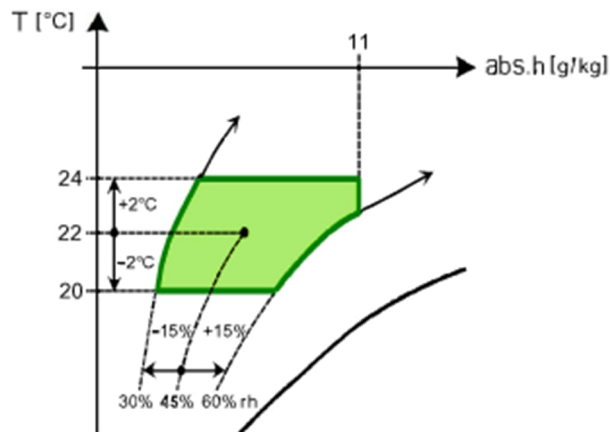


Fig. 1-2 Behaglichkeitsfeld Lufttemperatur / Luftfeuchtigkeit

Eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 30...60 % hat kaum Einfluss auf die Temperatur des Behaglichkeitsfeldes.

Über 23 °C wird es ab 60 % relative Luftfeuchtigkeit weniger behaglich. Unter 30 % Luftfeuchtigkeit nimmt die Behaglichkeit ebenfalls ab.

1.1.4. Einfluss von HLK-Anlagen auf die Behaglichkeit

Je nach Forderung an das Raumklima und verfügbarer Energie werden HLK-Anlagen mit verschiedenen Aggregaten aufgebaut.

Die Wirkung der Aggregate kann durch das Verstellen ihres Stellgliedes dosiert werden.

Die Lufttemperatur

Die Lufttemperatur kann durch Heizen und Kühlen mit Hilfe verschiedener Aggregate beeinflusst werden. Im Raum sind dies meistens Wärmeübertrager wie Radiatoren, Bodenheizungen, oder Elektro-Lufterwärmer. Im Zuluftkanal sind dies meistens wasserdurchflossene Lufterwärmer und Luftkühler, oder auch Elektro-Lufterwärmer.

Die Luftqualität

Die Luftqualität kann durch Verändern der Zuluftmenge mit Hilfe von Luftklappen oder Ventilator Drehzahlen beeinflusst werden.

Die Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit kann bei gleich bleibender Lufttemperatur nur geändert werden, wenn eine Kombination von Aggregaten eingesetzt wird. Befeuchtet wird z.B. mit einem Luftwäscher, gefolgt von einem Tropfenabscheider und einem Lufterwärmer. Entfeuchtet wird z.B. mit einem Luftkühler (Kondensieren von Luftfeuchtigkeit), gefolgt von einem Lufterwärmer.

1.2. Energieaufwand für den Betrieb der HLK-Anlage

Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen müssen HLK-Anlagen folgendermaßen eingestellt werden:

- Es wird nur ein minimaler Aufwand an Betriebsenergie benötigt.
- Die Behaglichkeit wird nur während der Belegungszeit gewährleistet.
- Die Energieverluste sind möglichst minimal.

Die Verluste können zum Beispiel durch bedarfsgesteuerte Energieproduktion und -transportleistung verkleinert werden.

Betriebsenergie kann eingespart werden, wenn die Ansprüche an das Raumklima während der Nichtbelegung herabgesetzt werden. Die HLK-Anlage wird dann nicht, oder nur mit reduzierter Leistung betrieben.

1.3. Regel- und Steuereinrichtungen für HLK-Anlagen

1.3.1. Funktionen für die Automation von HLK-Anlagen

Um den Betrieb von HLK-Anlagen zu automatisieren, benötigen wir Einrichtungen für die folgenden Funktionen:

- **Regeln**
Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftqualität, Luftdruck, usw.
- **Steuern**
Betrieb, Belegung oder Abwesenheit, Frostschutz, usw.
- **Führen**
Verschieben von Sollwerten, Behaglichkeitsfeldern, usw.
- **Optimieren**
Start-/Stopp-Zeitpunkt des Belegungsbetriebes, usw.
- **Überwachen**
Rückmeldungen von Ventilatoren, Luftfiltern, usw.

2 Steuern und Regeln

In der Alltagssprache wird zwischen „Steuern“ und „Regeln“ oft nicht unterschieden. Beide Begriffe werden als Synonyme gebraucht.

Dies ist allerdings nicht richtig. Der wesentliche Unterschied zwischen Steuern und Regeln ist am Verhalten der Steuer- oder Regeleinrichtung bei Störungen erkennbar.

2.1. Vergleich zwischen Steuern und Regeln

Steuern

Steuern ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Eingangsgröße(n) auf Grund einer der Anwendung entsprechend festgelegten Gesetzmäßigkeit eine oder mehrere Ausgangsgrößen beeinflussen.

Eine Rückwirkung auf die Eingangsgröße besteht nicht.

→ Offener Wirkungsablauf

Beispiel: Lenken eines Autos

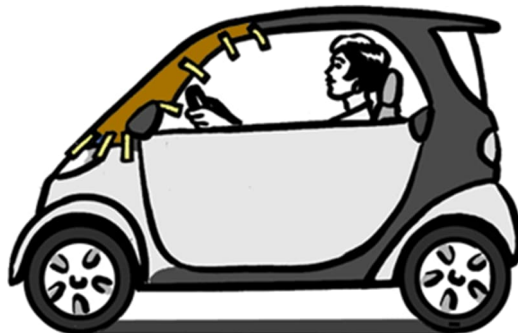
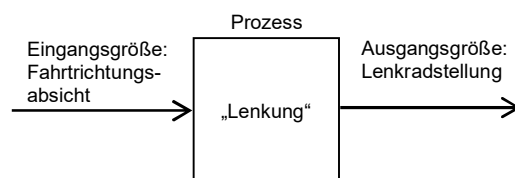


Fig. 2-1 Autofahren: FahrerIn lenkt mit verdeckter Sicht – keine Rückmeldung.



Ziel einer Steuerung:

Durch eine Steuerung soll ein Ausgangswert aufgrund von einem Eingangswert und festgelegten Gesetzmäßigkeiten beeinflusst werden.

Die Autofahrerin achtet nicht auf die Straße und korrigiert den eingeschlagenen Kurs nicht. Der Sollwert (Auto soll auf der Fahrbahn bleiben) wird nicht mit dem Istwert (eingeschlagener Kurs des Autos) abgeglichen.

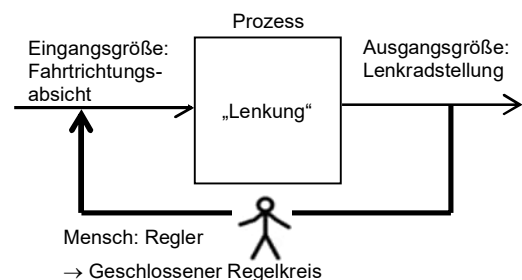
Regeln

Regeln ist ein Vorgang in einem System, bei dem fortlaufend eine physikalische Größe (Regelgröße) gemessen, mit einer Führungsgröße verglichen, und im Sinne einer Angleichung durch eine Ausgangsgröße beeinflusst wird.

→ Geschlossener Wirkungsablauf



Fig. 2-2 Autofahren: FahrerIn lenkt (regelt)



Ziel einer Regelung:

Die Regelgröße (Istwert) soll fortlaufend dem Wert der Führungsgröße (Sollwert) nachgeführt werden (möglichst ohne Abweichung).

Die Autofahrerin hat die Funktion eines Reglers. Sie überprüft fortlaufend, ob das Auto auf der vorgesehenen Spur (Sollwert) fährt. Sie korrigiert Fahrtrichtungsfehler laufend am Lenkrad. Sie bringt so die Fahrtrichtung des Autos (Istwert) immer wieder auf die gewünschte Spur (Sollwert).

2.2. Wichtige Fachbegriffe

Führungsgröße w (Sollwert)

Die Führungsgröße w ist die Eingangsgröße im System.

Stellgröße y

Die Stellgröße y ist die Ausgangsgröße im System.

Steuergröße / Regelgröße x (Istwert)

Die Steuergröße / Regelgröße x ist die von der Steuerung / Regelung beeinflusste Größe im System. Ihr Wert wird durch die Auslegung geplant.

Störgröße z

Tritt eine Störung auf das System ein, so kann die Steuergröße / Regelgröße x vom geplanten Wert abweichen.

Beachte:

Die in diesem Dokument verwendeten Buchstaben entsprechen den Abkürzungen nach DIN IEC 60050-351.

Beispiel Autofahren

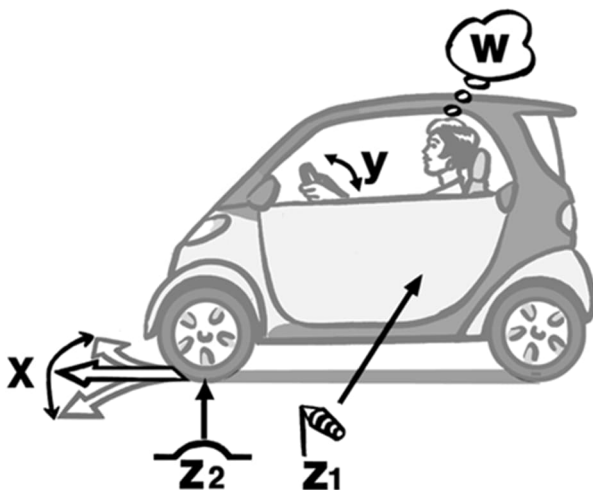


Fig. 2-3 Steuer- und Regelgrößen beim Autofahren

w	Führungsgröße	Fahrtrichtungsabsicht (Wunsch der Fahrerin)
x	Regelgröße	Reale Fahrtrichtung
y	Stellgröße	Lenkradstellung
z_1, z_2	Störgrößen	z.B. Seitenwind, Bodenunebenheiten, ...

2.3. Steuern

2.3.1. Ziel einer Steuerung:

Steuern ist ein Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Eingangsgröße(n) auf Grund einer der Anwendung entsprechend festgelegten Gesetzmäßigkeit eine oder mehrere Ausgangsgröße(n) beeinflussen.

Eine Rückwirkung auf die Eingangsgröße besteht nicht. Es ist ein offener Wirkungsablauf.

2.3.2. Funktion einer Steuerung

Steuern ist eine fortlaufend wiederkehrende Folge von:

- Führungsgröße w messen oder erfassen
- Stellgröße y berechnen
- Stellgröße y ausgeben

2.3.3. Arten von Steuerungen

Das gesamte Anwendungsfeld der Steuertechnik ist sehr umfangreich. Für den Einsatz in HLK-Anlagen unterscheiden wir folgende Arten von Steuerungen:

- Steuerungen logischer Art
- Steuerungen hierarchischer Art
- Steuerungen signalverändernder Art

In diesem Dokument werden ausschließlich Steuerungen signalverändernder Art beschrieben.

2.3.4. Typisches Beispiel einer Steuerung

Raumtemperatursteuerung mit Hilfe von Außenluft

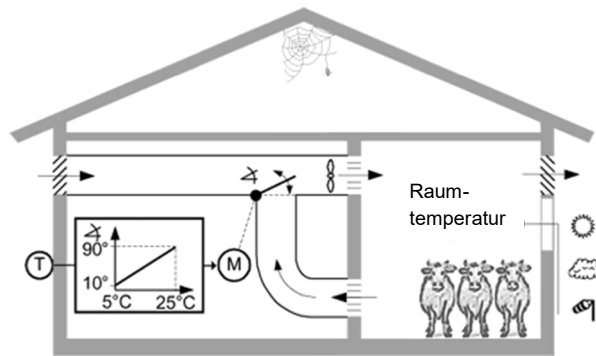


Fig. 2-4 Raumtemperatursteuerung über Außenluft

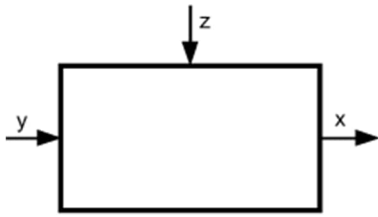
Die Lüftungsanlage dieses Kuhstalls ist mit einer Steuerung ausgerüstet.

- Führungsgröße ist die Außentemperatur. Sie beeinflusst die Stellung der Luftklappe.
- Steuergröße ist die resultierende Raumtemperatur.
- Sonne, Wolken und Wind sind Störgrößen.

2.3.5. Das Steuerungsmodell

Die Steuerung besteht aus den zwei Teilen Steuerstrecke und Steuereinrichtung.

Steuerstrecke



Die Steuerstrecke ist der aufgabenmäßig zu beeinflussende Teil des Systems oder der entsprechende Teil des Wirkungsplans.

Ist die Steuerstrecke Teil einer HLK-Anlage, so beginnt sie am Eingang mit der Stellgröße y und endet am Ausgang mit der zu beeinflussenden physikalischen Steuergröße x .

Die Steuerstrecke selbst ist oft Störungen z ausgesetzt. Diese können am Eingang (z.B. in der Energiezufuhr vor dem Stellglied) oder in der Strecke selbst auftreten.

Steuereinrichtung



Die Steuereinrichtung ist der beeinflussende Teil einer Steuerung. Sie enthält die anwendungstechnisch festgelegte Gesetzmäßigkeit, wie die Steuerstrecke beeinflusst werden soll.

Die Steuereinrichtung beginnt am Eingang mit der Führungsgröße w und endet am Ausgang mit der Stellgröße y . (Es sind auch mehrere Führungsgrößen und Stellgrößen möglich.)

Steuerungsmodell

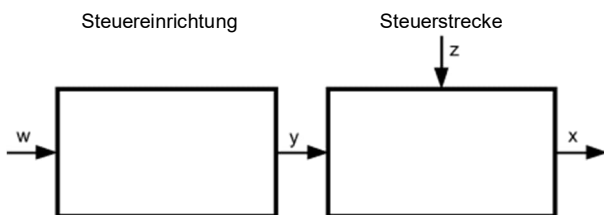


Fig. 2-5 Steuereinrichtung und Steuerstrecke

Das Steuerungsmodell entsteht aus der Verbindung von Steuereinrichtung und Steuerstrecke. Mit diesem abstrakten Modell kann ein gesteuertes System genauer erfasst und systematisch zerlegt werden.

Der Signalfluss erfolgt grundsätzlich immer in der Richtung von der Führungsgröße w zur Steuergröße x . Die Steuereinrichtung wirkt immer auf die Steuerstrecke.

2.3.6. Der Wirkungsplan

Weitere funktionelle Details sind in dieser abstrakten Form kaum mehr erkennbar. Dies wird erst möglich, wenn nebst dem Modell ein konkreter Wirkungsplan vorliegt.

Der Wirkungsplan entsteht durch Verfeinerung von Steuereinrichtung und Steuerstrecke mit Hilfe von Bausteinen und Wirkrichtung. Er stellt die Funktion einer Steuerung präziser dar.

Das Ergebnis ist immer auf ein Objekt ausgerichtet:

- Das Anlageschema zeigt die Steuerstrecke.
- Das Funktions-Blockschaltbild zeigt die Steuereinrichtung.

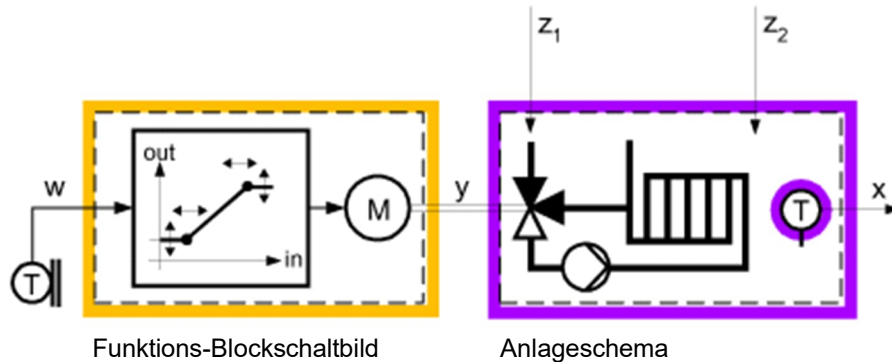


Fig. 2-6 Funktions-Blockschaltbild und Anlageschema

Die Funktions-Blockschaltbilder und Anlageschemata werden aus verschiedenen Bausteinen aufgebaut.

Die Bausteine sind:

- Komponenten oder Aggregate für die Anlage
- Funktionsbausteine für die Anlagefunktion

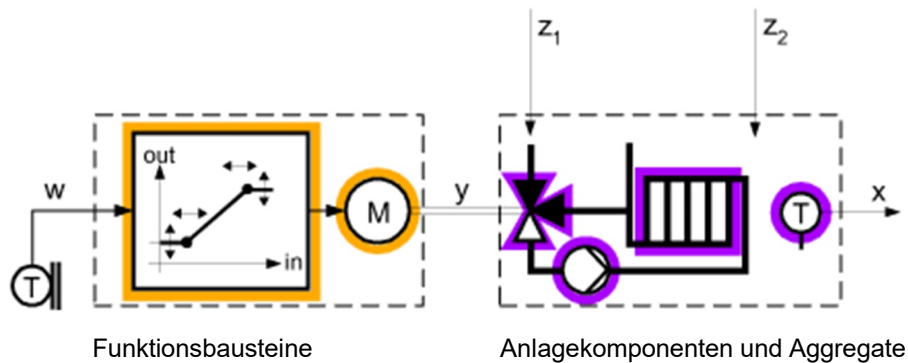


Fig. 2-7 Bausteine im Wirkungsplan

2.4. Regeln

2.4.1. Ziele einer Regelung

Regeln ist ein Vorgang in einem System, bei dem fortlaufend eine physikalische Größe (Regelgröße) gemessen, mit einer Führungsgröße verglichen, und im Sinne einer Angleichung durch eine Ausgangsgröße beeinflusst wird.

Es ist ein geschlossener Wirkungsablauf (Regelkreis).

2.4.2. Funktion einer Regelung

Regeln ist eine fortlaufend wiederkehrende Folge von:

- Regelgröße x messen
- Regelgröße x mit Führungsgröße w vergleichen
- Stellgröße y berechnen
- Stellgröße y ausgeben

2.4.3. Das Regelkreismodell

So wie die Steuerungen werden auch Regelungen in Modellen dargestellt. Regeln ist ein geschlossener Kreislauf, deshalb spricht man vom Regelkreismodell.

Eine Regelung besteht aus den zwei Teilen Regelstrecke und Regeleinrichtung.

Regelstrecke

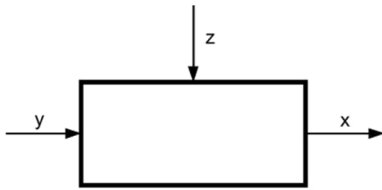


Fig. 2-8 Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der aufgabenmäßig zu beeinflussende HLK-Anlagenteil eines Systems.

Die Regelstrecke beginnt am Stellort, wo die Stellgröße y den Massen- oder Energiestrom dosiert und endet am Messort mit dem Fühler zum Erfassen der Regelgröße x .

Störungen in der Strecke sind wechselnde Lastzustände. Sie führen zu einer Veränderung der Regelgröße, falls der Massen- oder Energiestrom nicht entsprechend nachgestellt wird.

Regeleinrichtung

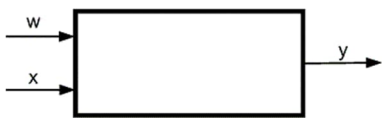


Fig. 2-9 Regeleinrichtung

Die Regeleinrichtung ist der beeinflussende Teil einer Regelung.

Sie hat die Aufgabe, den Massen- oder Energiestrom der Regelstrecke so zu dosieren, dass die Regelgröße auf dem Wert der Führungsgröße gehalten wird.

Die Regeleinrichtung beginnt am Eingang mit der Erfassung der Regelgröße x und endet am Ausgang mit der Stellgröße y . Damit die Führungsgröße w erfasst werden kann, benötigt die Regeleinrichtung einen zweiten Eingang.

Regelkreis und Regelkreismodell

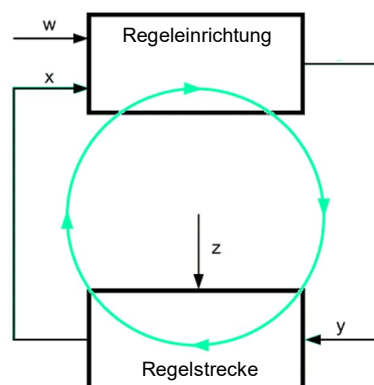


Fig. 2-10 Regelkreismodell

Der Regelkreis entsteht durch die Verbindung von Regelstrecke und Regeleinrichtung zu einem geschlossenen Wirkungsablauf.

Der Ausgang der Regelstrecke wird mit dem Eingang der Regeleinrichtung verbunden, der Ausgang der Regeleinrichtung mit dem Eingang der Regelstrecke.

Das Regelkreismodell ist die abstrakte Darstellung des geschlossenen Regelkreises.

Der Signalfluss findet im Kreis statt (Darstellung üblicherweise im Uhrzeigersinn).

Funktion des Regelkreises

Durch den geschlossenen Kreis kann die Regeleinrichtung, auf die Regelstrecke einwirken und die Regelgröße zielgerecht beeinflussen.

2.4.4. Der Wirkungsplan

Wie bei der Steuerung, braucht es auch beim Regelkreis neben dem Modell einen konkreten Wirkungsplan, um funktionelle Details zu erkennen.

Der Wirkungsplan entsteht durch die Verfeinerung von Regeleinrichtung und Regelstrecke mit Hilfe von Bausteinen und Wirkrichtung. Er stellt die Funktion einer Regelung präziser dar.

Das Ergebnis ist immer auf ein Objekt ausgerichtet:

- Das Anlageschema zeigt die Regelstrecke.
- Das Funktions-Blockschaltbild zeigt die Regeleinrichtung.

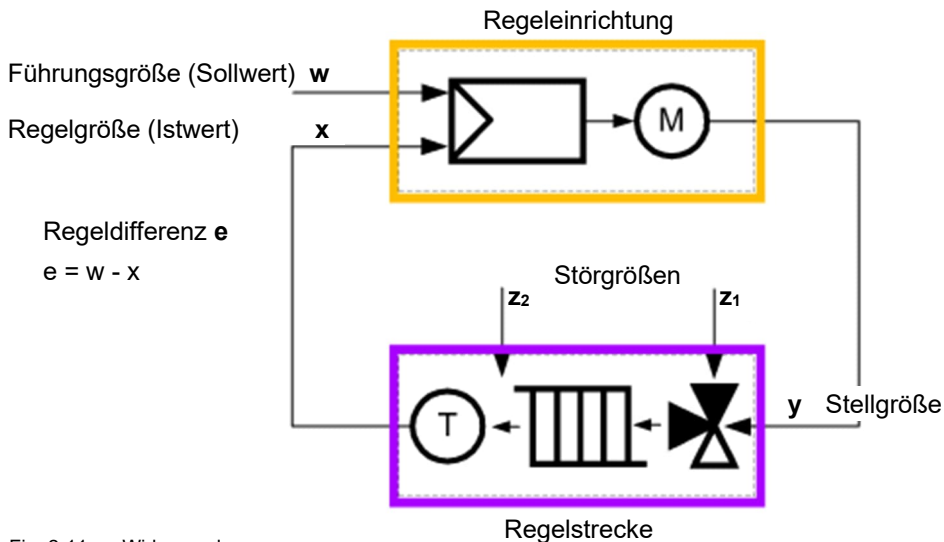


Fig. 2-11 Wirkungsplan

Regelkreisglieder

Die Funktions-Blockschaltbilder und Anlage-Schemata werden aus verschiedenen Bausteinen aufgebaut. Diese Bausteine werden in den DIN-Normen als Regelkreisglieder bezeichnet.

Die Regelkreisglieder sind:

- Komponenten oder Aggregate für die Anlage
- Funktionsbausteine für die Anlagefunktion.

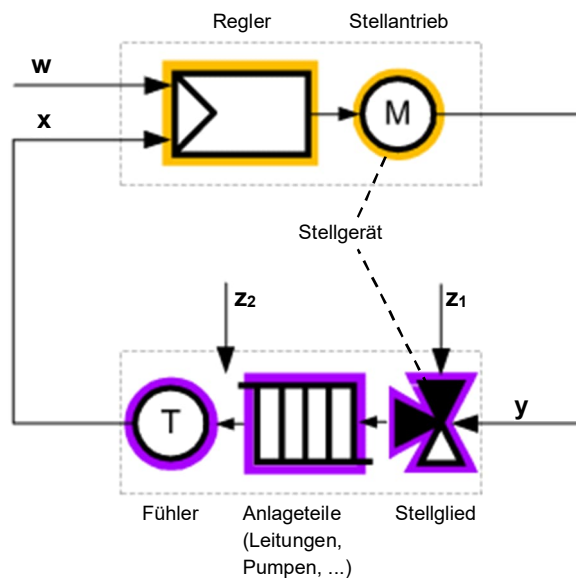


Fig. 2-12 Regelkreisglieder im Wirkungsplan

Beispiel 1, Lenken eines Autos

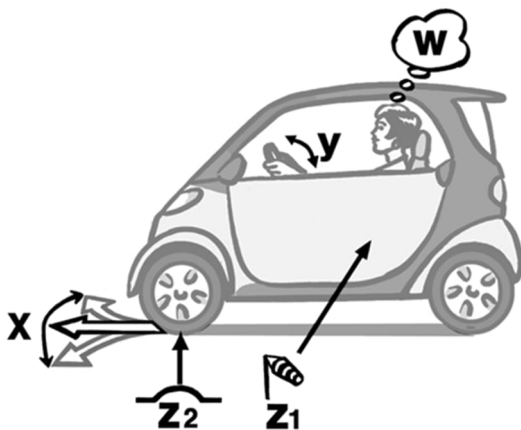


Fig. 2-13 Lenken eines Autos
Mensch als Regeleinrichtung, ...
w Sollwert Fahrtrichtungsabsicht
x Istwert Reale Fahrtrichtung
y Stellgröße Lenkradstellung
z₁, z₂ Störgrößen Seitenwind, Unebenheiten

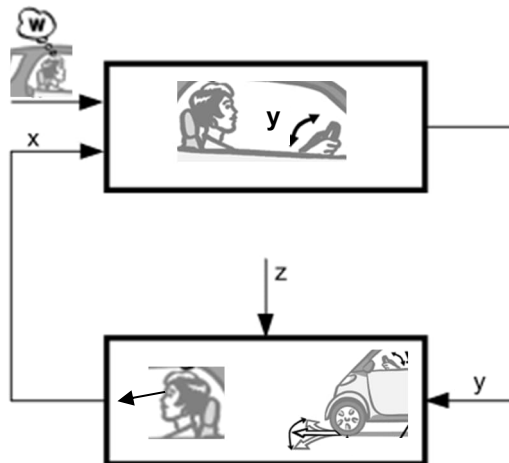


Fig. 2-14 Regelkreismodell
Sollwert w im Hirn der Fahrerin
Regler im Hirn der Fahrerin
Stellantrieb = Hände am Steuerrad
Stellglied = Lenkung im Auto
Fühler = Augen der Lenkerin

Beispiel 2, Regelung einer Raumheizung von Hand

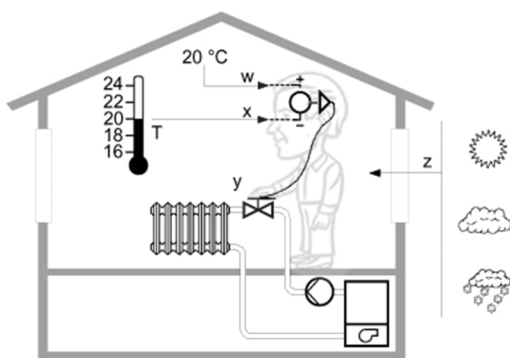


Fig. 2-15 Regelung einer Raumheizung von Hand,
Mensch als Regeleinrichtung, ...
w Führungsgröße
x Regelgröße
y Stellgröße
z Störgrößen

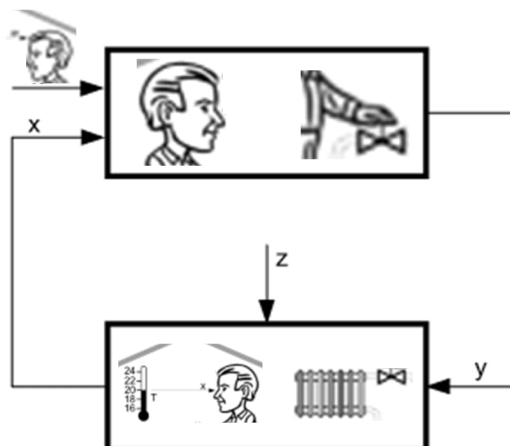


Fig. 2-16 Regelkreismodell
Sollwert w im Hirn des Mannes
Regler im Hirn des Mannes
Stellantrieb = Hand am Ventilrad
Stellglied = Ventil in Leitung
Fühler = Augen des Mannes

Der Raumnutzer vergleicht die Regelgröße x (momentane Raumtemperatur) mit dem Sollwert w (gewünschte Raumtemperatur). Ist die Regelgröße zu groß, so schließt er das Stellglied, ist die Regelgröße zu klein, so öffnet er es.

2.4.5. Automatische Regelung

Ziel der automatischen Regelung

Der Regler soll mit Hilfe von Einstellwerten möglichst gut an die Gegebenheiten der Anlage angepasst werden und zwar so, dass ein möglichst stabiles Verhalten der Regelung resultiert und Veränderungen genügend schnell ausgeregelt werden.

Beispiel: Automatische Regelung einer Raumheizung

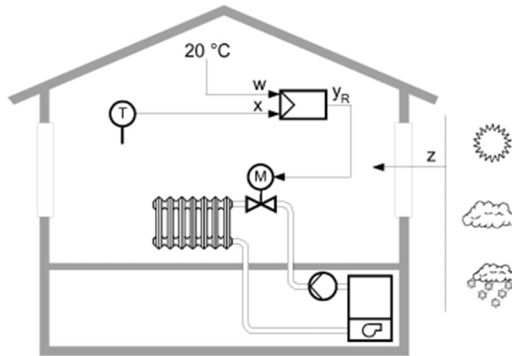


Fig. 2-17 Automatische Regelung einer Raumheizung

w Führungsgröße
x Regelgröße
 y_R Stellgröße
z Störgrößen
T Temperaturfühler
M Stellantrieb

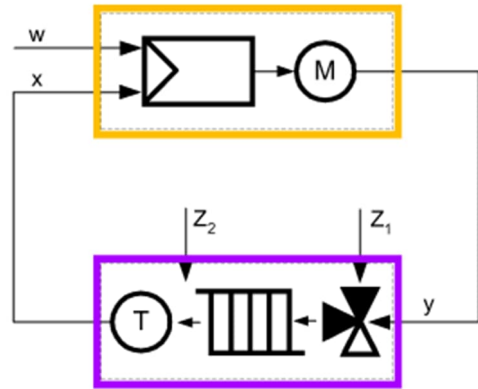


Fig. 2-18 Regelkreismodell
Automatische Regelung einer Raumheizung

Der Regler macht im Prinzip dasselbe wie der Mensch im vorangehenden Beispiel.

Der Regler benötigt einen Fühler zum Erfassen der Regelgröße und einen Stellantrieb zum Umsetzen der Stellgröße am Stellglied.

3 Die Regelstrecke

Die Regelstrecke hat auf die Auswahl und Einstellung der Regeleinrichtung, wie auch auf die mögliche Regelgüte der Anlage einen ganz entscheidenden Einfluss.

3.1. Anlageteile

Die Regelstrecke wird mit Hilfe von Komponenten und Aggregaten verfeinert.

Die meisten Regelstrecken in HLK-Anlagen enthalten folgende Bausteine:

- Stellglied
- Übertrager
- Messort
- Fühler

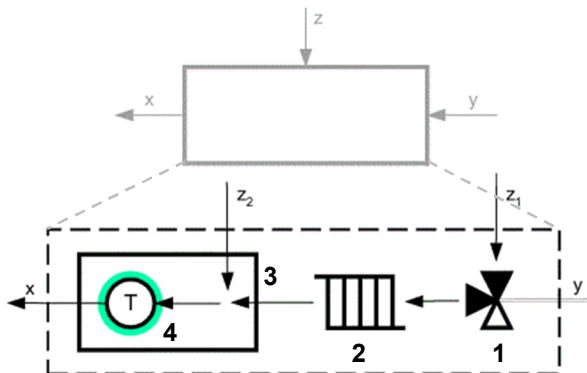


Fig. 3-1 Regelstrecke
1 Stellglied
2 Wärmeübertrager
3 Messort
4 Fühler

3.1.1. Stellglied

Das Stellglied wandelt die Stellgröße y in einen Massen-, Energie- oder Mischstrom um.

Beispiele:

- Durchlassventile, Mischventile (Wasser)
- Luftdurchlassklappen, Luftmischklappen
- Stromventile (Elektroheizung)

3.1.2. Übertrager

Viele Anlagen sind mit Wärmeübertragern ausgerüstet.

Beispiele:

- Radiatoren, Kühldecken (Wasser → Luft)
- Heizregister, Kühlregister (Wasser ↔ Luft)
- Kreislaufftrennende Wärmeübertrager (Wasser, Luft)

3.1.3. Messort

Der Messort ist der Ort, an dem die Regelgröße gelten soll.

Beispiele:

- Raum (Abgrenzung eines Komfortfeldes)
- Wasserrohr
- Luftkanal

3.1.4. Fühler

Der Fühler ist ein Messwertaufnehmer zum Erfassen der Regelgröße am Messort. Die meisten Fühler für HLK-Anlagen wandeln die Regelgröße in eine elektrische Größe um, damit sie von der Regeleinrichtung übernommen werden kann.

Zugehörigkeit des Fühlers zur Regelstrecke

Die Zugehörigkeit des Fühlers ist nicht eindeutig geklärt.

- Nach DIN IEC 60050-351 gehört der Fühler nicht zur Regelstrecke und wird separat behandelt.
- Aus Sicht von Hardware und Herkunft gehört der Fühler zur Regeleinrichtung.
- Aus Sicht der Regelungstechnik gehört der Fühler zur Regelstrecke.

In diesem Dokument wird der Fühler aus folgenden Gründen als Bestandteil der Regelstrecke betrachtet:

- Die Masse des Fühlers bewirkt, dass die gemessene Größe gegenüber der tatsächlichen Regelgröße verzögert verläuft.
- Die Montage des Fühlers kann zu weiteren Abweichungen der Messung führen
 - durch die Ankoppelung an die Regelgröße
 - durch die Ankoppelung an eine Fremdgröße.

Beispiel von Ankoppelungen, Raumlufttemperaturfühler an der Wand:

Der Messwert liegt zwischen Lufttemperatur und Wandtemperatur.

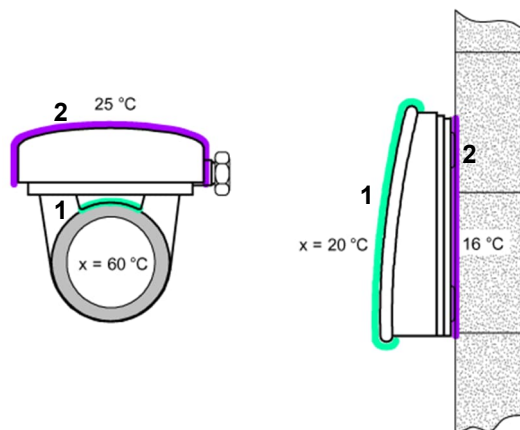


Fig. 3-2 Ankoppelung des Messwertes
1 Ankoppelung an Regelgröße
2 Ankoppelung an Fremdgröße

Aus Sicht der Anwendung will man die Regelgröße regeln.

Der Regler müsste die Regelgröße erfassen können, doch es steht ihm nur die Messgröße zur Verfügung. Die Messgröße weicht um den jeweiligen Messfehler von der Regelgröße ab.

Konsequenzen:

Aus Sicht der Regelung bildet der Messwert die Grenze zwischen Regeleinrichtung und Regelstrecke.

⇒ Der Fühler und seine Einflüsse müssen der Regelstrecke zugeteilt werden.

Wichtig:

Damit die Einflüsse des Fühlers auf die Regelstrecke und der Messfehler tragbar sind, müssen Bauart, Montageort und Montageart des Fühlers jeweils passend gewählt und kritisch beurteilt werden.

3.2. Übertragungsverhalten

3.2.1. Leistungszufuhr

Die maximale Leistungszufuhr in die Strecke hängt von folgenden Faktoren ab:

- Leistungsangebot vor dem Eingang des Stellglieds (1)
(Störungen z_1 wie Schwankungen in Qualität (Temperatur) oder Fördermenge.)
- Leistungsangebot am Eingang des Stellglieds (2)
- Maximaler Durchlass des Stellglieds (2)
- Größe der Wärmeübertrager (3)

3.2.2. Ablauf in der Regelstrecke

- Das Stellglied (1) verändert die Leistungszufuhr in die Strecke.
- Der Wärmeübertrager (2) überträgt Energie vom Stellglied in den Messort (3).
- Die Regelgröße am Messort wird beeinflusst durch:
 - zugeführte Leistung von Stellglied und Wärmeübertrager.
 - zugeführte bzw. abgeführte Leistung von Störungen z_2 .
- Der Fühler (4) erfasst die Regelgröße am Messort und stellt sie zur Übernahme durch die Regeleinrichtung bereit.

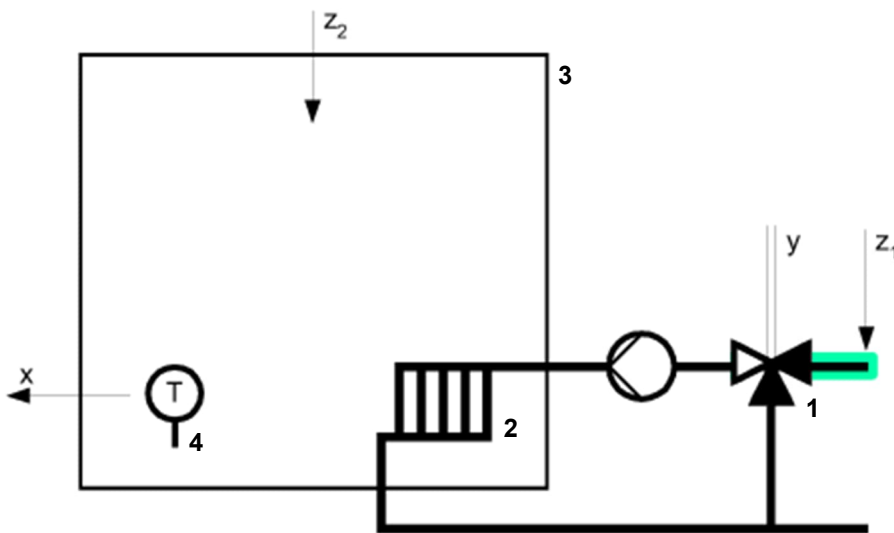


Fig. 3-3 Regelstrecke
1 Stellglied
2 Wärmeübertrager
3 Messort
4 Fühler
 z_1, z_2 Störungen

3.2.3. Zeitliches Verhalten der Regelgröße

Änderungsgeschwindigkeit

Die maximale Änderung hängt von der Leistung (Zufuhr, Störungen) und dem physikalischen Umfeld am Messort ab.

Verzögerungen

Verzögerungen in der Reaktion auf Stellungsänderungen Δy hängen ab von:

- Rohr- bzw. Kanallänge
- Lage des Fühlers
- Transportgeschwindigkeit des Energieflusses.

3.3. Einfache Strecke

3.3.1. Schema einer einfachen Strecke (Einspeicherstrecke)

Das Verhalten einer Strecke wird durch Elemente bestimmt, die das zeitliche Übertragungsverhalten beeinflussen, d.h. wie lange es dauert oder wie schnell eine Änderung von Statten geht. Ein solches Element heißt Speicher.

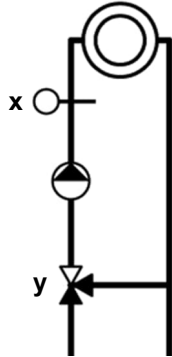


Fig. 3-4 Beispiel für eine einfache Strecke (Vorlauftemperaturfühler = Speicher)

3.3.2. Sprungantwort der Regelstrecke

Sprungantwort

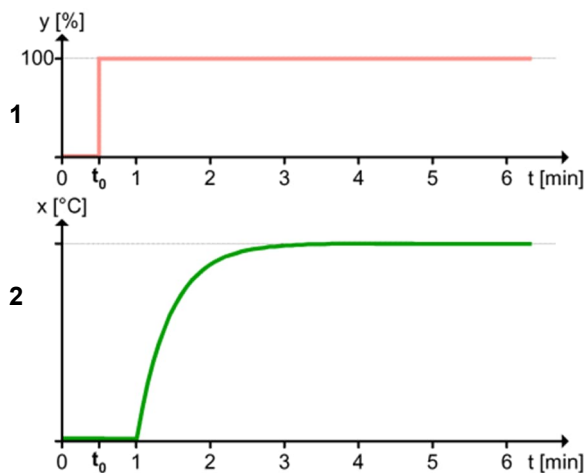


Fig. 3-5 Grafische Darstellung von Sprung und Sprungantwort

- 1 Eingangssprung der Stellgröße
- 2 Sprungantwort der Regelgröße

Die über die Zeit aufgezeichnete Reaktion der Regelgröße auf eine sprunghafte Änderung der Stellgröße (Eingangssprung) heißt Sprungantwort.

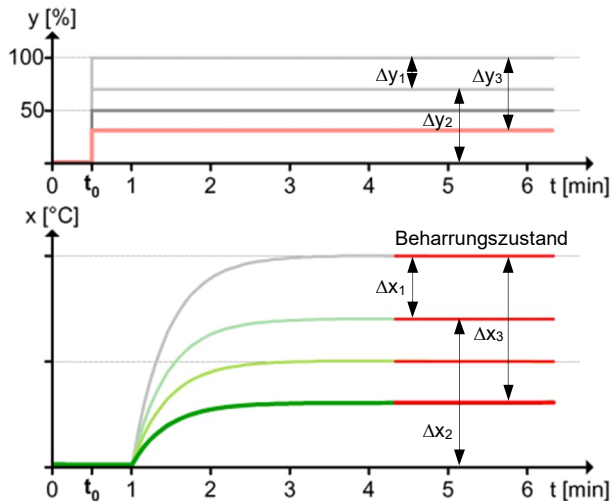


Fig. 3-6 Verhalten der Regelgröße auf eine sprunghafte Stellgrößen-Änderung
 $\Delta x_{1,2,3}$ Regelgrößen-Änderungen
 $\Delta y_{1,2,3}$ Stellgrößen-Änderungen

Die oben gezeigten Sprungantworten zeigen:

- Die Regelgröße erreicht nach einer gewissen Zeit einen neuen Beharrungszustand. Man spricht hier auch von einer Strecke mit Ausgleich.
- Wenn der Beharrungszustand erreicht ist, verhält sich die Änderung der Regelgröße (Δx) proportional zur Stellgrößenänderung (Δy).

Hinweis:

Im Moment werden nur die Zusammenhänge betrachtet, wenn die Regelgröße einen neuen Beharrungszustand erreicht hat.

Der zeitliche Verlauf der Sprungantwort (dynamisches Verhalten) folgt in den Kapiteln 3.3.6 und 3.4.

3.3.3. Übertragungsbeiwert K_s der Regelstrecke

Der Übertragungsbeiwert K_s ist eine wichtige Kenngröße der Regelstrecke und wird folgendermaßen bestimmt:

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

Verstärkungsfaktor

Der Übertragungsbeiwert K_s der Regelstrecke wird oft auch als Verstärkungsfaktor bezeichnet.

3.3.4. Stellbereich Y_h und Regelbereich X_h der Strecke

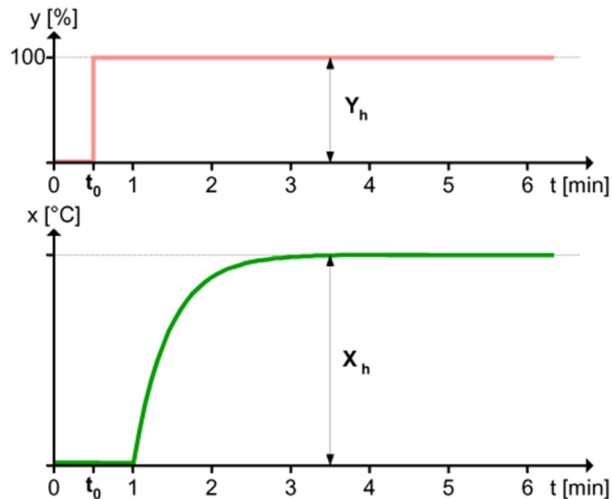


Fig. 3-7 Stellbereich Y_h und Regelbereich X_h einer Strecke

Stellbereich Y_h

Der Stellbereich Y_h ist der Bereich, über den die Stellgröße maximal verändert werden kann (z.B. 0 ... 100 %).

Beispiele für Y_h :

0 ... 20 mm = 20 mm

0 ... 2 Stufen = 2 Stufen

0 ... 1 = 1

Regelbereich X_h

Der Regelbereich X_h ist die Änderung der Regelgröße, die bei einer Änderung der Stellgröße um den Stellbereich Y_h erreicht wird.

Beispiele für X_h :

40 ... 60 K = 20 K

30 ... 70 % r.F. = 40 % r.F.

Der Übertragungsbeiwert K_s wird damit:

$$K_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{X_h}{Y_h}$$

Beispiel:

$$K_s = \frac{X_h}{Y_h} = \frac{20 \text{ K}}{100 \%} = 0.2 \frac{\text{K}}{\%}$$

Einheitssprung ($Y_h = 1$)

Wird das Stellglied über seinen ganzen Stellbereich Y_h bewegt, wird dies als Einheitssprung (0 ... 1) bezeichnet.

Beispiel:

$$K_S = \frac{X_h}{Y_h} = \frac{20 \text{ K}}{1} = 20 \text{ K}$$

Übergangsfunktion

Die auf den Einheitssprung ($Y_h = 1$) bezogene Sprungantwort heißt Übergangsfunktion.

3.3.5. P-T₁-Glied (Strecke 1. Ordnung)

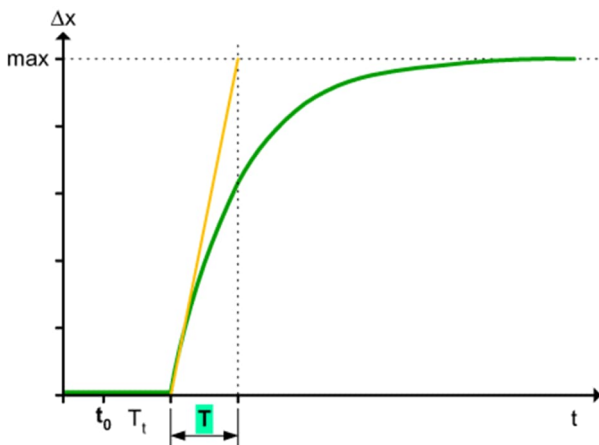


Fig. 3-8 Einfache Strecke
 t_0 Zeitpunkt, wo Änderung am Stellglied eintritt
 T_t Totzeit
 T Zeitkonstante

Der Verlauf der Übergangsfunktion einer Einspeicherstrecke (Strecke 1. Ordnung) wird mathematisch mit der folgenden Exponentialfunktion beschrieben:

$$x = K_S \cdot y \cdot (1 - e^{-t/T})$$

Ein Element mit diesem Übertragungsverhalten heißt im regeltechnischen Sprachgebrauch P-T₁-Glied oder Strecke 1. Ordnung.

Das Übertragungsverhalten kann mit folgenden Parametern beschrieben werden:

- Übertragungsbeiwert K_S
- Zeit t
- Zeitkonstante T

3.3.6. Kenngrößen

Totzeit T_t

Beispiel Speicher-Ladung:

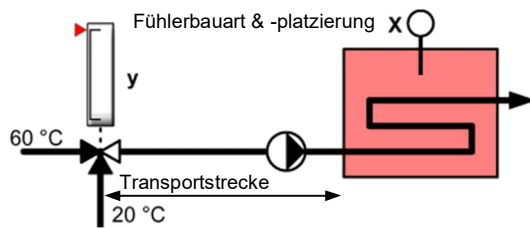


Fig. 3-9 Speicher-Laderegelung

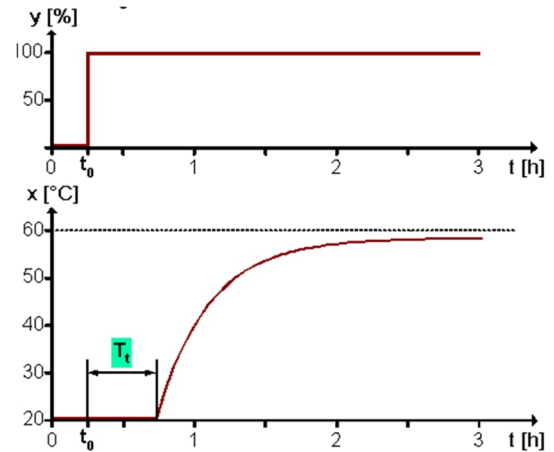


Fig. 3-10 Speicher-Ladung, Totzeit

Nach dem Öffnen des Ventils (Stellglied) beginnt die Temperatur im (durchmischten) Brauchwarmwasser-Speicher erst nach einer gewissen Zeit anzusteigen. Diese Zeit, die vergeht bis die Regelgröße x auf eine Änderung der Stellgröße y zu reagieren beginnt, heißt Totzeit T_t .

Diese Verzögerung ist hauptsächlich bedingt durch die Transportzeit, die das heiße Wasser braucht, bis es vom Ventil zum Speicher gelangt und dort beginnt seine Energie zu übertragen.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist auch die Bauart und vor allem die Platzierung des Fühlers.

Zeitkonstante T

Die Zeitkonstante T ist ein Maß für die Anfangssteigung der Übertragungsfunktion. Sie kann mit Hilfe der Steigungstangente im Anfangspunkt der Übergangsfunktion bestimmt werden.

Nachfolgend werden zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Zeitkonstanten T gezeigt:

1. Bestimmung mit Hilfe des Beharrungszustands:

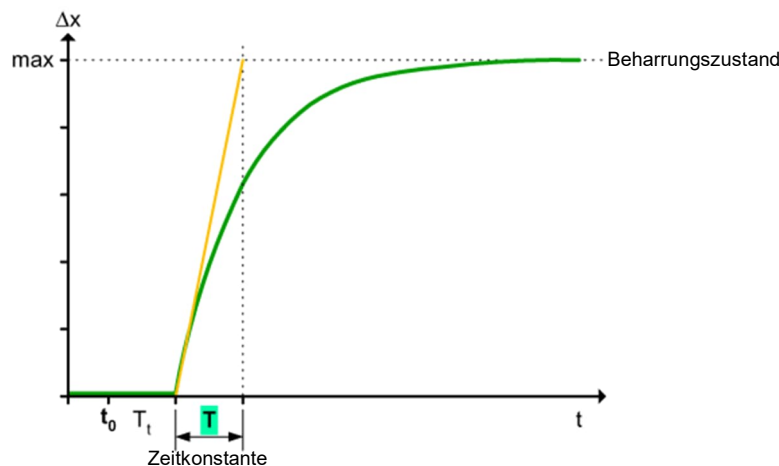


Fig. 3-11 Grafische Bestimmung der Zeitkonstante T

Die Tangente wird soweit verlängert, bis sie sich mit dem Wert des Beharrungszustands ($\Delta x_{\max}$) der Regelgröße schneidet.

Die Zeitkonstante T ist die Zeitdifferenz vom Berührungspunkt von Tangente und Kurve bis zum Schnittpunkt der Tangente mit dem Beharrungsniveau.

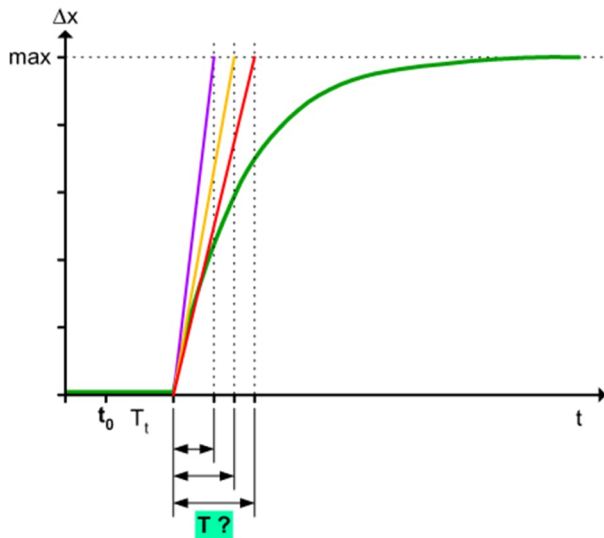


Fig. 3-12 Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Zeitkonstante

Diese Methode ist ungenau. Es ist nicht immer einfach, die Steigungstangente richtig einzuzeichnen. Das kann sich stark auf die Genauigkeit der daraus abgeleiteten Zeitkonstanten auswirken.

2. Bestimmung mit Hilfe der Übergangsfunktion x:

$$x = K_S \cdot y \cdot (1 - e^{-t/T})$$

Setzt man in der Exponentialfunktion die Zeitkonstante T für die Zeit t ein, so ergibt dies:

$$x = K_S \cdot y \cdot (1 - e^{-T/T}) = K_S \cdot y \cdot (1 - e^{-1})$$

$$\Rightarrow K_S \cdot y \cdot 0.632$$

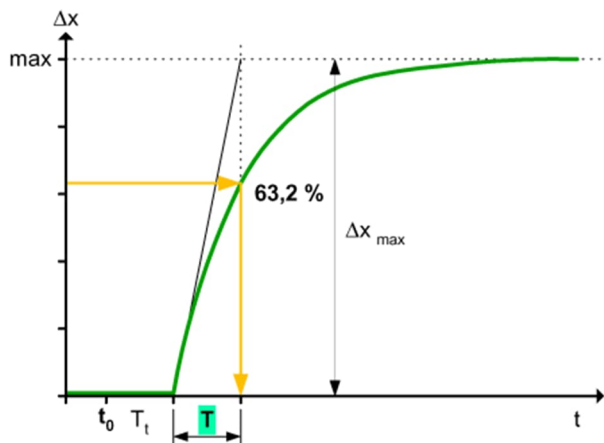


Fig. 3-13 Bestimmung der Zeitkonstante mit Hilfe der Exponentialfunktion

Sucht man auf der Zeitachse den Zeitpunkt, bei dem der Wert der Sprungantwort bei 63.2 % von $\Delta x_{\max}$ liegt, erhält man die Zeitkonstante T als Differenz zum Zeitpunkt $t_0 + T_t$.

Anders ausgedrückt: Es ist die Zeit, in der die Regelgröße x 63.2 % des neuen Beharrungszustands erreicht hat.

Beharrungszustand nach ca. 5 T

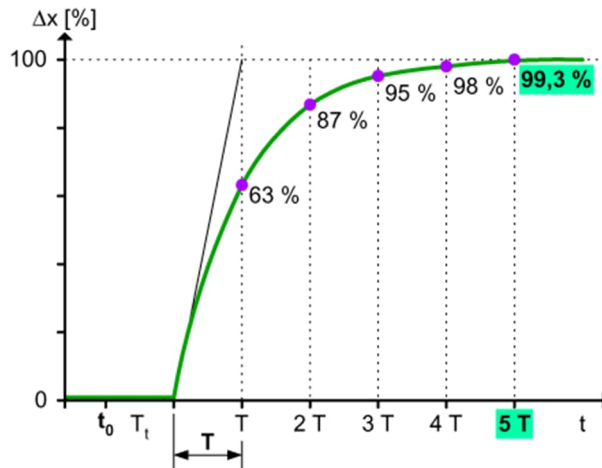


Fig. 3-14 Beharrungszustand nach ca. 5 T

Der Beharrungszustand ist nach einer Zeit von 5 Zeitkonstanten mit 99.3 % annähernd erreicht.

Schwierigkeitsgrad S

Aus den zuvor ermittelten Kenngrößen einer einfachen Strecke (Totzeit T_t , Zeitkonstante T) kann der Schwierigkeitsgrad S dieser Regelstrecke ermittelt werden.

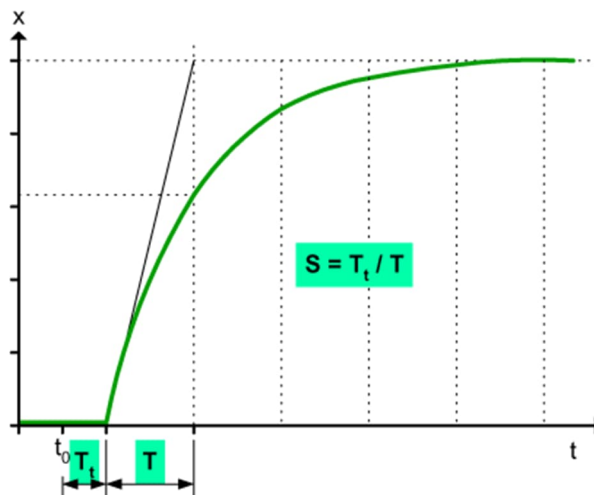


Fig. 3-15 Schwierigkeitsgrad

Schwierigkeitsgrad S :

$$S = \frac{\text{Totzeit}}{\text{Zeitkonstante}} = \frac{T_t}{T}$$

Der Schwierigkeitsgrad S ist ein Maß für die Regelbarkeit der Strecke.

$S < 0.1 \Rightarrow$ Leichte Strecke

$S \approx 0.2 \Rightarrow$ Mittlere Strecke

$S > 0.3 \Rightarrow$ Schwierige Strecke

Der Schwierigkeitsgrad ist damit auch eine wichtige Kenngröße zur Ermittlung der Regler-Einstellparameter.

Verändern des Schwierigkeitsgrads:

Muss der ermittelte Schwierigkeitsgrad S herabgesetzt werden weil die Strecke schwierig zu regeln ist, so ist die Totzeit T_t zu verkleinern oder die Zeitkonstante T zu vergrößern.

Es sind also oft Anpassungen auf der Anlagenseite nötig (z.B. Fühler versetzen, Fühler mit kleinerer Totzeit T_t wählen, ...), um ein stabiles Regelverhalten zu erreichen. Eine weitere Maßnahme ist der Einsatz einer anderen Regelstrategie wie z.B. eine Kaskadenregelung.

3.3.7. Regelkennlinie

Der Zusammenhang zwischen der Regelgrößen-Änderung Δx und der Stellgrößen-Änderung Δy kann auch grafisch dargestellt werden.

Beispiel einer Vorlauftemperatur-Regelung (60/40°C):

- Die Stellgrößenänderungen ($\Delta y_{1...4}$) und die zugehörigen Beharrungszustandswerte der Regelgröße ($\Delta x_{1...4}$) werden eingetragen.
- Die eingezeichneten Punkte werden verbunden - es resultiert eine lineare Kennlinie.
- Dies ist die statische Kennlinie der Regelstrecke - auch Regelkennlinie genannt.

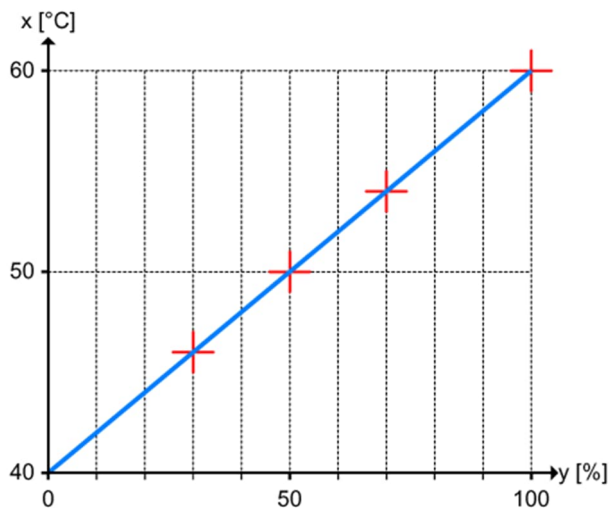


Fig. 3-16 Lineare Regelkennlinie

Steigung der Regelkennlinie

Der Übertragungsbeiwert $K_s (= \Delta x / \Delta y)$ beträgt 0.2 K/% und entspricht der Steigung der Regelkennlinie ($\Delta x / \Delta y = \tan \alpha$).

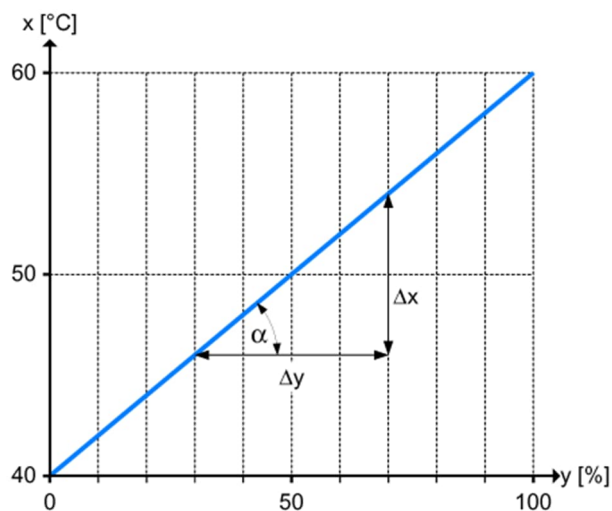


Fig. 3-17 Steigung der Regelkennlinie

Regelkennlinien in HLK-Anlagen

Falls die Regelkennlinie linear verläuft, ist auch der Übertragungsbeiwert K_S über den gesamten Regelbereich konstant.

In der Praxis trifft dieses "ideale" Verhalten leider selten zu, denn in HLK-Anlagen sind Regelkennlinien sehr oft nichtlinear.

Beispiel: Lufterwärmer

Hier sehen Sie einen Lufterwärmer eingebaut in einer Lüftungsanlage und die zugehörige, nichtlineare Regelkennlinie.

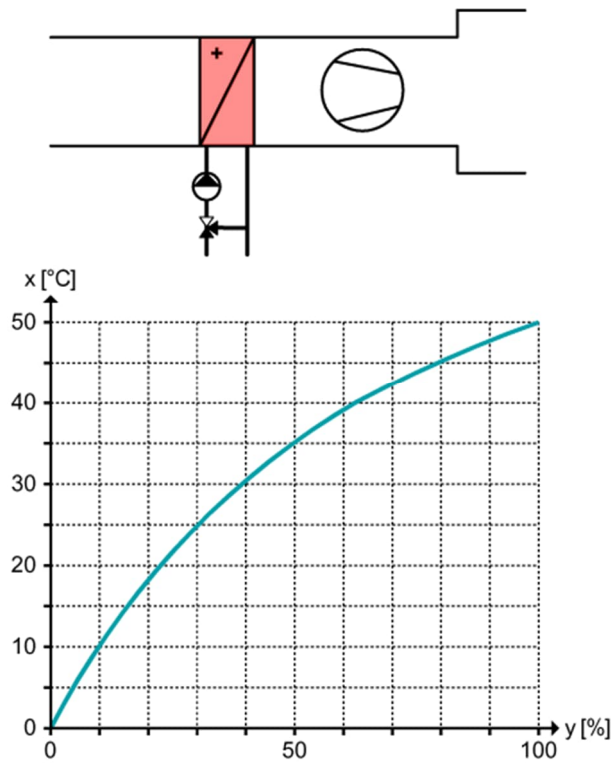


Fig. 3-18 Lufterwärmer mit nichtlinearer Regelkennlinie

Maximaler Übertragungsbeiwert $K_{S \max}$

Der Übertragungsbeiwert K_S am unteren Ende der Kennlinie (größte Steigung) ergibt:

$$K_{S \max} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{10 \text{ K}}{10 \%} = 1 \frac{\text{K}}{\%}$$

Minimaler Übertragungsbeiwert $K_{S \min}$

Der Übertragungsbeiwert K_S am oberen Ende der Kennlinie (kleinste Steigung) ergibt:

$$K_{S \min} = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{5 \text{ K}}{20 \%} = 0.25 \frac{\text{K}}{\%}$$

Durchschnittlicher Übertragungsbeiwert $K_{S \text{ mittel}}$

Der Übertragungsbeiwert K_S mit Hilfe von X_h und Y_h ergibt den durchschnittlichen Wert:

$$K_{S \text{ mittel}} = \frac{X_h}{Y_h} = \frac{50 \text{ K}}{100 \%} = 0.5 \frac{\text{K}}{\%}$$

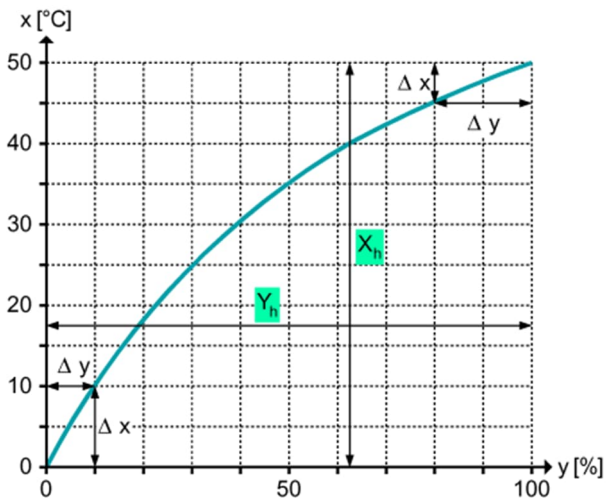


Fig. 3-19 Ermittlung der K_S -Werte

Es gilt nun - je nach Anlagesituation - zu entscheiden, welcher Übertragungsbeiwert K_S berücksichtigt werden muss.

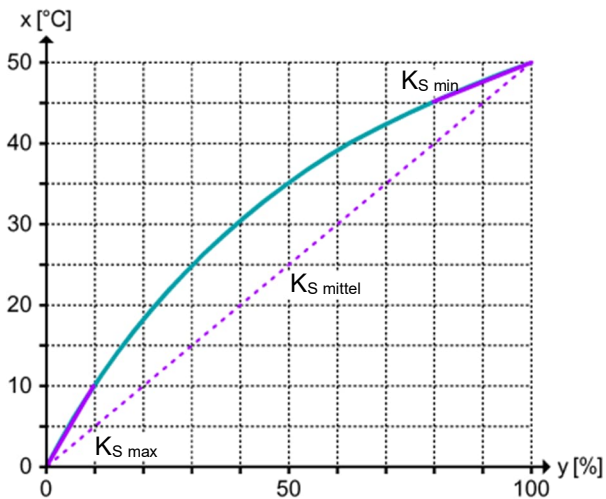


Fig. 3-20 Übertragungsbeiwerte K_S

Hinweis

Der Übertragungsbeiwert K_S wird unter anderem zur Bestimmung geeigneter Regler-Parameter verwendet. Dies wird im Kapitel 6, „Der geschlossene Regelkreislauf“ detaillierter behandelt.

3.3.8. Zusammenfassung Einfache Strecke

Strecken mit Ausgleich

Die meisten Regelstrecken, die Sie in HLK-Anlagen antreffen werden, sind Strecken mit Ausgleich. Bei diesen Strecken erreicht die Regelgröße nach einer sprunghaften Änderung der Stellgröße innerhalb einer gewissen Zeit einen neuen Beharrungszustand.

Übertragungsbeiwert der Regelstrecke

Der Übertragungsbeiwert K_S lässt sich aus dem Verhältnis von Regelgrößen-Änderung Δx zu Stellgrößen-Änderung Δy ermitteln, wenn der neue Beharrungszustand erreicht ist.

Der Übertragungsbeiwert K_S wird oft auch Verstärkungsfaktor der Regelstrecke genannt.

Regelbereich und Stellbereich

Der Regelbereich X_h der Strecke ist die maximal mögliche Veränderung der Regelgröße, wenn sich die Stellgröße maximal (d.h. um den Stellbereich Y_h) ändert.

Statische Kennlinie der Strecke (Regelkennlinie)

Wird die Regelgrößenänderung Δx und die zugehörige Stellgrößenänderung Δy in einem Koordinatensystem grafisch dargestellt, so erhält man die "statische Kennlinie der Strecke", auch Regelkennlinie genannt.

In vielen Fällen ist die Regelkennlinie nicht linear, was sich erschwerend auf die Regelaufgabe auswirkt.

Bei nicht linearen Regelkennlinien verändert sich auch der Übertragungsbeiwert K_S über den Stellbereich.

3.4. Mehrspeicherstrecken

In Gebäudetechnikanlagen sind einfache Regelstrecken eher selten anzutreffen. Die meisten Strecken sind sogenannte Mehrspeicherstrecken. Das heißt, es gibt mehrere Elemente in der Strecke, die das zeitliche Übertragungsverhalten beeinflussen.

3.4.1. Speicher

Beispiel: Zuluftanlage

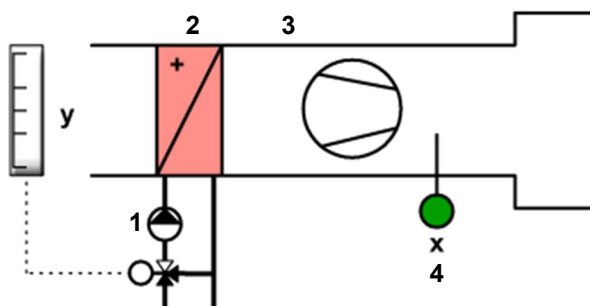


Fig. 3-21 Speicher in der Strecke einer Lüftungsanlage

In diesem Beispiel einer Zuluftanlage wirken folgende Anlagenteile als Speicher:

- Leitungen mit Umwälzpumpe (1)
- Wärmeübertrager (2)
- Geräteteil mit Ventilator (3)
- Zulufttemperaturfühler (4)

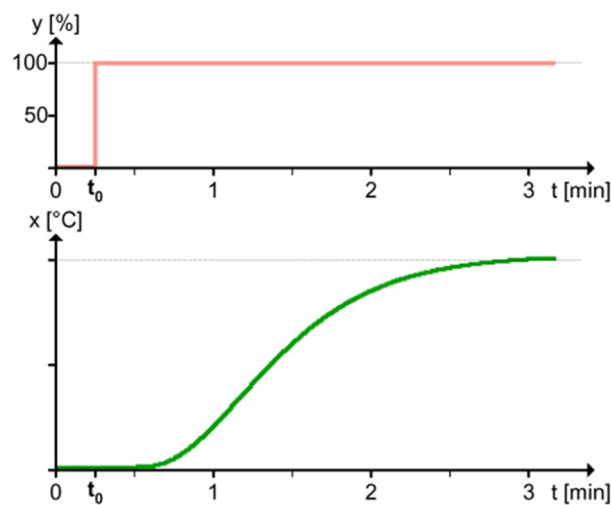


Fig. 3-22 Sprungantwort der Regelgröße mit mehreren Speichern

Wie bei der einfachen Strecke zeigt die Sprungantwort:

- Die Regelgröße erreicht nach einer gewissen Zeit einen neuen Beharrungszustand.
- Wenn der Beharrungszustand erreicht ist, verhält sich die Änderung der Regelgröße (Δx) proportional zur Stellgrößenänderung (Δy).

Der Verlauf der Übertragungsfunktion unterscheidet sich jedoch von derjenigen der einfachen Strecke.

3.4.2. Kenngrößen

Übertragungsbeiwert K_s

Der Übertragungswert K_s kann auch für eine Mehrspeicherstrecke wie folgt bestimmt werden:

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

Das zeitliche Verhalten einer Mehrspeicherstrecke kann mit Hilfe der Wendetangente der Sprungantwort analysiert werden.

Verzugszeit T_u

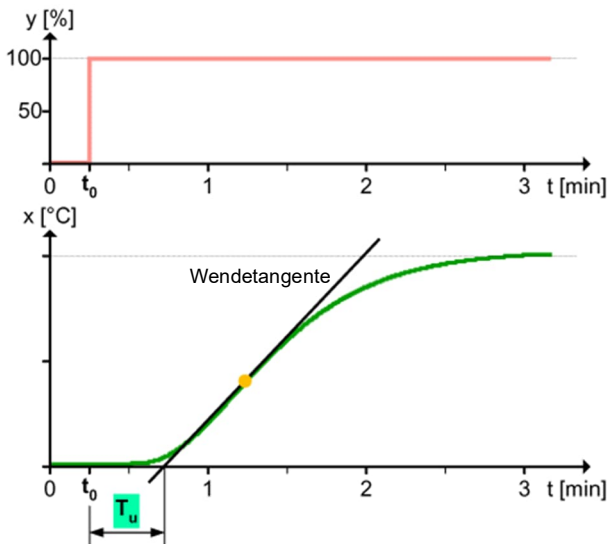


Fig. 3-23 Verzugszeit T_u

Die Verzugszeit T_u basiert auf dem Schnittpunkt der Wendetangente mit dem Startwert der Regelgröße x und dem Start der Stellgrößenänderung bei t_0 . Sie stellt die Verzögerung dar, mit der die Strecke auf eine Stellgrößenänderung reagiert und beinhaltet auch Totzeiten.

Ausgleichszeit T_g

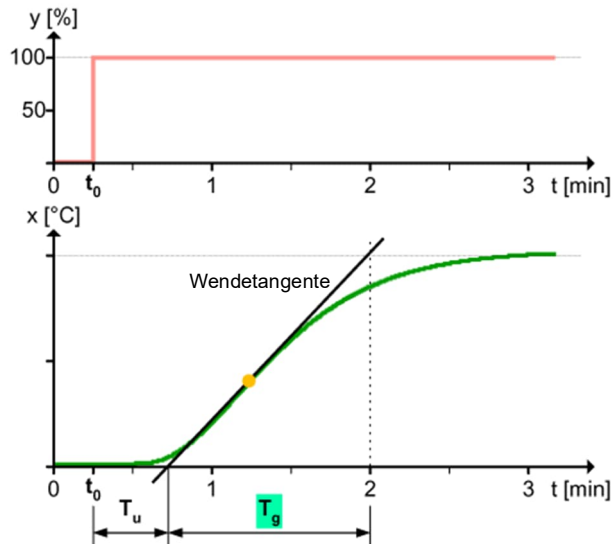


Fig. 3-24 Ausgleichszeit T_g

Die Ausgleichszeit T_g basiert auf dem Schnittpunkt der Wendetangente mit dem alten und neuen Beharrungszustand der Regelgröße.

Schwierigkeitsgrad S

Aus den zuvor ermittelten Kenngrößen der Mehrspeicherstrecke (Verzugszeit T_u , Ausgleichszeit T_g) kann wiederum der Schwierigkeitsgrad S bestimmt werden.

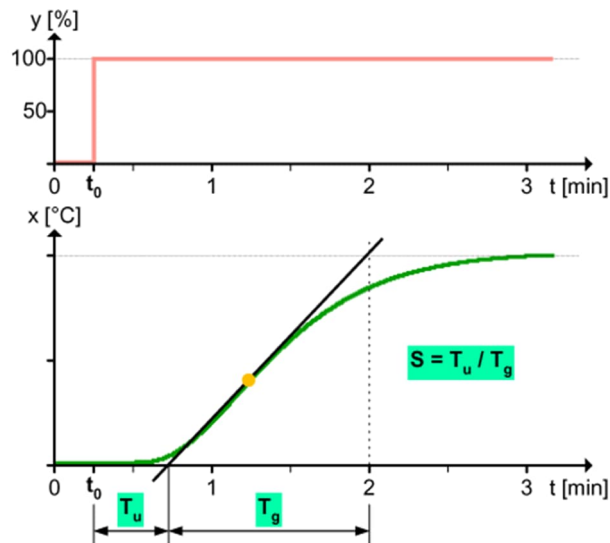


Fig. 3-25 Schwierigkeitsgrad aus T_u und T_g

Der Schwierigkeitsgrad S wird für eine Mehrspeicherstrecke wie folgt bestimmt:

$$S = \frac{\text{Verzugszeit}}{\text{Ausgleichszeit}} = \frac{T_u}{T_g}$$

Der Schwierigkeitsgrad S ist ein Maß für die Regelbarkeit. Auch für die Mehrspeicherstrecke kann mit dem Schwierigkeitsgrad eine Aussage über die Regelbarkeit der Strecke gemacht werden:

- $S < 0.1 \Rightarrow$ Leichte Strecke
- $S \approx 0.2 \Rightarrow$ Mittlere Strecke
- $S > 0.3 \Rightarrow$ Schwierige Strecke

Verändern des Schwierigkeitsgrads:

Muss der ermittelte Schwierigkeitsgrad S herabgesetzt werden weil die Strecke schwierig zu regeln ist, so ist die Verzugszeit T_u zu verkleinern oder die Ausgleichszeit T_g zu vergrößern.

Diese Maßnahmen bedeuten oft Installationsanpassungen in der Anlage. Das kann sehr aufwändig und teuer werden.

Kenngrößen von Regelstrecken in Heizungsanlagen

Regelgrößen	Kenngrößen		
	T_u	$S (T_u/T_g)$	X_h
Kesselwassertemperatur	1...5 min	0,05...0,15	≈ 20 K
Kaminzug	1...3 s	0,3...1	3...10 mbar
Mischwassertemperatur (Vor- und Rücklaufbeimischung, einschliesslich Fühler)	5...20 s	0,2...0,5	20...70 K
Raumtemperatur			
- Wohnbereich	3...5 min	0,1...0,3	6...10 K
- Treibhaus, Zelt	3...5 min	0,1...0,3	20...30 K
Warmwassertemperatur			
- Mischung	0,5...2 s	0,1...0,4	30...60 K
- Wärmeübertrager	5...30 s	0,1...0,8	30...60 K
Schwimmbadwassertemperatur			
- Vorlauf	10...60 s	0,1...0,3	2...8 K
- Rücklauf	6...8 h		
Wärmeübertrager	10...60 s	0,1...0,6	10...100 K

Fig. 3-26 Kenngrößen in Heizungen

Kenngrößen von Regelstrecken in Lüftungs- / Klimaanlage

Regelgrösse	Kenngrößen		
	T_u	$S (T_u/T_g)$	X_h
Mischtemperatur (Luft)	1 s	0,3...0,8	0...40 K
Zulufttemperatur (je nach Anlage)	15 s...4 min	0,2...0,6	20...50 K
Raumtemperatur	0,5...3 min	0,1...0,3	6...10 K
Ablufttemperatur	0,5...3 min	0,2...0,4	6...10 K
Wäscheraustrittstemperatur (je nach Anlage)	10 s...2 min	0,1...0,3	20...25 K
Raumfeuchte inkl. Feuchtefühler	0,5...3 min	0,2...0,5	20...70 % rH
Volumenstrom	< 1 s	0,1...0,5	

Fig. 3-27 Kenngrößen in Lüftung / Klima

3.4.3. Zusammenfassung Mehrspeicherstrecke

Übertragungsbeiwert K_s

Der Übertragungsbeiwert K_s der Mehrspeicherstrecke ist die statische Kenngröße und ist genauso definiert wie bei der Einspeicherstrecke:

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

Die Ausgleichszeit T_u und die Verzugszeit T_g

sind die beiden dynamischen Kenngrößen der Mehrspeicherstrecke - analog zur Totzeit T_t und zur Zeitkonstanten T bei der Einspeicherstrecke.

Sie können mit Hilfe der Wendetangente aus der Sprungantwort einer Mehrspeicherstrecke ermittelt werden.

Schwierigkeitsgrad S als Maß für die Regelbarkeit

Der Schwierigkeitsgrad ist das Verhältnis von Verzugszeit T_u und Ausgleichszeit T_g .

Strecken mit einem Schwierigkeitsgrad S kleiner 0.1 sind leicht zu regeln, Strecken mit S von 0.3 und größer sind schwierig zu regeln.

4 Regeleinrichtung

Die Regeleinrichtung wird mit Hilfe von Funktionsbausteinen verfeinert.

Die meisten Regeleinrichtungen in HLK-Anlagen enthalten folgende Bausteine:

- Sollwertgeber
- Regler
- Stellantrieb

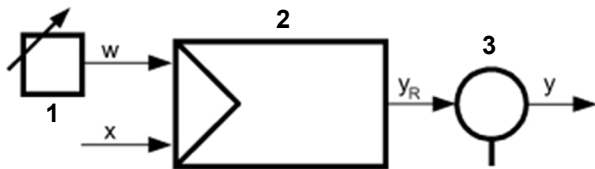


Fig. 4-1 Regeleinrichtung
1 Sollwertgeber
2 Regler
3 Stellantrieb

4.1.1. Der Sollwertgeber (Führungsgeber)

Der Sollwertgeber ist die Quelle für die Führungsgröße w (Sollwert) des Reglers. Üblicherweise ist das ein Datenpunkt als Einstellwert im Regler selbst. Der Sollwertgeber kann aber auch ein separater elektromechanischer Geber sein (z.B. Potentiometer).

4.1.2. Der Regler

Der Regler ist ein ziemlich anspruchsvoller Funktionsbaustein

Zum Regler gehören:

- 2 Eingänge: Führungsgröße w und Regelgröße x
- 1 Ausgang: Reglerausgang y_R

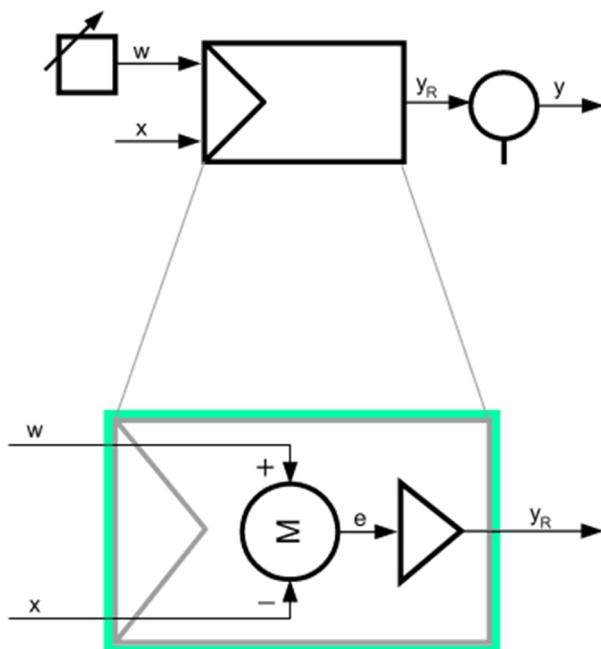


Fig. 4-2 Regler mit Vergleich und Regelalgorithmus

Funktion eines Reglers

Der Sollwert w ist der von der Anwendung zu einem beliebigen Zeitpunkt gewünschte Wert für die Regelgröße x .

Im Regler läuft folgendes ab:

- Die Regelgröße x wird gemessen.
- Der Vergleich produziert aus Sollwert w und Istwert x die Regeldifferenz e . Die Regeldifferenz $e = w - x$ ist die Zielabweichung. Sie ist Auslöser für die Aktivität der Kernfunktion des Reglers.
- Der Regelalgorithmus ist der Kern des Reglers. Er bestimmt aus der Regeldifferenz e , seinen Einstellwerten (Parametern) und zuvor gespeicherten Werten den Wert und das zeitliche Verhalten des Reglerausgangs y_R , um die Regelstrecke zielgerichtet zu beeinflussen.
- Der Reglerausgang y_R wird aktualisiert.

Diese vier Funktionsschritte werden laufend wiederholt.

Regeltechnisches Ziel:

Der Regelalgorithmus beeinflusst die Regelstrecke so, dass die Regeldifferenz e möglichst ruhig bleibt und ihr Wert $= 0$ ist.

Im folgenden Kapitel 5, Regler, werden einzelne Reglerarten detailliert vorgestellt.

4.1.3. Der Stellantrieb

Der Stellantrieb ist in HLK-Anwendungen meistens ein elektromechanischer Wandler, der den elektrischen Reglerausgang y_R in eine mechanische Stellgröße y (Hub oder Drehung) überträgt.

Einfluss des Stellantriebs auf die Regelung

Die Stellgröße folgt dem Reglerausgang meistens verzögert, die mechanische Bewegung kann mitunter sehr kräftig sein. Aus Sicht des Reglers verzögert diese Eigenschaft die Reaktion der Regelstrecke auf Änderungen des Reglerausgangs. Die Verzögerung des Stellantriebs gegenüber derer vieler Regelstrecken in HLK-Anlagen ist vernachlässigbar klein.

Weil die Laufzeit eines Stellantriebs abgestimmt auf die Anlagesituation (Regelstrecke) gewählt werden kann, wird der Stellantrieb hier als Teil der Regeleinrichtung betrachtet.

4.1.4. Stellgeräte

Im Markt werden auch Stellgeräte angeboten, die als feste Kombination von Stellantrieb und Stellglied bestehen.

Die Grenze zwischen Regeleinrichtung und Regelstrecke verläuft mitten durch das Stellgerät.

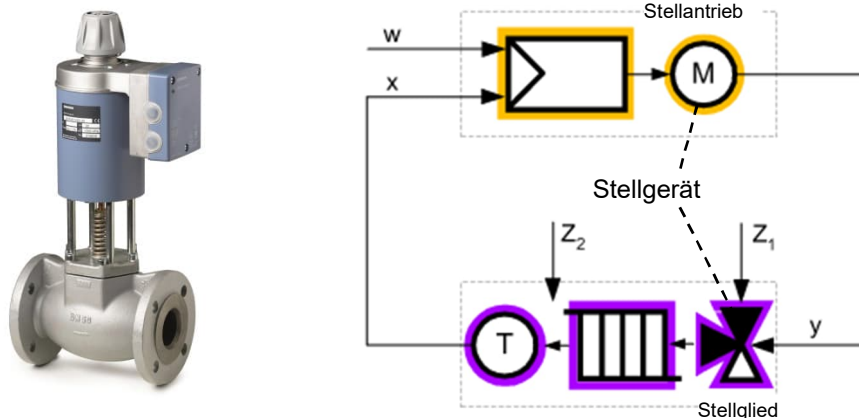


Fig. 4-3 Stellgerät; Kombination von Stellglied und Stellantrieb

4.1.5. Funktion einer Regeleinrichtung

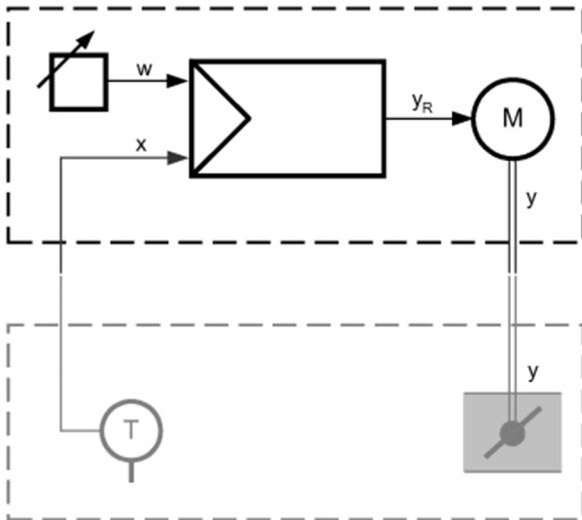
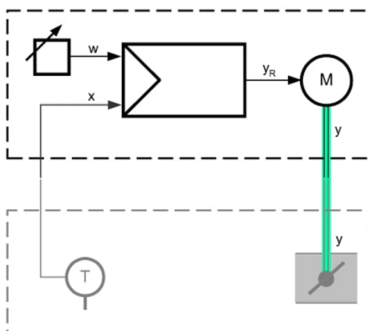
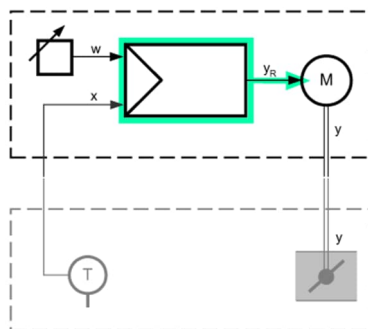


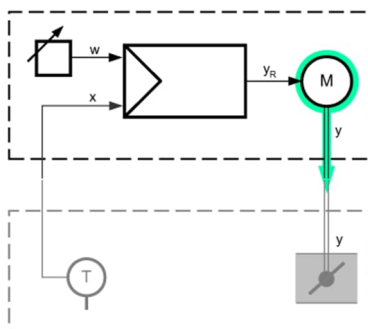
Fig. 4-4 Regeleinrichtung



In HLK-Anlagen wird der mechanische Abtrieb des Stellantriebs mit dem Stellglied verbunden.



Der Regler entscheidet, auf welchen Wert das Stellglied der Regelstrecke gestellt werden soll.



Der Stellantrieb führt die mechanische Stellgröße y des Stellgliedes dem Wert des Reglerausgangs y_R nach.

Fig. 4-5 Funktion einer Regeleinrichtung

Zeitliches Verhalten der Regeleinrichtung

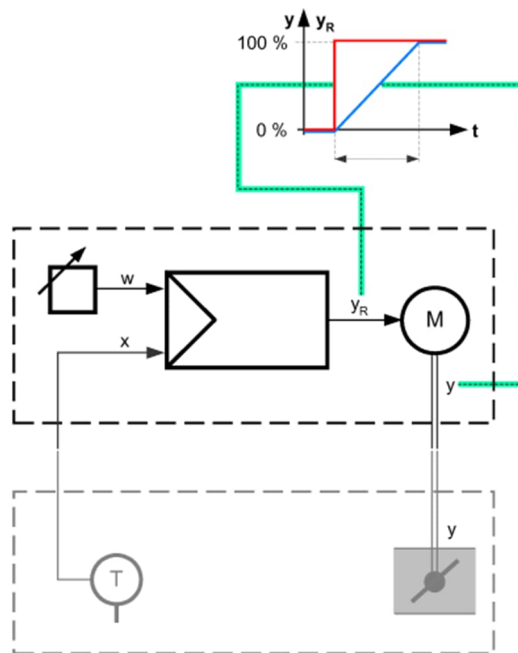
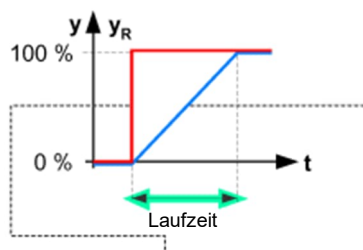


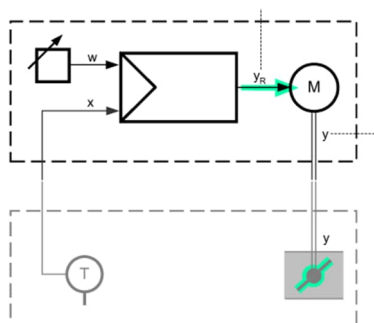
Fig. 4-6 Zeitliches Verhalten der Regeleinrichtung

Die meisten Stellantriebe haben eine endliche Geschwindigkeit. Deshalb folgt die mechanische Stellgröße y einem vom Regler rasch veränderten elektrischen Reglerausgang y_R verzögert nach.



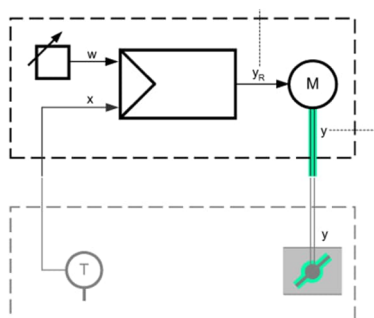
Laufzeit

Die Laufzeit ist diejenige Zeit, die ein Stellantrieb benötigt, um die Stellgröße y von 0 auf 100 % zu ändern.



Wert des Reglerausgangs

Der Wert des Reglerausgangs y_R ist die Sollposition des Stellglieds.



Stellgröße y

Die Stellgröße y des Stellantriebs ist die Istposition des Stellglieds.

Fig. 4-7 Zeitliches Verhalten, Ablauf

4.1.6. Anwendungstechnischer Wirksinn einer Regeleinrichtung

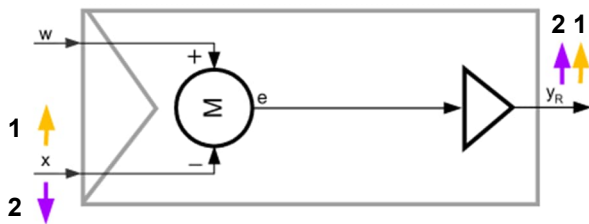


Fig. 4-8 Wirksinn eines Reglers; 1 gleichläufig, 2 gegenläufig

Der Wirksinn eines Reglers ist die Änderungsrichtung seines Reglerausgangs y_R aufgrund der Änderungsrichtung seiner Regelgröße x .

Je nach Anwendung muss der Wirksinn gleichläufig oder gegenläufig sein.

Eigenschaften gleichläufiger Regler

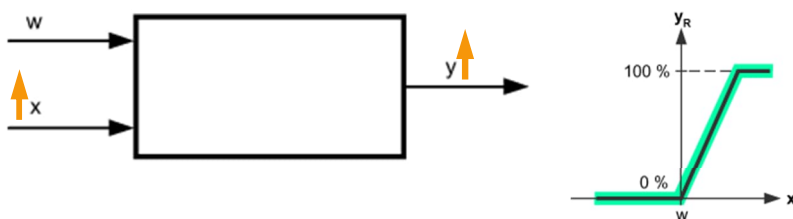


Fig. 4-9 Gleichläufiger Wirksinn eines Reglers

- Der Reglerausgang y_R steigt, wenn die Regelgröße x steigt.
- Der Regler stellt seinen Ausgang nur aktiv, wenn die Regeldifferenz $e < 0$ ist.
- Der Regler hält die Regelgröße tief.

Anwendungsbeispiel: Kühlen eines Raumes

Eigenschaften gegenläufiger Regler

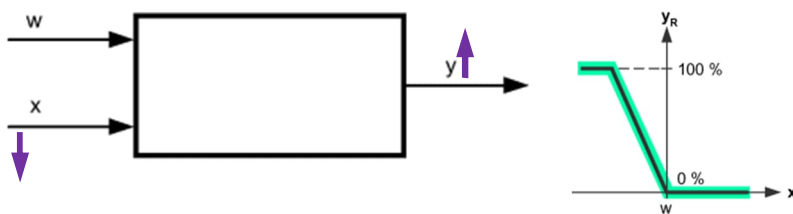


Fig. 4-10 Gegenläufiger Wirksinn eines Reglers

- Der Reglerausgang y_R steigt, wenn die Regelgröße x sinkt.
- Der Regler stellt seinen Ausgang nur aktiv, wenn die Regeldifferenz $e > 0$ ist.
- Der Regler hält die Regelgröße hoch.

Anwendungsbeispiel: Heizen eines Raumes

Einstellbarer Wirksinn

Es gibt Regler, deren Wirksinn als Einstellwert wählbar ist.

Hinweis:

Es gibt auch Regler, deren Wirksinn im Anlagebetrieb gewechselt werden kann (change-over). Sie werden in Anlagen eingesetzt, bei denen im gleichen Verteiler je nach Jahreszeit entweder Heizmedium oder Kühlmedium geführt wird.

5 Regler

5.1. Ziel der Regelung

Wie bereits im Kapitel Regeleinrichtung erläutert, haben Regler die folgende Funktion:

Der Sollwert w ist der von der Anwendung zu einem beliebigen Zeitpunkt gewünschte Wert für die Regelgröße x .

Das Ziel der Regelung ist nun, dass der Regler die Regelgröße x möglichst genau auf den Sollwert w bringt.

Je nach Regler und Reglereinstellung reagiert die Regelgröße x unterschiedlich auf eine Sollwertänderung. Man spricht vom Einschwingverhalten der Regelgröße.

In HLK-Anlagen sollte das Einschwingen möglichst schnell und ohne großes Überschwingen passieren.

Dafür sind zwei Einschwingverhalten geeignet:

- Kritisch gedämpftes Einschwingen
Die Regelgröße wird nicht überschritten.
- Unterkritisch gedämpftes Einschwingen:
Die Regelgröße überschwingt maximal um 20 % höchstens einmal.

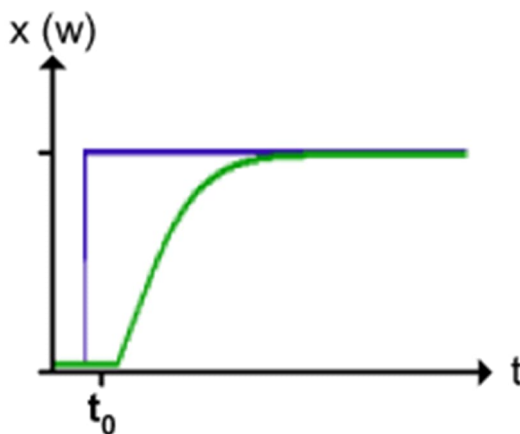


Fig. 5-1 Kritisch gedämpft

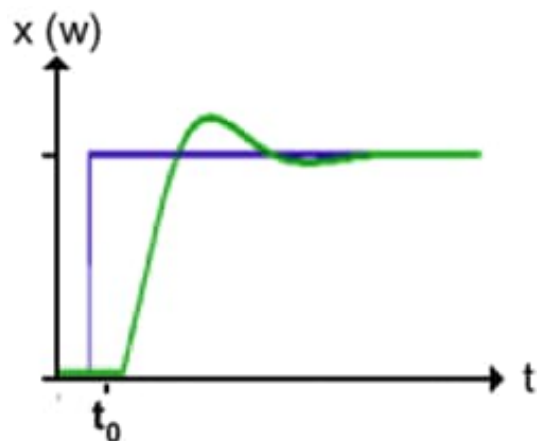


Fig. 5-2 Unterkritisch gedämpft

Detaillierte Informationen zum Einschwingverhalten finden sich in den Kapiteln 6.1., Mögliche Einschwingverhalten der Regelgröße, und 6.2, Ziel der Regelung.

Beispiel

In einem Raum wird eine Temperatur von 20 °C gewünscht. Dies entspricht der Führungsgröße w (Sollwert). Die aktuelle Temperatur beträgt 17 °C. Dies entspricht der Regelgröße x . Der oder die Regler haben nun die Aufgabe, die reale Temperatur auf die gewünschten 20 °C zu bringen.

Dies sollte ohne größeres Überhitzen zu Beginn und trotzdem möglichst rasch geschehen.

5.2. Verwendete Reglertypen

5.2.1. Reglertypen

Unstetige Regler:

- Thermostaten
- Zweipunkt-Regler
- Dreipunkt-Regler

Auf diese Regler wird in diesem Dokument nicht eingegangen.

Dieses Dokument befasst sich eingehend mit den stetigen Reglern:

- P-Regler (Proportional-Regler)
- I-Regler (Integral-Regler)
- D-Glied (Differential-Glied)

5.2.2. Kombination von Reglern und Regelgliedern

Die einzelnen Regler haben komplett verschiedene Eigenschaften (Übertragungsverhalten). Das Einschwingverhalten der Regelgröße x eines einzelnen Reglers führt oft nicht zum Ziel, die Regelgröße möglichst rasch und stabil auf die Führungsgröße zu bringen. Das heißt, mit einem Regler allein kann kein kritisch oder unterkritisch gedämpftes Einschwingverhalten erreicht werden. Dies kann oft nur mit der Kombination von einzelnen Reglern oder Regelgliedern erreicht werden.

Mögliche Anwendungen:

- P-Regler
- PI-Regler
- PD-Regler
- PID-Regler

5.3. P-Regler (Proportional-Regler)

5.3.1. Übertragungsverhalten

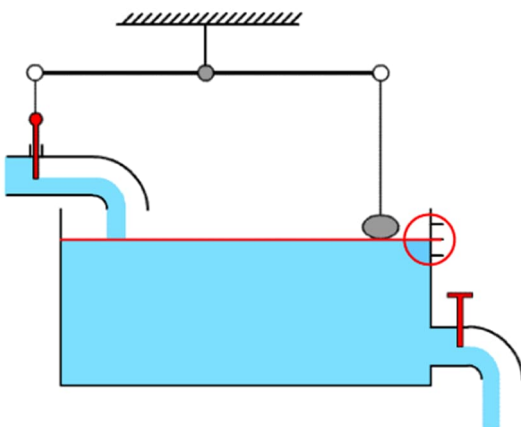
Das Übertragungsverhalten des Reglers ist die Art und Weise, wie der Regler auf eine Regeldifferenz reagiert.

Das Übertragungsverhalten wird am Beispiel einer Wasserstandsregelung eines Beckens gezeigt.

1. Situation: Abfluss-Schieber öffnen:

Ausgangslage:

Abfluss-Schieber halb offen



Endzustand:

Abfluss-Schieber vollständig geöffnet

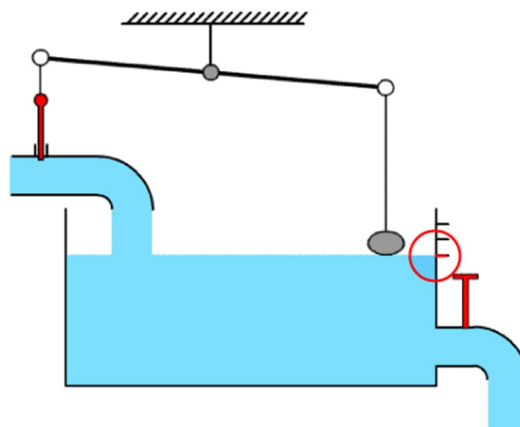
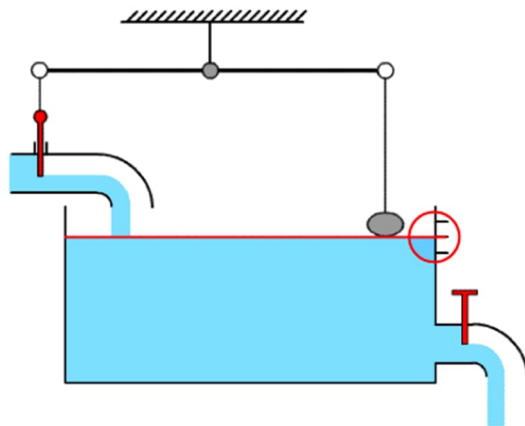


Fig. 5-3 Wasserstandsregelung, Öffnen des Abfluss-Schiebers

2. Situation: Abfluss-Schieber schließen

Ausgangslage:
Abfluss-Schieber halb offen



Endzustand:
Abfluss-Schieber vollständig geschlossen

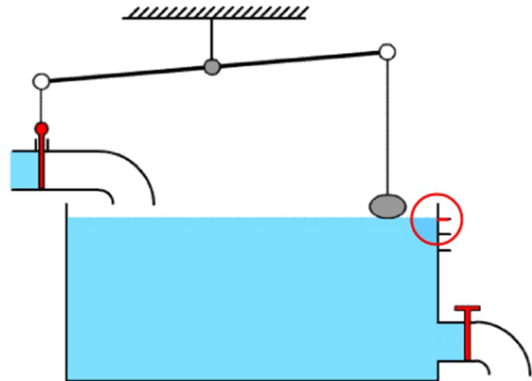
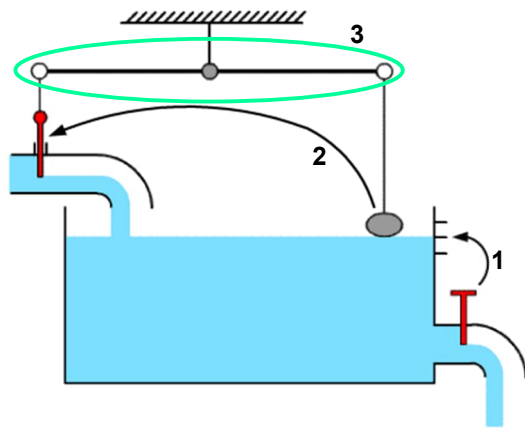
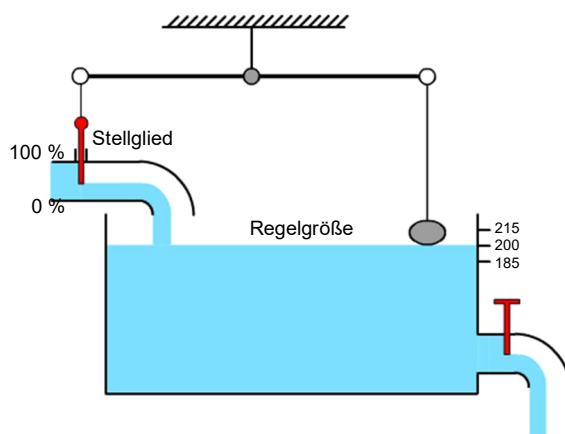


Fig. 5-4 Wasserstandsregelung, Schließen des Abfluss-Schiebers



1. Anhand des oberen Beispiels sieht man, dass eine Veränderung des Handschiebers zu einer Änderung des Wasserstandes (Pegel) im Becken führt.
2. Diese Pegeländerung wird vom Schwimmer erfasst und über das Gestänge direkt in eine Verschiebung des Zufluss-Schiebers umgesetzt.
3. Der Hebelarm wirkt proportional. Der fixe Hebelarm setzt eine Pegeländerung immer im gleichen Verhältnis in eine Verschiebung des Zufluss-Schiebers um.



Im Beispiel ändert sich der Wasserstand zwischen maximal 215 cm und minimal 185 cm. Die Öffnung des Zufluss-Schiebers ändert sich dabei zwischen 0 % und 100 %.

Umgesetzt in regeltechnische Begriffe ist:

- der Zufluss-Schieber das Stellglied
- der Wasserstand die Regelgröße.

Fig. 5-5 Wasserstandsregelung

5.3.2. Eigenschaften des P-Reglers

Diese Beobachtungen zeigen die Eigenschaften eines P-Reglers:

- Er verändert die Stellgröße (den Zufluss-Schieber) proportional zur Regeldifferenz e (zur Änderung des Wasserstandes).
- Er reagiert sofort auf eine Abweichung im Wasserstand und regelt diesen schnell aus.
- Er ist lastabhängig, denn er kann den gewünschten Wasserstand (den Sollwert) nur für eine vordefinierte Position (Offset) des Abfluss-Schiebers einhalten. Für alle anderen Positionen liegt der Wasserstand tiefer oder höher.
- Er hat also eine bleibende Regeldifferenz e_b , außer wenn der Handschieber halb offen ist.

5.3.3. Der Proportionalbereich X_P (P-Band)

Der Proportionalbereich ist die Veränderung der Regelgröße, die eine Verschiebung des Stellgliedes über den ganzen Stellbereich bewirkt.

Damit sich im Beispiel das Stellglied über den gesamten Stellbereich von 0 ... 100 % bewegt, muss sich die Regelgröße um den Regelbereich von 30 cm verändern.

Somit ist im gezeigten Beispiel der Proportionalbereich $X_P = 30$ cm.

(Weil der Wirk Sinn bei vielen Reglern getrennt einstellbar ist, wird der Proportionalbereich X_P üblicherweise als Absolutwert angegeben.)

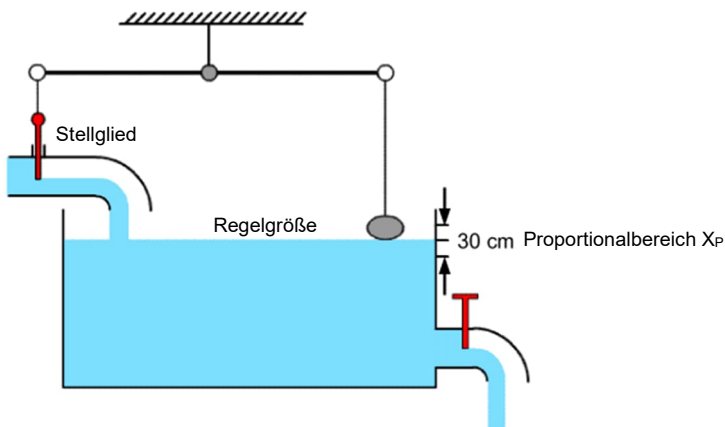


Fig. 5-6 Proportionalbereich X_P

Statische Kennlinie des P-Reglers

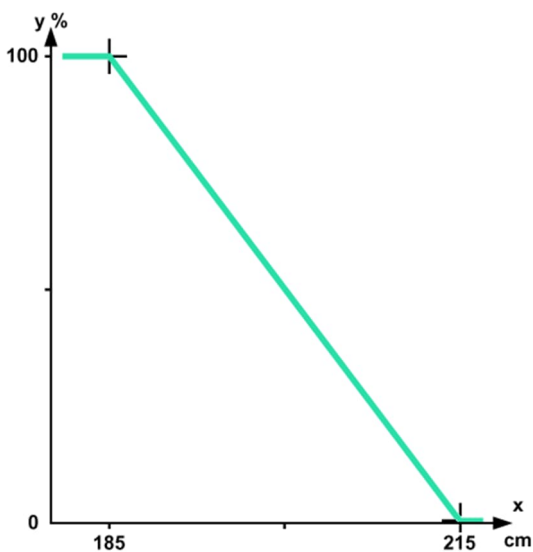


Fig. 5-7 Statische Kennlinie des P-Reglers

Der Zusammenhang zwischen Regelgröße und zugehöriger Verschiebung des Stellgliedes kann in einem x-y-Koordinatensystem grafisch dargestellt werden.

- Der Regelbereich ist 185 ... 215 cm. Die Änderung der Regelgröße wird auf der x-Achse aufgetragen.
- Der Stellbereich ist 0 ... 100 %. Die Verschiebung des Stellgliedes wird auf der y-Achse aufgetragen.

Der P-Regler setzt eine Änderung der Regelgröße proportional um. Daher können die bekannten Eckdaten eingetragen und mit einer Geraden verbunden werden.

Das ist die statische Kennlinie des P-Reglers der Wasserstandsregelung.

Veränderung des Proportionalbereichs X_P

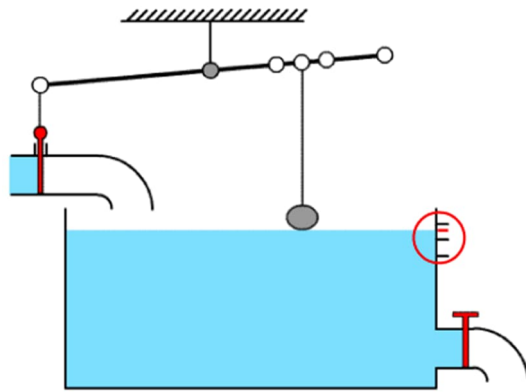


Fig. 5-8 Veränderung des Proportionalbereichs

Wird die Lage des Schwimmers versetzt, verändert sich der Proportionalbereich X_P .

Kleiner Proportionalbereich X_P

Je näher der Schwimmer am Drehpunkt ist, umso näher bleibt der Wasserstand am gewünschten Sollwert von 200 cm.

Das heißt aber auch, dass eine kleine Veränderung im Wasserstand eine relativ große Verschiebung des Zufluss-Schiebers bewirkt. Je näher der Regler beim Drehpunkt befestigt ist, desto mehr verstärkt der Regler eine anstehende Regeldifferenz.

Man kann auch sagen, er reagiert empfindlicher auf eine Regeldifferenz.

Die maximal mögliche Regeldifferenz reduziert sich und damit wird auch der Proportionalbereich X_P verkleinert (z.B. von 30 cm auf 15 cm).

Ein kleiner Proportionalbereich X_P bedeutet:

- Eine kleine bleibende Regeldifferenz (z.B. ± 7.5 cm).
- Der Regler reagiert stark auf eine anstehende Regeldifferenz.

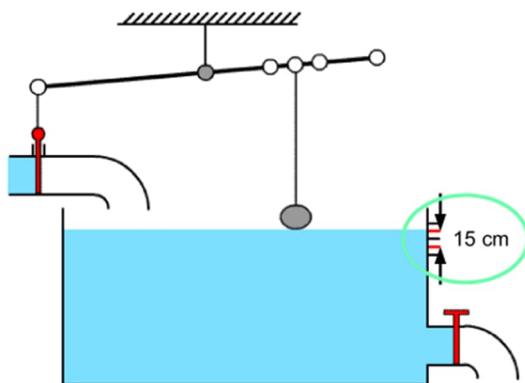


Fig. 5-9 Kleiner Proportionalbereich und kleine Regeldifferenz

Großer Proportionalbereich X_P

Ein großer Proportionalbereich X_P bedeutet:

- Eine große bleibende Regeldifferenz (z.B. ± 15 cm).
- Der Regler reagiert weniger empfindlich auf eine anstehende Regeldifferenz.

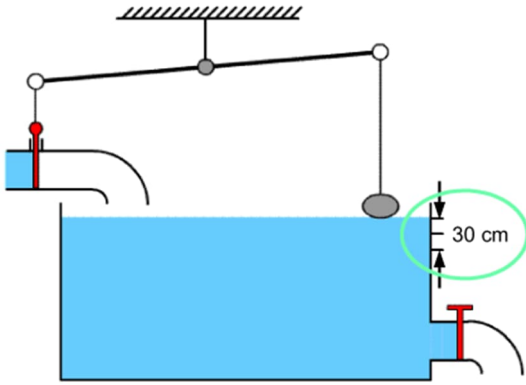


Fig. 5-10 Großer Proportionalbereich und große Regeldifferenz

Grundeinstellungen des Sollwerts

Bisherige Situation

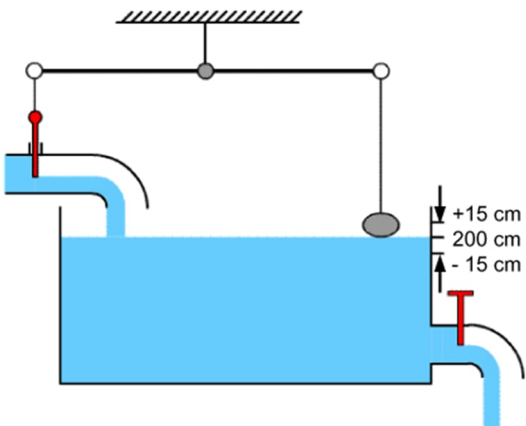


Fig. 5-11 Grundeinstellung Sollwert, bisherige Situation

Der gewünschte Wasserstand von 200 cm konnte eingehalten werden, wenn beide Schieber 50 % offen waren. Der Hebelarm des Reglers war in diesem Punkt im Gleichgewicht und die maximale bleibende Regeldifferenz betrug ± 15 cm.

Es sind auch andere Grundeinstellungen möglich.

Grundeinstellung des Sollwertes bei Nulllast:

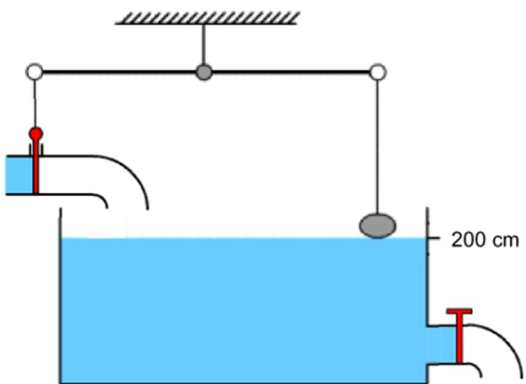


Fig. 5-12 Grundeinstellung Sollwert bei Nulllast
Abfluss-Schieber geschlossen

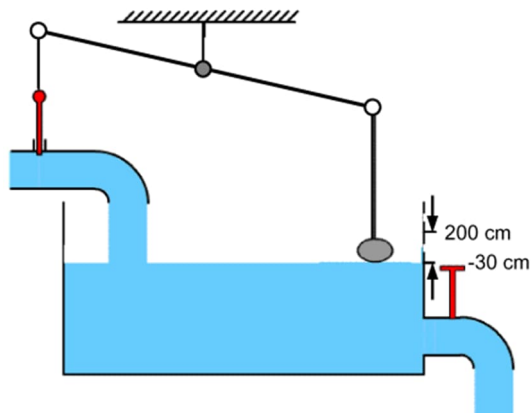


Fig. 5-13 Grundeinstellung Sollwert bei Nulllast
Abfluss-Schieber offen

Der Regler kann auch so eingestellt werden, dass der gewünschte Wasserstand von 200 cm eingehalten wird, wenn beide Schieber geschlossen (d.h. 0 %) sind.

Wird nun der Handschieber ganz geöffnet, so sinkt der Wasserstand um den gesamten Proportionalbereich ab.

→ Maximale bleibende Regeldifferenz = - 30 cm (bei Volllast).

Grundeinstellung des Sollwertes bei Volllast:

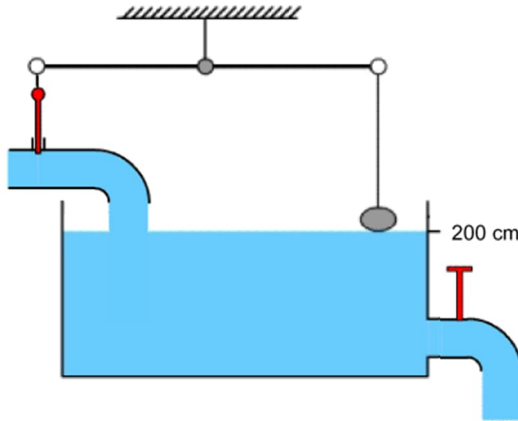


Fig. 5-14 Grundeinstellung Sollwert bei Volllast
Schieber offen

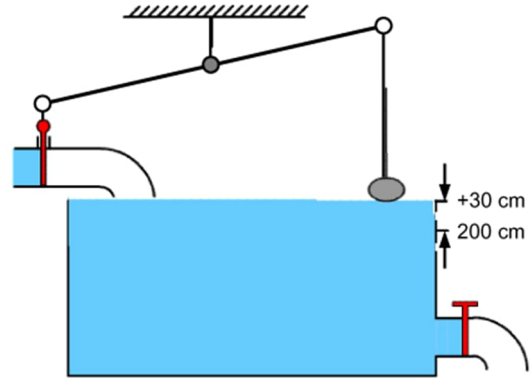


Fig. 5-15 Grundeinstellung Sollwert bei Volllast
Schieber geschlossen

Der Wasserstands-Regler kann auch so eingestellt werden, dass der gewünschte Wasserstand von 200 cm eingehalten wird, wenn beide Schieber voll offen (d.h. 100 %) sind.

Wird nun der Handschieber ganz geschlossen, so steigt der Wasserstand um den gesamten Proportionalbereich an.

→ Maximale bleibende Regeldifferenz = + 30 cm (bei Nulllast).

Die Grundeinstellungen unterscheiden sich durch die eingestellte Länge des Zufluss-Schiebers links.

5.3.4. Offset des P-Reglers (Grundeinstellung)

Grundeinstellung je nach Anwendung

Die Grundeinstellung des Betriebspunktes, bei der der gewünschte Sollwert ohne Regeldifferenz eingehalten wird, muss der Anwendung entsprechend erfolgen.

Diese Einstellmöglichkeit wird als "Offset" bezeichnet, in gewissen Fällen wird auch vom "Eichpunkt" gesprochen.

Fest vorgegebene Grundeinstellung

In vielen P-Reglern ist diese Grundeinstellung fest vorgegeben.

Offset = 0 %

Häufig ist der Regler so eingestellt, dass der Sollwert ohne Abweichung bei Nulllast (Offset = 0 %) eingehalten wird.

Beispiel Wasserstandsregelung:

Der Wasserstand wird bei 200 cm eingehalten und kann nach unten um maximal - 30 cm auf 170 cm abweichen.

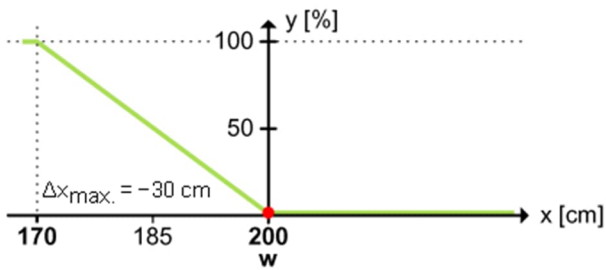


Fig. 5-16 Offset = 0 %

Offset = 100 %

Für andere Anwendungen (z.B. CO₂-Regelung) ist der Regler so eingestellt, dass der Sollwert bei Volllast (Offset = 100 %) eingehalten wird.

Beispiel Wasserstandsregelung:

Der Wasserstand wird bei 200 cm eingehalten und kann nach oben um maximal + 30 cm auf 230 cm abweichen.

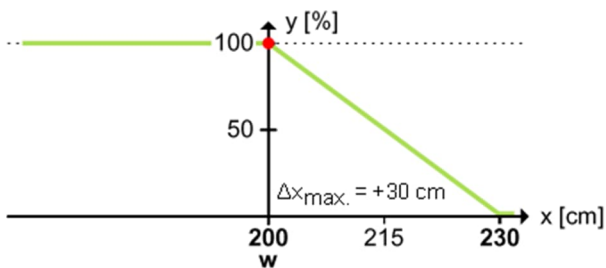


Fig. 5-17 Offset = 100 %

Wählbare Grundeinstellung

Damit der Regler an die Anlagebedürfnisse angepasst werden kann, gibt es auch P-Regler, bei denen diese Grundeinstellung einstellbar ist (Offset wählbar zwischen 0 ... 100 %).

Beispiel Wasserstandsregelung:

Der Wasserstand wird bei 200 cm eingehalten und kann nach oben und unten um maximal ± 15 cm abweichen (Offset = 50 %).

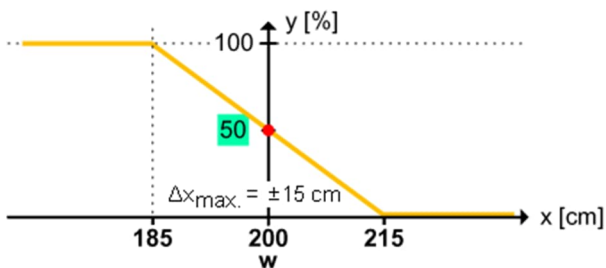


Fig. 5-18 Offset wählbar (z.B. Offset = 50 %)

5.3.5. Übertragungsbeiwert K_P

Bei der Umsetzung eines Eingangswerts in ein Ausgangssignal:

- reagiert der P-Regler sofort auf eine Änderung am Eingang
- wirkt der P-Regler als Verstärker

Dieser Verstärkungsfaktor heißt Übertragungsbeiwert K_P des Reglers.

Er wird bestimmt, indem man die Veränderung des Ausgangssignals ins Verhältnis zur Änderung des Eingangssignals setzt:

$$K_P = \frac{\text{Veränderung Ausgangssignal}}{\text{Veränderung Eingangssignal}} = \frac{\Delta y}{\Delta e}$$

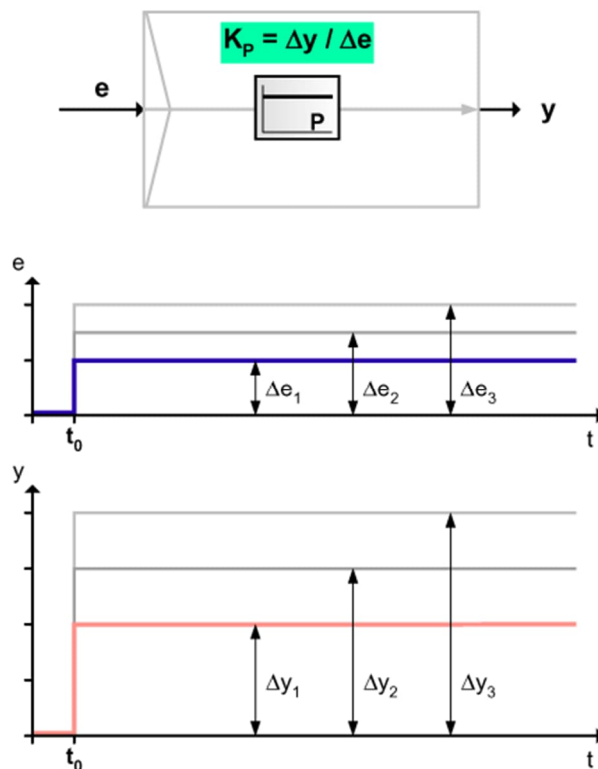


Fig. 5-19 Verhalten des P-Reglers und K_P -Wert

Der Übertragungsbeiwert K_P ist der Parameter, mit dem der P-Regler an die Regelstrecke angepasst wird.

Der Übertragungsbeiwert K_P ist auch der Umkehrwert von X_P .

$$K_P = \frac{\Delta y}{\Delta e} = \frac{Y_h}{X_P} = \frac{1}{X_P} \quad (\text{mit } Y_h = 1)$$

Hinweis zu K_P

K_P ist zwischen Regeldifferenz e und Reglerausgang y definiert (als Übertragungsbeiwert des Regelalgorithmus) und nicht zwischen x und y .

5.3.6. Wirksinn

Gleichläufige Regler

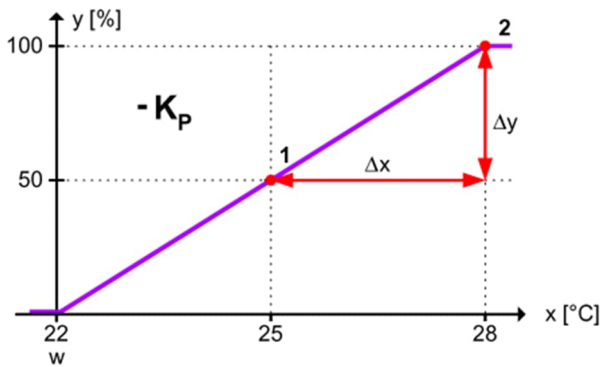


Fig. 5-20 Gleichläufiger Wirksinn, K_P negativ

Beispiel:

Ändert sich die Regelgröße x von 25 °C auf 28 °C, verändert sich der Reglerausgang von 1 nach 2 und erhöht die Stellgröße von 50 % auf 100 %

Der Übertragungsbeiwert K_P des Reglers wird damit

$$K_P = \frac{\Delta y}{\Delta e} = \frac{\Delta y}{-\Delta x}$$

$$K_P = \frac{50 \% - 100 \%}{-(25^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C})} = \frac{-50 \%}{3 \text{ K}} = -16.67 \frac{\%}{\text{K}}$$

Gegenläufige Regler

Hier nochmals die Kennlinie des Wasserstands-Reglers (mit Offset 50 %). Dabei wird mit zunehmender Regelgröße x die Stellgröße y kleiner:

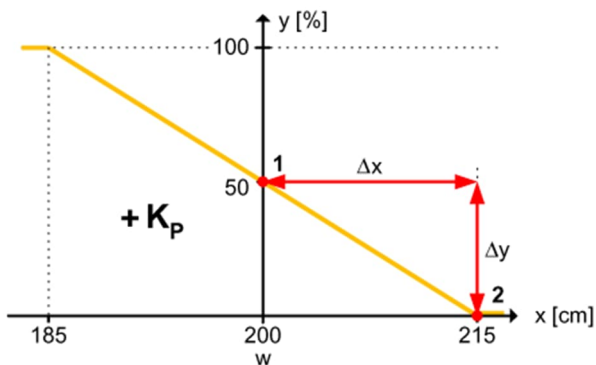


Fig. 5-21 Gegenläufiger Wirksinn, K_P positiv

Es ist ein gegenläufiger P-Regler. Sein Wirksinn ist auch im Übertragungsbeiwert K_P erkennbar.

Beispiel:

Steigt der Wasserstand und damit die Regelgröße x von 200 cm auf 215 cm an, verändert sich der Reglerausgang von 1 nach 2 und die Stellgröße y reduziert sich von 50 % auf 0 %.

Der Übertragungsbeiwert K_P des Reglers wird damit:

$$K_P = \frac{\Delta y}{\Delta e} = \frac{\Delta y}{-\Delta x}$$

$$K_P = \frac{50 \% - 0 \%}{-(200 \text{ cm} - 215 \text{ cm})} = \frac{50 \%}{15 \text{ cm}} = 3.33 \frac{\%}{\text{cm}}$$

Erkenntnisse

- Gegenläufige Regler haben für K_P positive Werte $K_P > 0$.
- Gleichläufige Regler haben für K_P negative Werte $K_P < 0$.

Hinweis:

Bei vielen Reglern kann der Wirksinn separat eingestellt werden, gemäß der zu regelnden Anwendung. Damit ist für K_P keine +/- Skala nötig.

5.3.7. Typische Anwendung für P-Regler

P-Regler können in Anlagen mit einem kleinen Schwierigkeitsgrad S eingesetzt werden, wenn der P-Bereich nicht zu groß eingestellt werden muss.

Beispiel

Eine Raumtemperaturregelung ist mit einem P-Regler bestückt und übernimmt die Feinregulierung im Raum. Die Versorgungstemperatur auf den Heizkörper ist vorgeregelt.

Der Proportionalbereich X_P kann deshalb relativ klein gewählt werden (z.B. 2 K).

Der Regler kann damit die Temperatur innerhalb akzeptabler Grenzen zum gewünschten Sollwert halten.

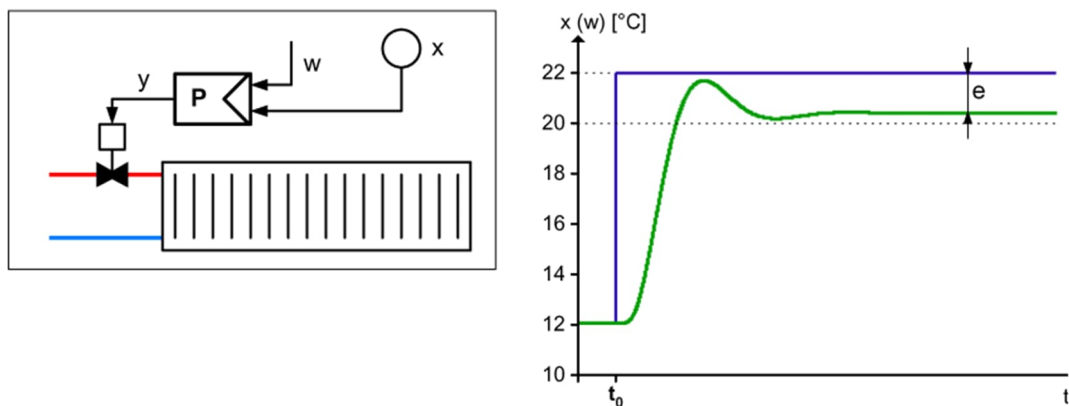


Fig. 5-22 Raumtemperaturregelung mit einem P-Regler

5.3.8. Zusammenfassung P-Regler

Eigenschaften des P-Reglers

Der P-Regler

- reagiert sofort auf eine Regeldifferenz e
- hat eine bleibende Regeldifferenz

Proportionalbereich X_P und Übertragungsbeiwert K_P

Der Proportionalbereich X_P (auch P-Band) sagt aus, welche Regelgrößen-Änderung Δx am Regler anstehen muss, damit dieser die Stellgröße y um den ganzen Stellbereich Y_h ändert (z.B. 0 ... 100 %).

Der Übertragungsbeiwert K_P (auch Verstärkungsfaktor) des Reglers genannt und ist der Umkehrwert von X_P , d.h. $K_P = 1/X_P$.

$$K_P = \frac{\Delta y}{\Delta e} = \frac{\Delta y}{-\Delta x}$$

Wirk Sinn des P-Reglers

Der Wirk Sinn des P-Reglers kann gleichläufig oder gegenläufig sein:

- Ein gleichläufiger Regler erhöht das Stellsignal y mit zunehmender Regelgröße x .
- Ein gegenläufiger Regler reduziert das Stellsignal y mit zunehmender Regelgröße x .

5.4. I-Regler (Integral-Regler)

Der P-Regler ist zwar schnell, erreicht aber den gewünschten Sollwert nicht ganz. Er ist lastabhängig und hat eine bleibende Regeldifferenz e_b .

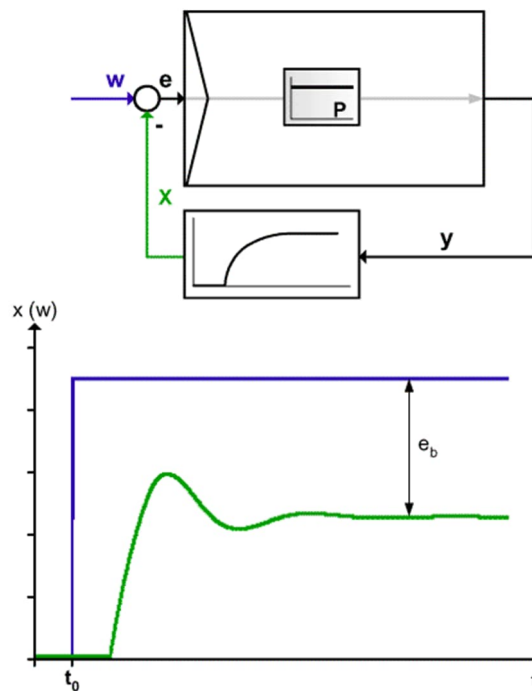


Fig. 5-23 P-Regler

Aus diesem Grund braucht es einen Regler, der solange regelt, bis der gewünschte Sollwert erreicht ist. Der Integral-Regler (I-Regler) bietet diese Eigenschaft.

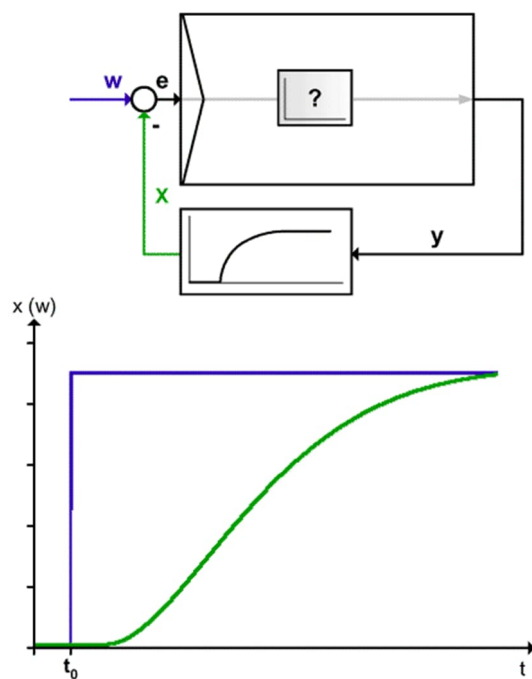


Fig. 5-24 I-Regler

5.4.1. Beispiel für einen I-Regler

In einem Druckluftbehälter (Teil blau, unten) wird der Versorgungsdruck für die Verbraucher konstant gehalten. Dies geschieht mit einem aufgebauten hydraulischen Regler (Teil gelb, oben).

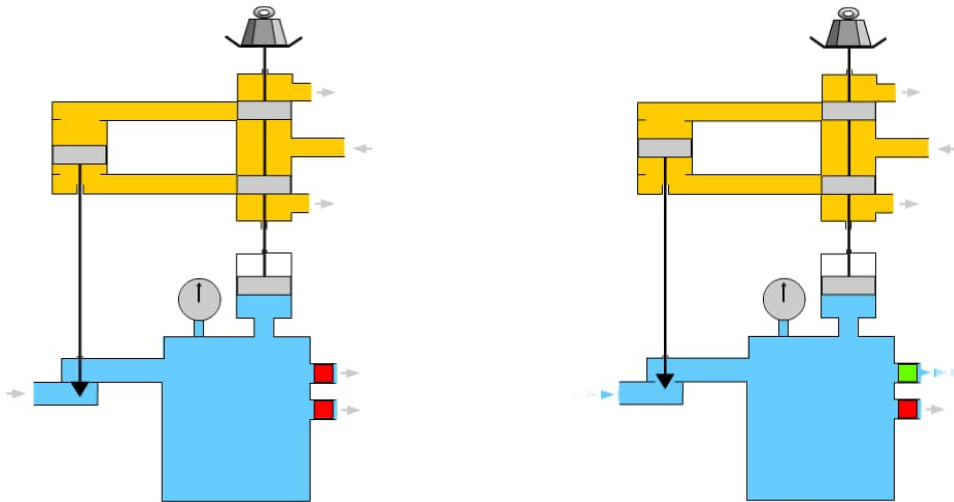


Fig. 5-25 Druckluftbehälter mit hydraulischem Regler (I-Regler hält Druck im Behälter konstant auch bei ändernder Last)

5.4.2. Übertragungsverhalten

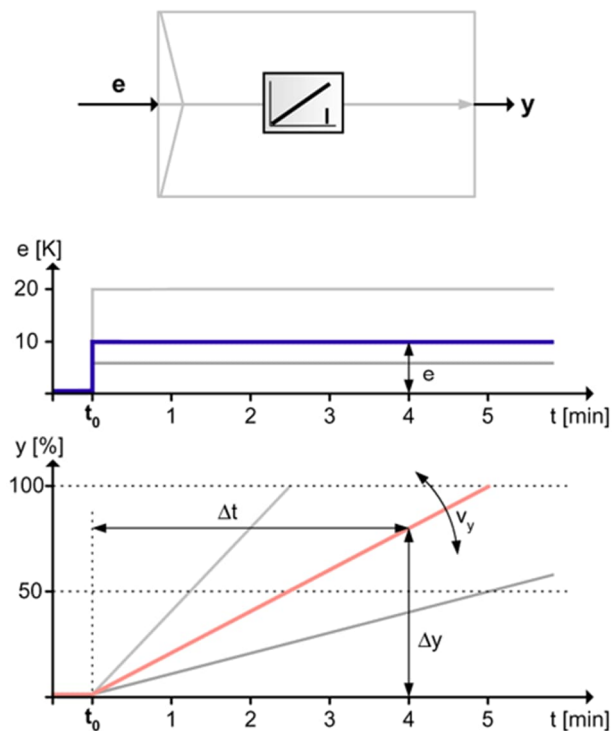


Fig. 5-26 Übertragungsverhalten des I-Reglers

Der I-Regler

- liefert bei gleichbleibender Regeldifferenz e ein stetig zunehmendes Ausgangssignal.
- berücksichtigt die Vergangenheit der Regeldifferenz e .

Das heißt, die Änderungsgeschwindigkeit des Stellsignals ist proportional zur Regeldifferenz e .

Der Integrierbeiwert K_I

Der Integrierbeiwert K_I ist die Kenngröße, die diesen Zusammenhang berücksichtigt.

K_I wird bestimmt, in dem man die Stellgeschwindigkeit v_y ins Verhältnis zur anstehenden Regeldifferenz e setzt:

$$K_I = \frac{\text{Stellgeschwindigkeit}}{\text{Regeldifferenz}} = \frac{v_y}{e} = \frac{\Delta y_I}{\Delta t \cdot e}$$

Achtung auf:

- Wirksinn, bzw. Vorzeichen ($\pm$)
- Einheiten von K_I

Die Reaktion des I-Reglers ist sehr langsam. Deshalb wird er nicht alleine verwendet.

Beispiel:

$$K_I = \frac{v_y}{e} = \frac{\Delta y_I}{\Delta t \cdot e} = \frac{80 \%}{4 \text{ min} \cdot 10 \text{ K}} = 2 \frac{\%}{\text{K} \cdot \text{min}}$$

Wert des Reglerausgangs

Aus der Definition des Integrierbeiwerts K_I ist ersichtlich, wie ein I-Regler den momentanen Wert des Reglerausgangs berechnet:

$$\Delta y_I = K_I \cdot e \cdot \Delta t$$

Diese Berechnung lässt sich einfach nachvollziehen, wenn eine gleichbleibende Regeldifferenz e am I-Regler (mit Integrierbeiwert $K_I = 25 \text{ } \%/(\text{K} \cdot \text{min})$) ansteht.

Beispiel:

$$\Delta y_I = 2.5 \frac{\%}{\text{K} \cdot \text{min}} \cdot 4 \text{ K} \cdot 5 \text{ min} = 50 \%$$

Der I-Regler berechnet den Reglerausgang aber nicht erst zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern fortlaufend.

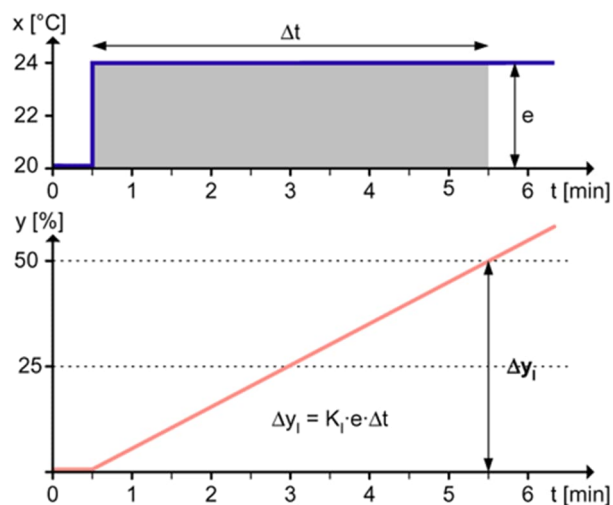


Fig. 5-27 Berechnung des Werts Δy_I am Reglerausgang

Dabei berechnet er den Wert Δy_i jeweils für einen sehr kurzen Zeitabschnitt (Δt ist beinahe 0) und summiert diese Werte fortlaufend auf. D.h., er integriert diese über die Zeit.

$$y_i = \sum (K_i \cdot e_1 \cdot \Delta t_1 + K_i \cdot e_2 \cdot \Delta t_2 + K_i \cdot e_3 \cdot \Delta t_3 + \dots)$$

$$y_i = K_i \sum (e_1 \cdot \Delta t_1 + e_2 \cdot \Delta t_2 + e_3 \cdot \Delta t_3 + \dots)$$

$$y_i = K_i \cdot \int_0^t e(r) \cdot d\tau$$

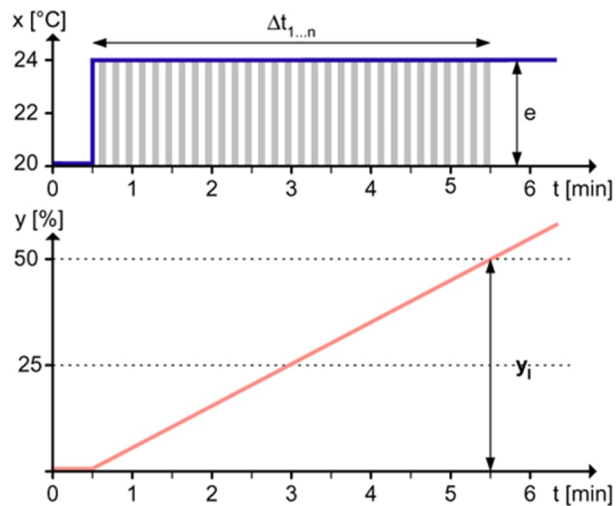


Fig. 5-28 Berechnung des Werts Δy_i am Reglerausgang (allgemein)

Der I-Regler tut dies auch so, wenn sich die Regeldifferenz, wie in einer geregelten Anlage üblich, laufend ändert.

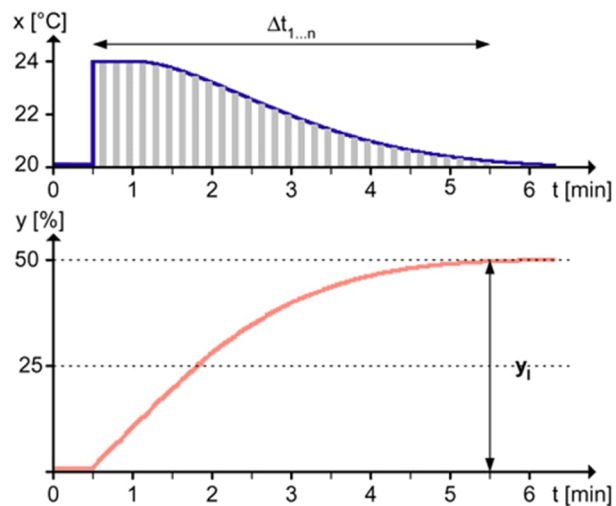


Fig. 5-29 Berechnung des Werts Δy_i am Reglerausgang mit üblichem Verlauf der Regelgröße x

Beispiel: Bestimmung des K_I -Wertes anhand der beiden unten stehenden Graphen.

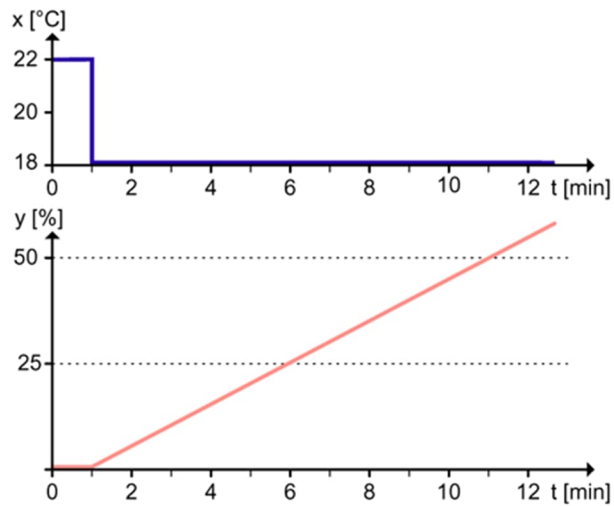


Fig. 5-30 Bestimmung des K_I -Werts

Die Temperatur sinkt von der gewünschten Temperatur (Sollwert) von 22 °C auf 18°C ab. Der I-Regler reagiert darauf und ändert sein Stellsignal y von 0 auf 50% über den Zeitraum von 10 Minuten. Aus diesem Verhalten lässt sich der Integrierbeiwert K_I wie folgt bestimmen:

$$K_I = \frac{v_y}{e} = \frac{\Delta y_I}{\Delta t \cdot e} = \frac{50 \%}{10 \text{ min} \cdot (-4 \text{ K})} = 1.25 \frac{\%}{\text{K} \cdot \text{min}}$$

Dieser Regler hat einen gegenläufigen Wirksinn, da er bei sinkender Regelgröße das Ausgangssignal erhöht.

5.4.3. Richtungsänderung von e

Der I-Regler arbeitet, solange eine Regeldifferenz e ansteht (vgl. auch Fig. 5-29).

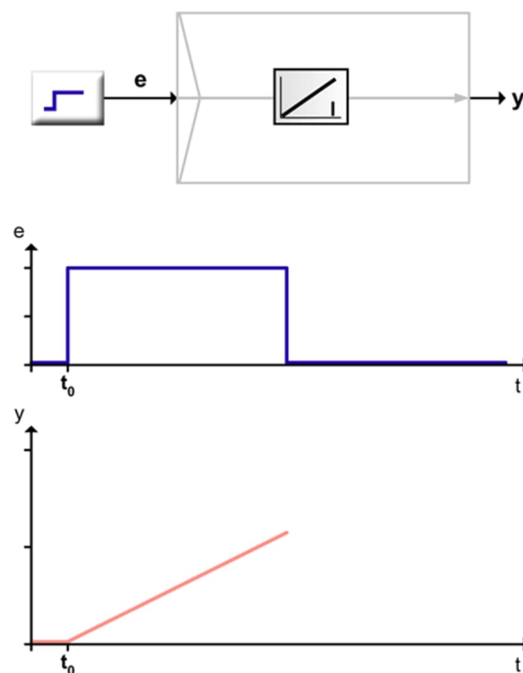


Fig. 5-31 Reaktion des I-Reglers auf eine anstehende Regeldifferenz e

Was geschieht nun, wenn während der Arbeit des I-Reglers die Regeldifferenz $e = 0$ wird?
Welchen Verlauf nimmt der Reglerausgang?

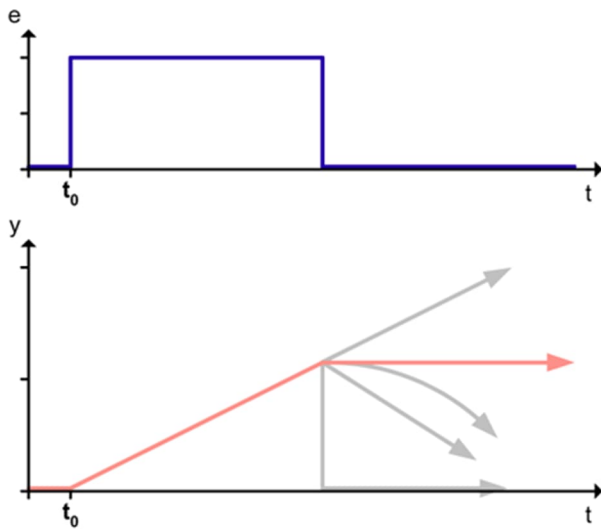


Fig. 5-32 Verlauf des Reglerausgangs wenn Regeldifferenz $e = 0$ wird

5.4.4. Erkenntnis

Die untenstehenden Darstellungen zeigen das Verhalten des I-Reglers sehr schön:

1. Jede Richtungsänderung der Regeldifferenz e widerspiegelt sich in einem Wendepunkt des Reglerausgangs.
2. Steht keine Regeldifferenz e an ($e = 0$), dann trägt der I-Regler die Last – er läuft horizontal auf dem letzten Wert weiter (trägt Last).

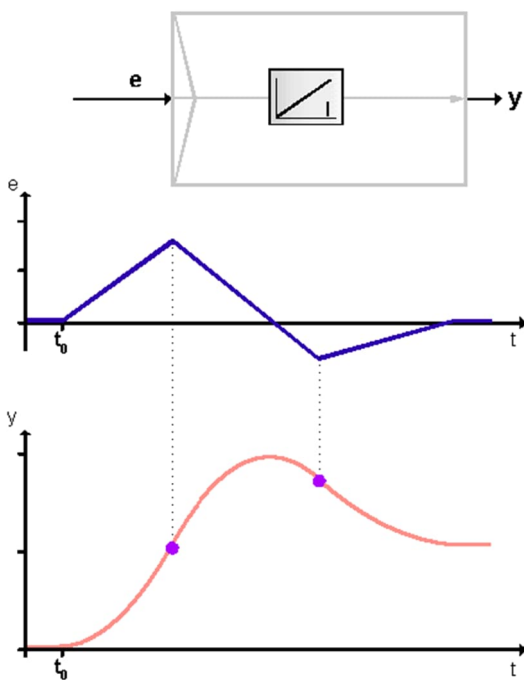


Fig. 5-33 Wendepunkte bei Richtungsänderung von e

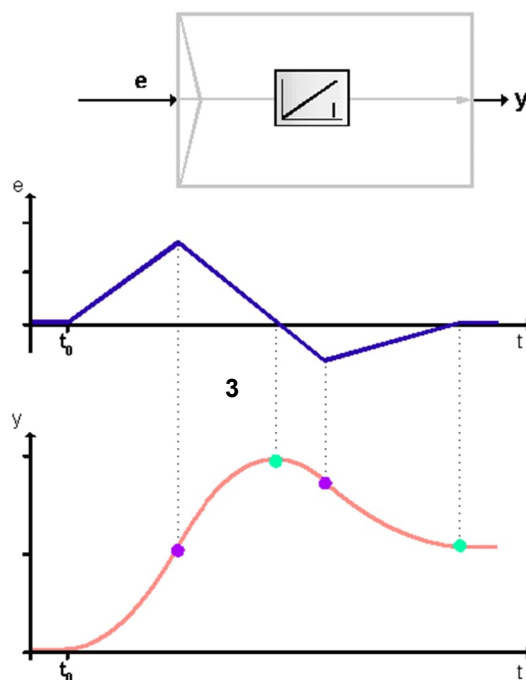


Fig. 5-34 Horizontales Weiterlaufen des I-Reglers wenn $e = 0$ (konstant)

5.4.5. Zusammenfassung I-Regler

Eigenschaften des I-Reglers

- Der I-Regler ist langsam (verglichen mit einem P-Regler).
- Der I-Regler regelt solange, wie eine Regeldifferenz e ansteht.
- Der Reglerausgang bleibt auf dem Wert stehen, der nötig war, um die Regeldifferenz e auf 0 zu reduzieren (d.h. er trägt die Last).

Der Integrierbeiwert K_I

Der Integrierbeiwert K_I basiert auf der Regeldifferenz e und der Stellgeschwindigkeit v_y der Stellgröße. Er berücksichtigt damit auch die Zeitdauer während der die Regeldifferenz ansteht.

$$K_I = \frac{\text{Stellgeschwindigkeit}}{\text{Regeldifferenz}} = \frac{v_y}{e} = \frac{\Delta y_I}{\Delta t \cdot e}$$

5.5. PI-Regler

5.5.1. Kombination von P- und I-Regler

Eigenschaften des I-Reglers

- Er arbeitet, bis der gewünschte Sollwert erreicht ist.
- Er ist langsam.

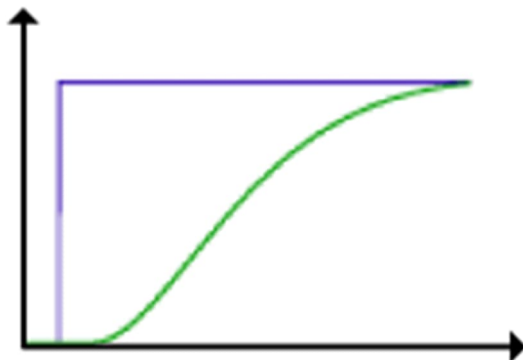


Fig. 5-35 Verhalten I-Regler

Eigenschaften des P-Reglers

- Er ist schnell.
- Er weist eine bleibende Regeldifferenz auf.

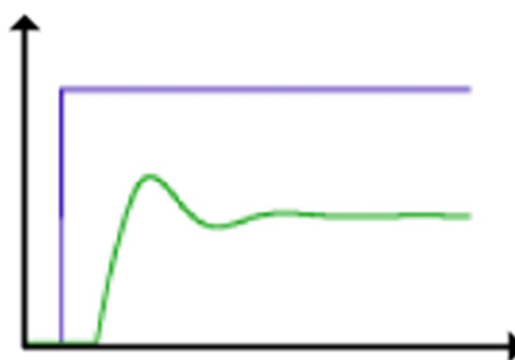


Fig. 5-36 Verhalten P-Regler

Durch die Kombination von P- und I-Regler werden die Vorteile vereint und die Nachteile eliminiert:

- Der P-Regler ist schnell und kompensiert die Langsamkeit des I-Reglers.
- Der I-Regler regelt solange eine Regeldifferenz e ansteht und eliminiert dadurch die bleibende Regeldifferenz e des P-Reglers.

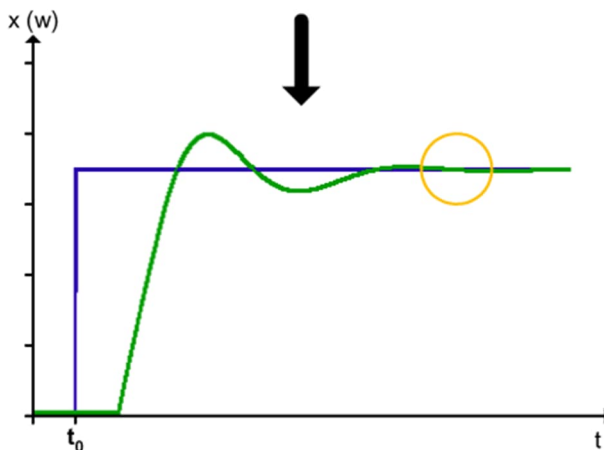


Fig. 5-37 PI-Regler

5.5.2. Übertragungsverhalten

Kenngrößen

Kombiniert man den P- und den I-Regler zum PI-Regler, braucht man auch Kenngrößen um die beiden Regler-Anteile an die Gegebenheiten der Regelstrecke anzupassen.

Für den P-Anteil kann wiederum der Übertragungsbeiwert K_P verwendet werden, da dieser eine anstehende Regeldifferenz sofort proportional in ein Stellsignal y_P umsetzt.

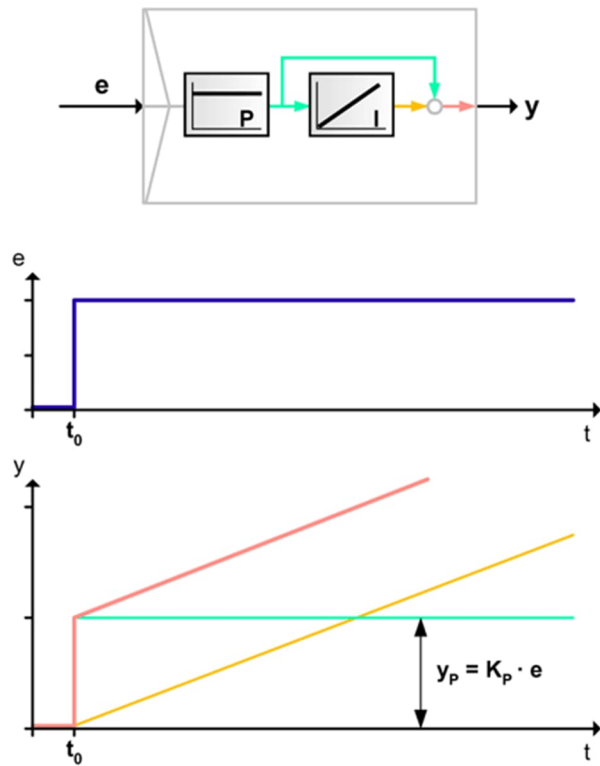


Fig. 5-38 PI-Regler: Stellsignal-Anteil y_P

Der I-Anteil y_I wird aus dem Integrierbeiwert K_I , der Regeldifferenz e und der Zeitdifferenz Δt ermittelt. Da im PI-Regler der I-Anteil zum P-Anteil dazugerechnet wird, kann zur Anpassung des I-Anteils nicht mehr der Integrierbeiwert K_I verwendet werden.

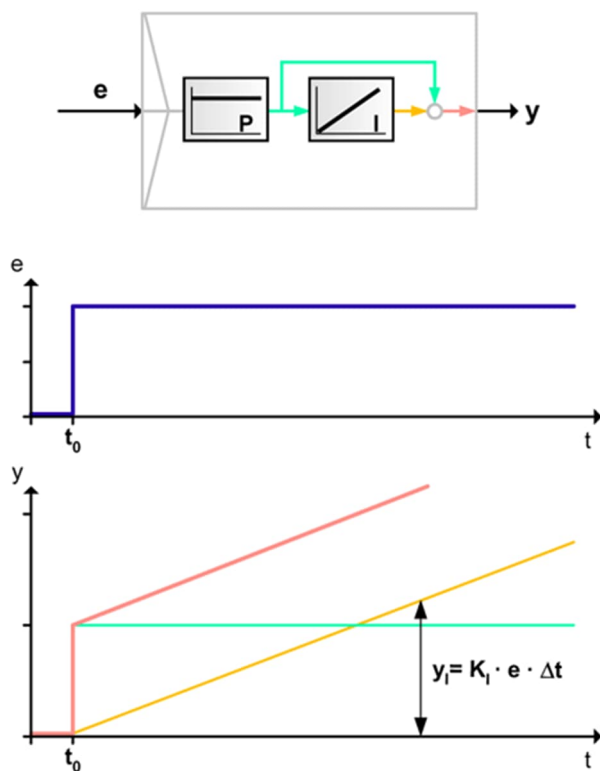


Fig. 5-39 PI-Regler: Stellsignal-Anteil y_I

5.5.3. Nachstellzeit T_n

Die Nachstellzeit T_n wird als Kenngröße für den I-Anteil des PI-Reglers verwendet, da sie sowohl K_P wie auch K_I berücksichtigt.

Die Nachstellzeit T_n definiert, welche Zeit der I-Anteil braucht, um auf dasselbe Ausgangssignal zu kommen, das der P-Anteil sofort erzeugt, wenn ein Eingangssprung e anliegt. T_n ist ein Maß für die Steigung des I-Anteils.

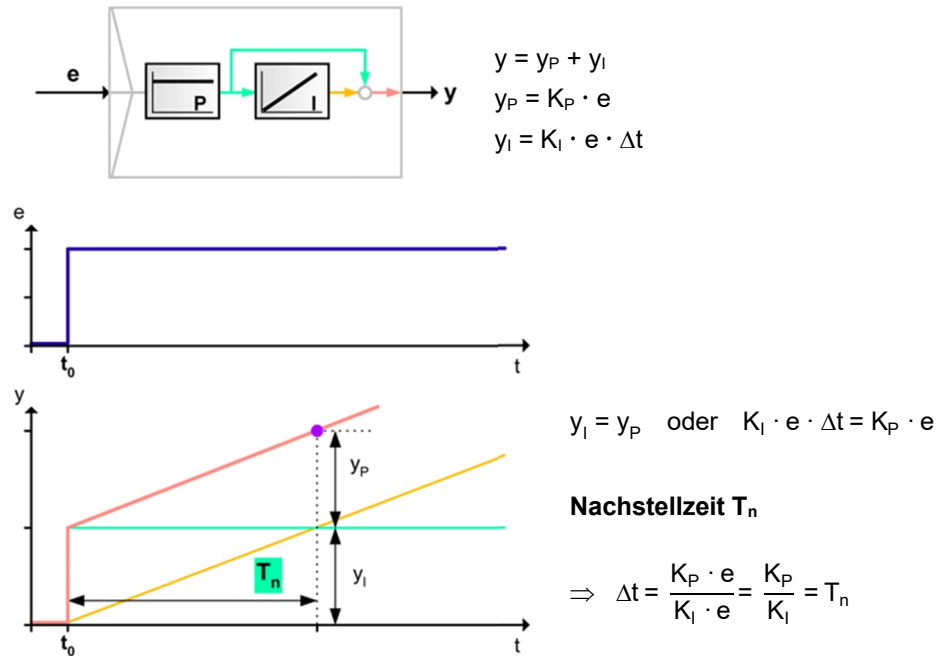


Fig. 5-40 Nachstellzeit T_n als Kenngröße für den I-Anteil im PI-Regler

In der Sprungantwort des PI-Reglers findet man T_n auch, indem man die Steigung des Reglerausgangs verlängert, bis diese die Nulllinie schneidet.

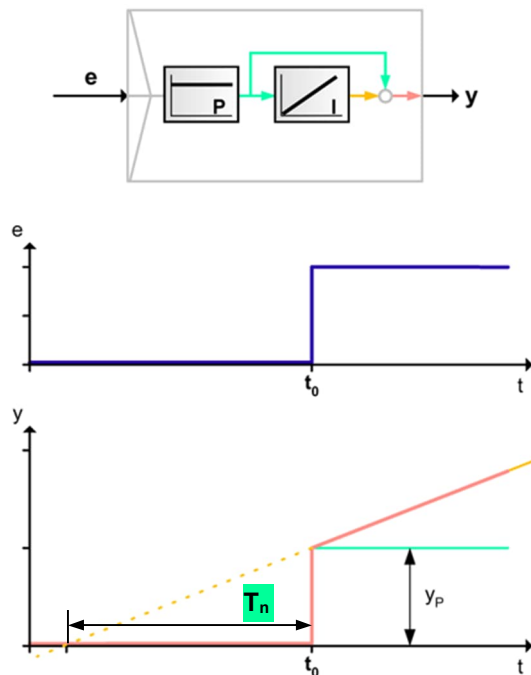


Fig. 5-41 Nachstellzeit T_n anhand von Steigung des Reglerausgangs

5.5.4. Erkenntnis

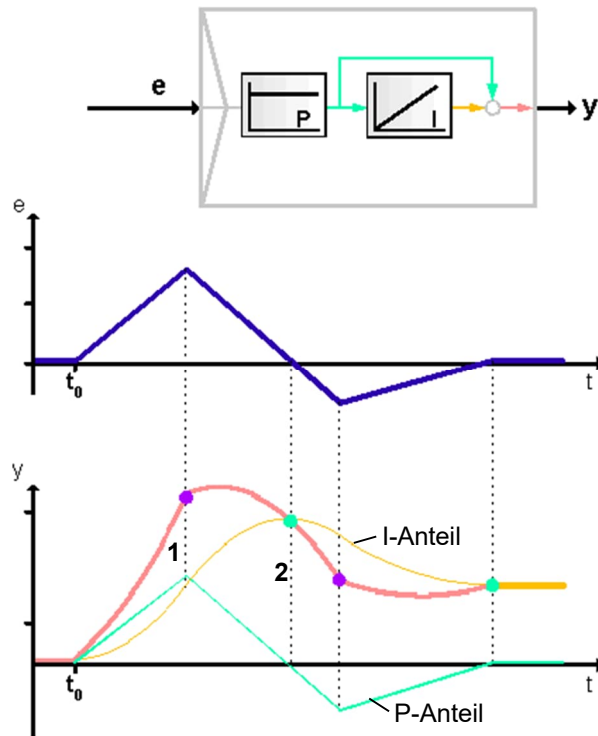


Fig. 5-42 Verhalten des PI-Reglers

In dieser Simulation zeigt sich das Verhalten eines PI-Reglers sehr schön:

1. Jede Richtungsänderung der Regeldifferenz widerspiegelt sich in einer Richtungsänderung des Reglerausgangs.
 - Der P-Anteil ändert sofort die Richtung.
 - Der I-Anteil hat einen Wendepunkt.
2. Steht keine Regeldifferenz mehr an (bei $e = 0$), dann trägt der I-Anteil die gesamte Last und der Reglerausgang läuft horizontal weiter.
Beim Nulldurchgang stimmt dies natürlich nur für einen kurzen Moment.

5.5.5. Typische Anwendungen für PI-Regler

Der PI-Regler ist schnell und regelt aus. Dank diesen vorteilhaften Eigenschaften wird er in vielen haustechnischen Anwendungen eingesetzt, z.B.

- Zulufttemperatur-Regelung
- Volumenstrom-Regelung
- Vorlauftemperatur-Regelung
- u.a.

Er kommt überall dort zur Anwendung, wo

- eine bleibende Regeldifferenz e nicht zulässig ist,
- der Schwierigkeitsgrad S nicht allzu groß ist,
- und die Regelstrecke nicht zu träge ist.

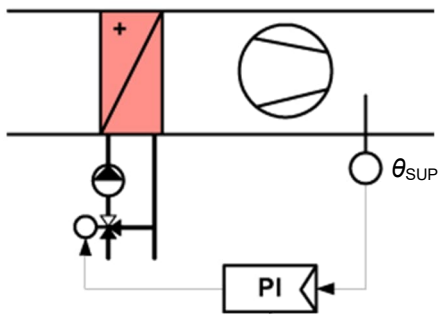


Fig. 5-43 Zulufttemperatur-Regelung mit PI-Regler

Oft wird der PI-Regler auch in einem Hilfsregelkreis eingesetzt, in Ergänzung zu einem P-Regler oder PI-Regler (vgl. „Kaskadenregelung“). Damit können sehr gute Resultate erzielt werden.

5.5.6. Zusammenfassung PI-Regler

Eigenschaften des PI-Reglers

- Der PI-Regler reagiert sofort auf eine Regeldifferenz e .
- Der PI-Regler regelt, bis die Regeldifferenz $e = 0$ und somit der gewünschte Sollwert erreicht ist.
- Der PI-Regler wird in vielen gebäudetechnischen Anwendungen eingesetzt.

Kenngößen

Der PI-Regler hat zwei Kenngößen, mit denen er an die Gegebenheiten der Regelstrecke angepasst werden kann:

- Der Übertragungsbeiwert K_P (als Verstärkungsfaktor) oder das P-Band X_P
- Die Nachstellzeit T_n .
Sie ist abhängig von K_P , da sie aus K_P und dem Integrierbeiwert K_I des I-Anteils bestimmt wird.

5.6. D-Glied (Differential-Glied)

Viele Anwendungen können mit einem PI-Regler zufriedenstellend geregelt werden.

Oft dauert jedoch der Einschwingvorgang zu lange und ein schnellerer Einschwingvorgang ist gefordert.

Gewisse Anwendungen erfordern, dass der neue Sollwert schnell erreicht wird - ohne dass dabei der Einschwingvorgang instabil wird.

Dies bedingt, dass der Regler auf die anstehende Regeldifferenz zu Beginn stärker reagieren muss als nur mit dem P- oder I-Anteil. Der Einschwingvorgang muss dabei aber trotzdem stabil bleiben.

Diese Anforderungen können mit dem D-Glied erfüllt werden, wenn es zusammen mit einem PI- oder P-Regler eingesetzt wird. Das D-Glied beschleunigt und stabilisiert.

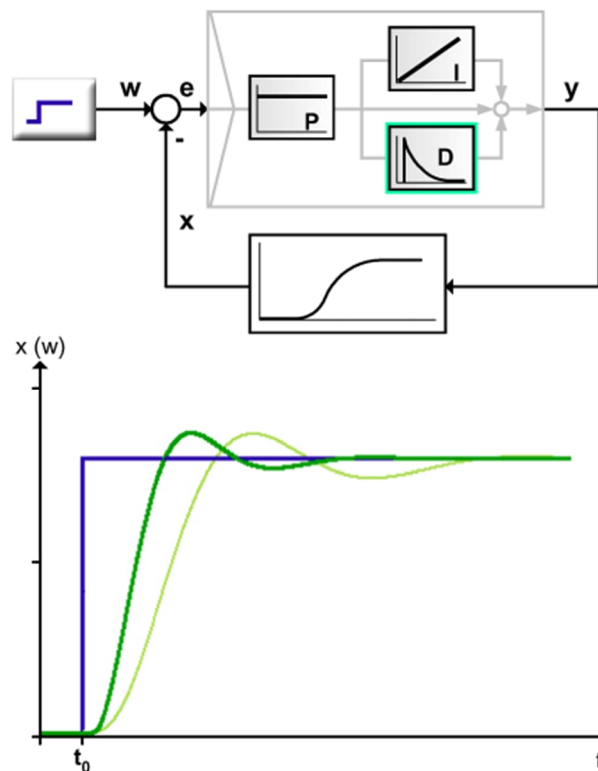


Fig. 5-44 PID-Regler

5.6.1. Übertragungsverhalten

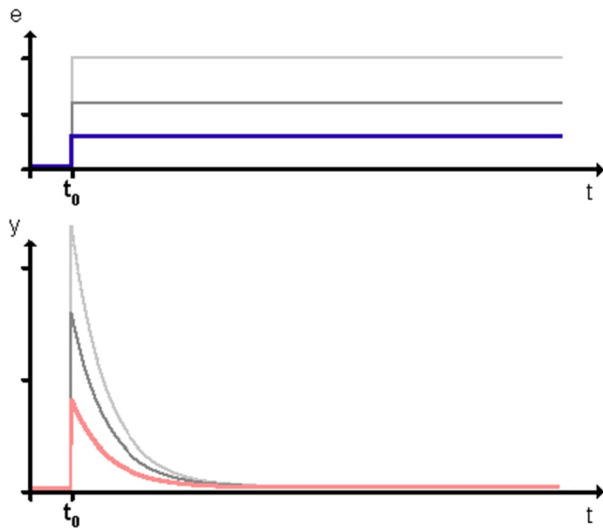


Fig. 5-45 Verhalten des D-Anteils, Sprungantwort

Das D-Glied reagiert sofort auf einen Eingangssprung. Anschließend klingt das Ausgangssignal ab. Theoretisch ist die Reaktion des D-Gliedes auf einen Eingangssprung sehr kurz – eine sogenannte "Nadelfunktion".

Weil Regelstrecken fast immer gewisse Verzögerungsglieder (d.h. Speicher) enthalten, wird das reale D-Glied praxisgerecht so gebaut, dass seine sprunghafte Wirkung verzögert abklingt.

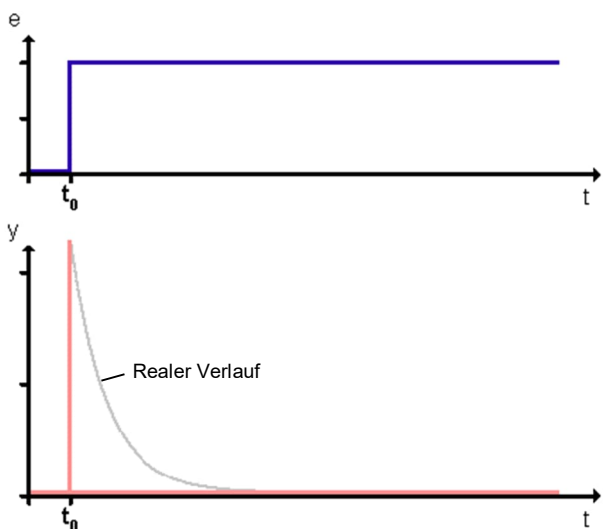


Fig. 5-46 D-Glied „Nadelfunktion“ und realer Verlauf, Sprungantwort

Rampenantwort für das D-Glied

In der Praxis wird meistens nicht die Antwort auf einen Sprung betrachtet, sondern die sogenannte Rampenantwort. Das ist die Antwort auf eine stetig ansteigende Regeldifferenz e .

- Die Stellgrößenänderung ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz.

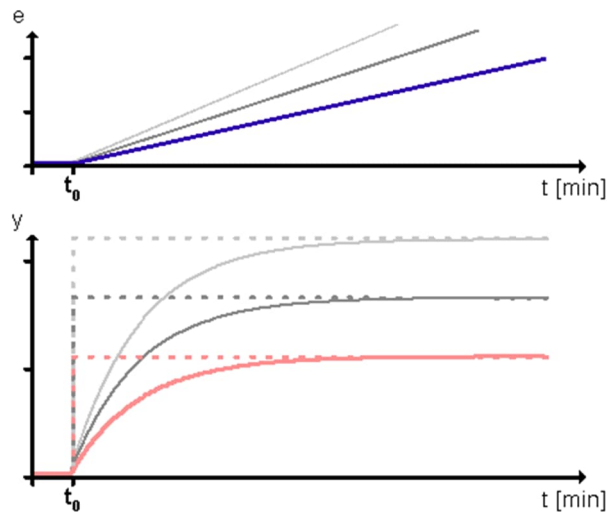


Fig. 5-47 D-Glied Rampenantwort

Der kurvenförmige Verlauf der Rampenantwort zu Beginn ist bedingt durch das "reale" D-Glied. Bei einem "idealen" D-Glied wäre der Verlauf sprung-förmig (wie oft in der Fachliteratur gezeigt – in unserer Grafik gestrichelt).

5.6.2. Differenzierbeiwert K_D

Der Differenzierbeiwert K_D ist die Kenngröße des D-Gliedes. Sie ist das Verhältnis von Stellgrößen-Änderung zur Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz. Die Änderung der Stellgeschwindigkeit v_y ($v_y = \Delta y / \Delta t$) ist proportional zur Regeldifferenz e .

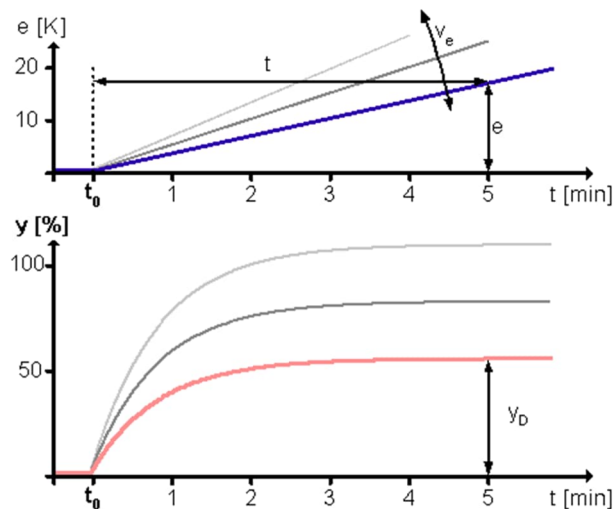


Fig. 5-48 Differenzierbeiwert

$$K_D = \frac{\text{Stellgrößenänderung}}{\text{Änderungsgeschwindigkeit } e} = \frac{\Delta y_D}{v_e} = \frac{\Delta y_D \cdot \Delta t}{e}$$

Kein Regler enthält nur ein D-Glied. In der Praxis wird das D-Glied - auf Grund seines Verhaltens – nur in Kombination mit anderen Reglern (P oder PI) eingesetzt.

5.7. PD-Regler

5.7.1. Übertragungsverhalten

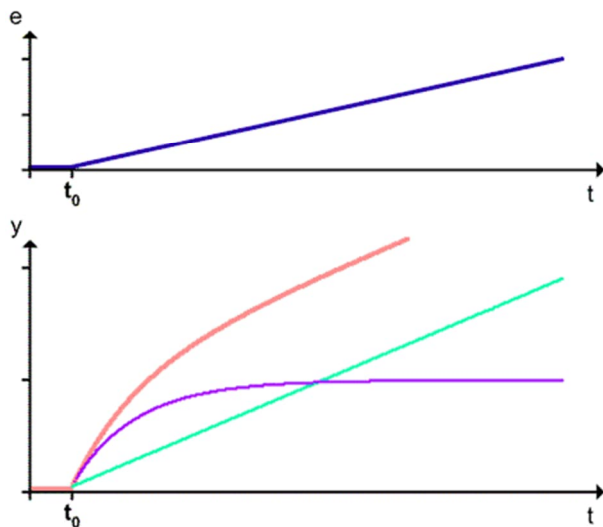
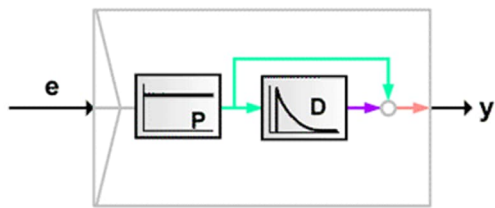


Fig. 5-49 PD-Regler

Kenngrößen

Kombiniert man den P-Regler und den D-Anteil (reales D-Glied) zum PD-Regler, braucht man auch Kenngrößen, um die beiden Regler-Anteile an die Gegebenheiten der Regelstrecke anzupassen.

Für den P-Anteil kann wiederum der Übertragungsbeiwert K_P verwendet werden, da dieser eine anstehende Regeldifferenz sofort proportional in das Stellsignal y_P umsetzt.

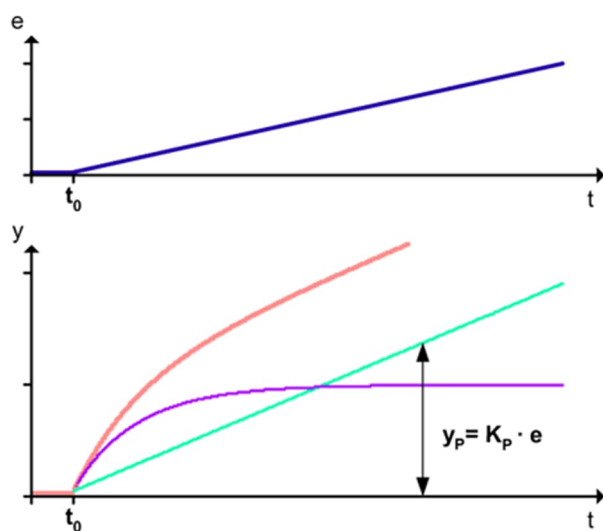


Fig. 5-50 Kenngröße des P-Reglers: Übertragungsbeiwert K_P

Der D-Anteil y_D wird aus dem Differenzierbeiwert K_D und der Änderungsgeschwindigkeit v_e der Regeldifferenz ermittelt.

5.7.2. Vorhaltezeit T_v

Da im PD-Regler, der D- und der P-Anteil summiert werden, kann zur Anpassung des D-Anteils nicht der Differenzierbeiwert K_D verwendet werden.

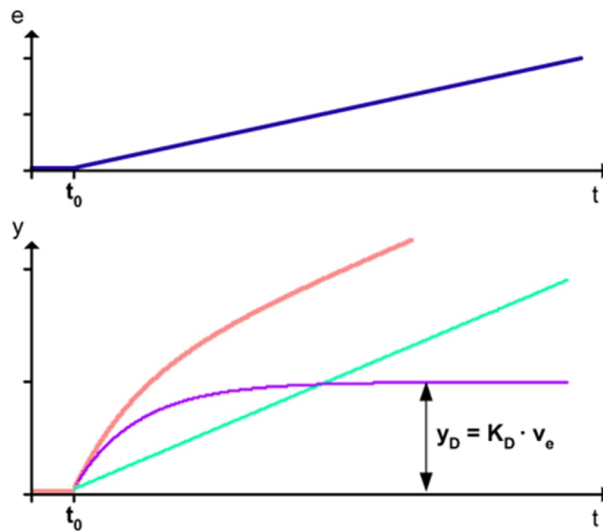


Fig. 5-51 PD-Regler: Übertragungsbeiwert K_P als Kenngröße für P-Anteil

Für den D-Anteil des PD-Reglers wird die Vorhaltezeit T_v als Kenngröße verwendet, da sie sowohl K_P wie auch K_D berücksichtigt.

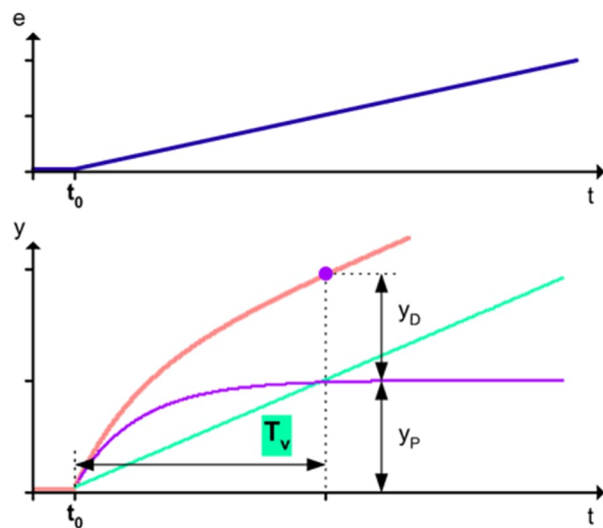


Fig. 5-52 PD-Regler: Vorhaltezeit T_v als Kenngröße für D-Anteil

Die Vorhaltezeit T_v definiert, welche Zeit der P-Anteil braucht, um auf dasselbe Ausgangssignal zu kommen, das der D-Anteil sofort erzeugt.

$$y_D = y_P \quad \text{oder} \quad K_D \cdot v_e = K_D \cdot \frac{e}{\Delta t} = K_P \cdot e$$

Vorhaltezeit T_v

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{K_D \cdot e}{K_P \cdot e} = \frac{K_D}{K_P} = T_v$$

In der Rampenantwort des PD-Reglers findet man T_v auch, wenn man die Steigung des Reglerausgangs verlängert, bis diese die Nulllinie schneidet.

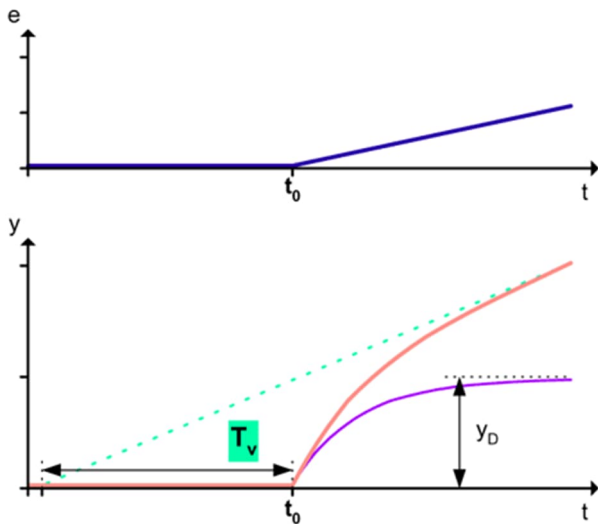
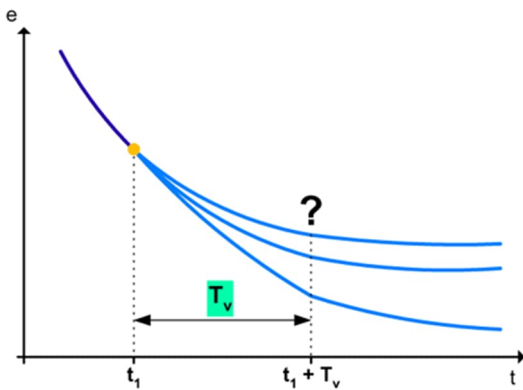


Fig. 5-53 Rampenantwort des PD-Reglers und Vorhaltezeit T_v

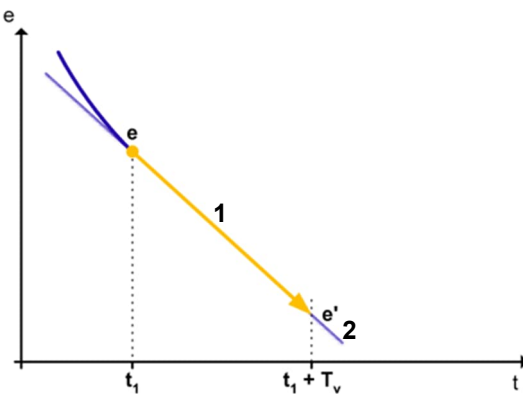
5.7.3. Wie arbeitet der D-Anteil mit der Vorhaltezeit T_v ?

Der D-Anteil macht eine Vorhersage über den zukünftigen Wert der Regeldifferenz – ausgehend von ihrem momentanen Verlauf.



Lineare Extrapolation um Vorhaltezeit T_v

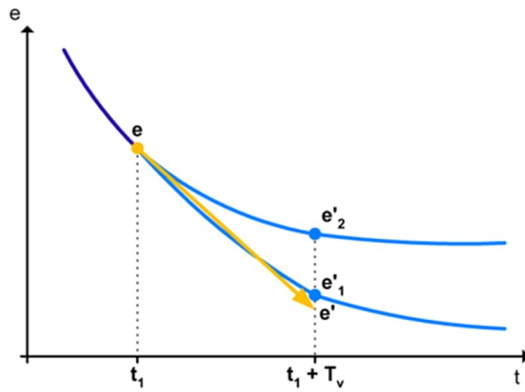
Für diese Vorhersage schaut der D-Anteil dazu um die Vorhaltezeit T_v voraus.



1. Das D-Glied nimmt an, dass die Steigung der Regeldifferenz e genauso weiter verläuft wie momentan. d.h. es extrapoliert linear.
2. Grafisch betrachtet wird die Tangente an die Verlaufskurve der Regeldifferenz e im aktuellen Zeitpunkt gelegt. Dann wird der zukünftige Wert der Regeldifferenz e' zum Zeitpunkt T_v auf dieser Tangente bestimmt.

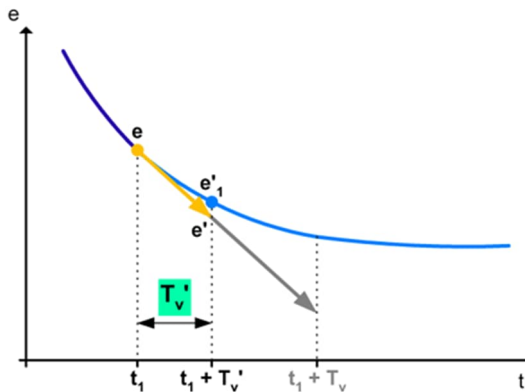
Fig. 5-54 D-Anteil macht Vorhersage mit Vorhaltezeit T_v

Die Vorhersage stimmt nicht immer.



Je nach Verlauf der Regeldifferenz e stimmt die Vorhersage sehr gut oder sie weicht stark vom effektiven Verlauf ab.

- $e' - e'_1$ ist klein
→ Vorhersage stimmt gut
- $e' - e'_2$ ist groß
→ Effektiver Verlauf weicht stark von Vorhersage ab.



Weicht die Vorhersage stark ab, dann geht die stabilisierende Wirkung des D-Anteils verloren. Dies kann kompensiert werden, indem die Vorhaltezeit T_v kleiner gewählt wird, z.B. T'_v .

Fig. 5-55 Vorhersage des D-Glieds und effektiver Verlauf der Regeldifferenz

5.7.4. Erkenntnis

Auf den ersten Blick unterscheidet sich der Einschwingvorgang des PD-Reglers kaum vom P-Regler. Auch der PD-Regler erreicht den gewünschten Sollwert nicht und hat eine bleibende Regeldifferenz, d.h. er ist lastabhängig.

Vergleicht man den Einschwingvorgang des PD-Reglers aber mit dem eines P-Reglers, so zeigt sich die stabilisierende Wirkung und der Beschleunigungseffekt zu Beginn des Verlaufs des D-Anteils.

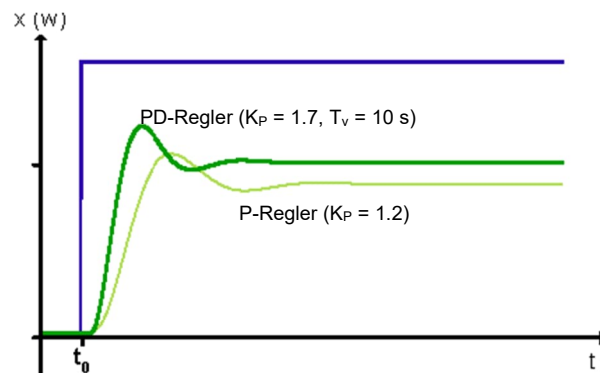


Fig. 5-56 Regelverhalten des PD-Reglers

K_P kann größer gewählt werden. Das wirkt sich günstig aus:

- Der Einschwingvorgang wird beschleunigt.
- Das Überschwingen bleibt in Grenzen.

Die bleibende Regeldifferenz e_b wird kleiner.

5.7.5. Typische Anwendung für PD-Regler

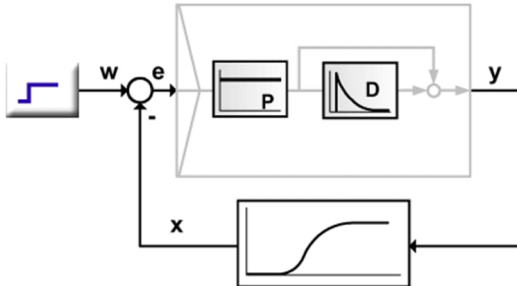


Fig. 5-57 PD-Regler

PD-Regler kommen nur in einigen wenigen Anlagesituationen zur Anwendung. Beispiele:

- **Zulässige bleibende Regeldifferenz**

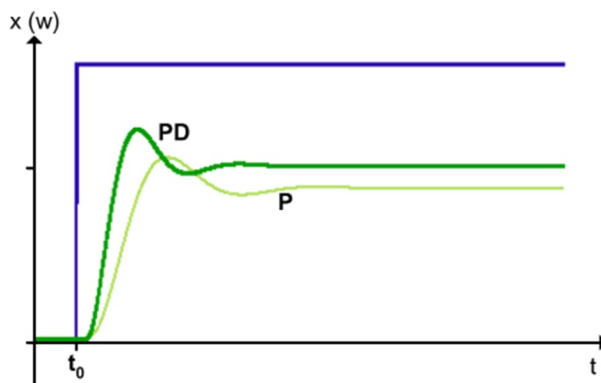


Fig. 5-58 Regelverhalten

Zum Beispiel bei gewissen Druck- und Befeuchterregelungen, wo der PI-Regler zu langsam ist und ein reiner P-Regler nicht genügt (weil die bleibende Regeldifferenz zu groß ist). Hier kann der PD-Regler den Einschwingvorgang beschleunigen und die bleibende Regeldifferenz e_b (im Vergleich zum P-Regler) reduzieren.

- **PD-Regler bei Strecken mit integralem Charakter**

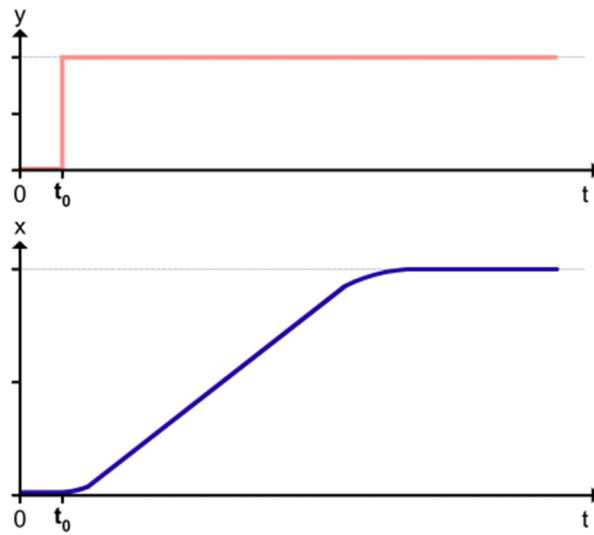


Fig. 5-59 Strecke mit integralem Verhalten

Der PD-Regler wird auch eingesetzt, wenn die Regelstrecke zwar einen neuen Beharrungszustand erreicht, ihr anfängliches Verhalten aber integralen Charakter hat (wie eine Strecke ohne Ausgleich).

5.8. PID-Regler

Wie bei den Erläuterungen zum PI- und zum PD-Regler gesehen, erfüllen beide Regler die Anforderungen an ein stabiles Verhalten und eine schnelle Anpassung der Führungsgröße an den Sollwert nicht vollständig.

- Der PI-Regler kann zu langsam werden, wenn sich die Regelgröße dem neuen Beharrungszustand nähert.
- Der PD-Regler beschleunigt und stabilisiert das Einschwingverhalten. Er hat jedoch immer noch eine bleibende Regeldifferenz e_b .

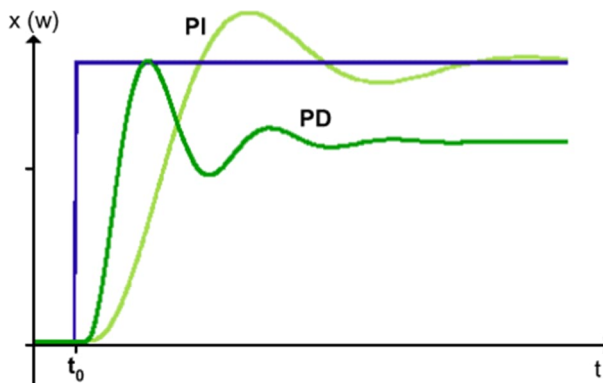


Fig. 5-60 Einschwingverhalten von PD- und PI-Regler

Aus diesen Gründen gibt es Anwendungen, für die PI- oder PD-Regler nicht genügen. Nochmals eine Verbesserung des Übertragungsverhaltens kann mit der Kombination von P-Regler, I-Regler und D-Anteil erreicht werden. Diese Kombination ergibt den PID-Regler.

5.8.1. Übertragungsverhalten

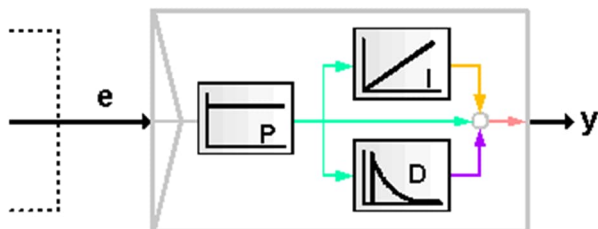


Fig. 5-61 PID-Regler

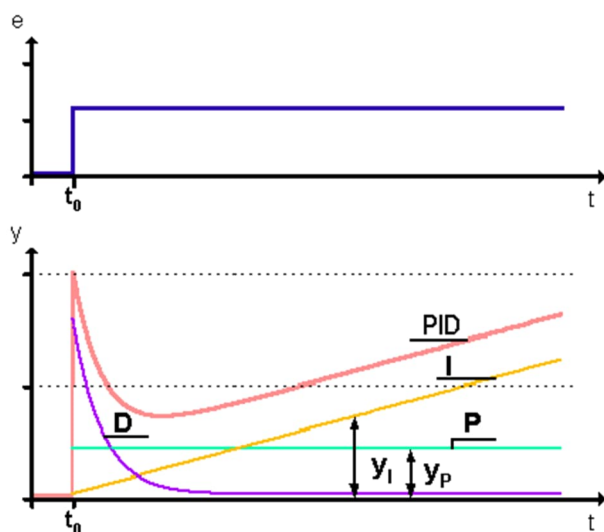


Fig. 5-62 Zusammenspiel von P-, I- und D-Anteil

5.8.2. Erkenntnis PID-Regler

Der PID-Regler regelt sowohl Sollwertänderungen wie auch Laständerungen schnell aus. Der Einschwingvorgang unterscheidet sich auf den ersten Blick kaum von einem PI-Regler.

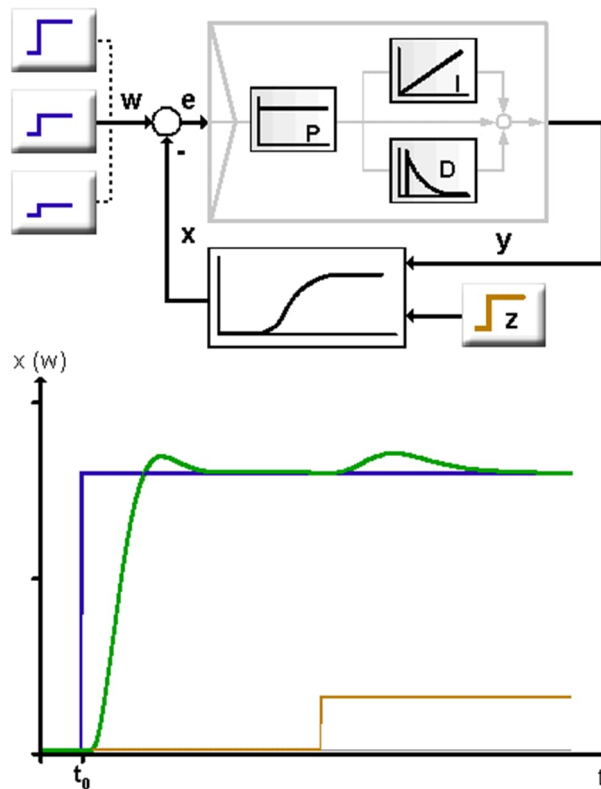


Fig. 5-63 Verhalten eines PID-Reglers

Vergleicht man den Einschwingvorgang des PID-Reglers aber mit dem eines PI-Reglers so zeigt sich auch hier die stabilisierende Wirkung und der Beschleunigungseffekt zu Beginn des Verlaufs des D-Anteils:

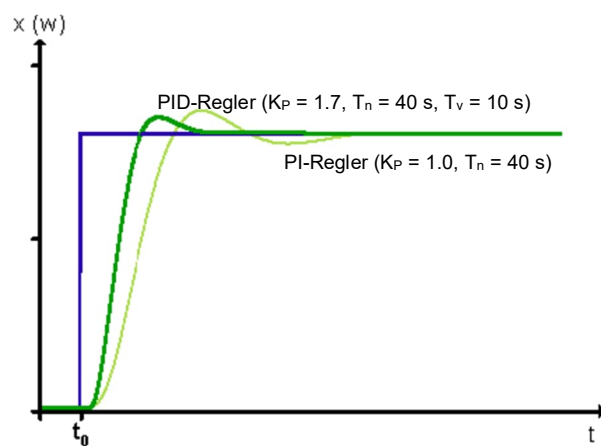


Fig. 5-64 Verhalten von PI- und PID-Regler

K_P kann größer gewählt werden. Das wirkt sich günstig aus:

- Der Einschwingvorgang wird beschleunigt.
- Das Überschwingen bleibt in Grenzen.

5.8.3. Typische Anwendung für PID-Regler

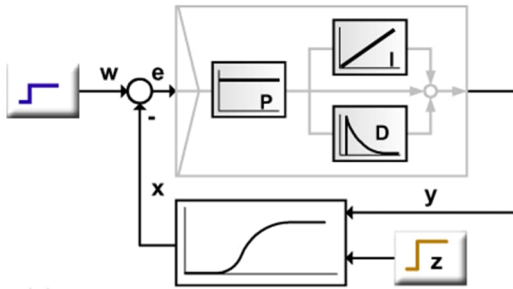


Fig. 5-65 PID-Regler

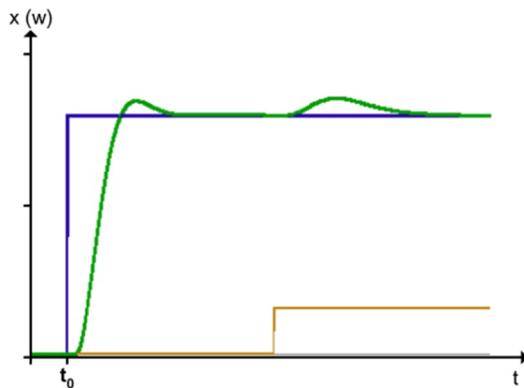


Fig. 5-66 Einschwingverhalten eines PID-Reglers

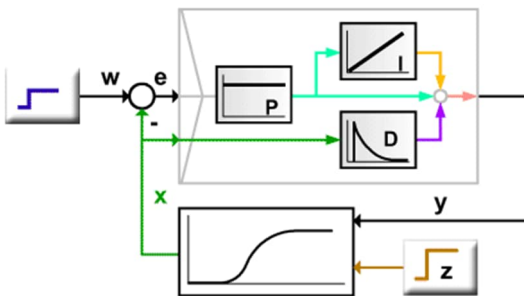


Fig. 5-67 PID-Regler mit D-Anteil speziell für Störungen

PID-Regler, wo stabilisierende Wirkung erwünscht

PID-Regler kommen dort zum Einsatz, wo die stabilisierende Wirkung des D-Anteils erwünscht ist. Dies vor allem im Zusammenhang mit Störungen d.h. Laständerungen, die ausgegelt werden müssen.

Je nachdem, wie die Störungen auftreten, kann der D-Anteil mit seiner Vorhersage sehr viel zu einem stabileren Verhalten des Regelkreises beitragen. Es kann aber auch sein, dass der D-Anteil mit seiner Vorhersage falsch liegt und damit ein eher gegenteiliger Effekt erreicht wird.

Der D-Anteil ist oft nicht zwingend nötig.

In vielen Anwendungen genügt sehr oft ein gut eingestellter PI-Regler oder eine Kaskadenregelung (z.B. P- und PI-Regler), um ein stabiles Verhalten zu erreichen, ohne dass viel Aufwand für die Einstellung des D-Anteils betrieben werden muss.

Spezifischer Einsatz des D-Anteils für Störungen

In der Praxis wird ein PID-Regler oft so gebaut, dass das D-Glied parallel zu einem PI-Regler eingesetzt wird und dieses nicht die Regeldifferenz verarbeitet, sondern nur die zurückgeführte Regelgröße x.

Damit kann dieser PID-Regler sehr gut auf Störungen reagieren, aber nicht übermäßig auf einen Sollwertsprung.

5.8.4. Zusammenfassung

D-Glied

Das D-Glied erlaubt dem Regler, eine Vorhersage über den mutmaßlichen Verlauf der Regeldifferenz zu machen und wirkt damit in PD- und PID-Reglern stabilisierend auf den Einschwingvorgang.

Ändert die Richtung der Regeldifferenz aber zu schnell, dann ist die Vorhersage falsch und der Regelkreis wird instabil.

Kenngößen des PID-Reglers

Der PID-Regler hat drei Parameter, mit denen er an die Gegebenheiten der Regelstrecke angepasst werden kann:

- Übertragungsbeiwert K_P
- Nachstellzeit T_n
- Vorhaltezeit T_v

Die Einstellung dieser Parameter ist aufwändig.

Verhalten von PID- und PD-Regler im Regelkreis

Der PID-Regler regelt schnell und erreicht den gewünschten Sollwert.

Der PD-Regler arbeitet schneller als ein reiner P-Regler, ist aber auch lastabhängig und erreicht deshalb den gewünschten Sollwert nicht. Er hat eine bleibende Regeldifferenz e_b .

6 Der geschlossene Regelkreis

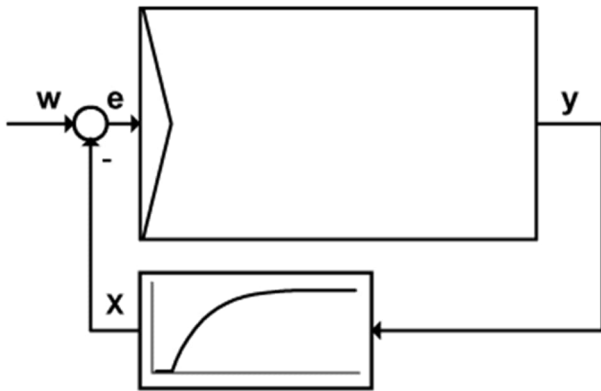


Fig. 6-1 Geschlossener Regelkreis

In den vorangehenden Kapiteln wurden Strecke und Regler separat betrachtet.

In der Praxis sind Regler und Strecke aber nicht Elemente die völlig losgelöst voneinander betrachtet werden können, da sie im Regelkreis miteinander verbunden sind und sich gegenseitig beeinflussen.

6.1. Mögliche Einschwingverhalten der Regelgröße

Nachstehend sind mögliche Einschwingvorgänge der Regelgröße in Reaktion auf einen Sollwertsprung Δw dargestellt.

Die Sprungantwort weist – je nach Einstellung der Reglerparameter – eine der nachfolgenden Charakteristiken auf:

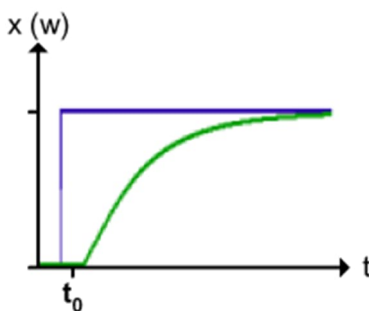


Fig. 6-2 Überkritisch gedämpft

Überkritisch gedämpft

Die Regelgröße nähert sich langsam dem Sollwert, ohne zu Überschwingen.

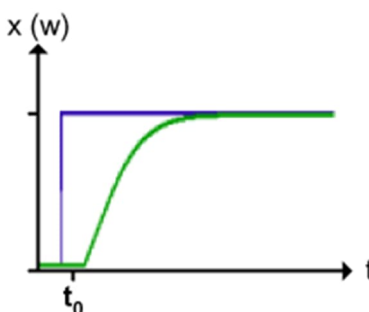


Fig. 6-3 Kritisch gedämpft

Kritisch gedämpft

Die Regelgröße nähert sich schnellstmöglich dem Sollwert, ohne zu Überschwingen (wird auch als aperiodisch bezeichnet).

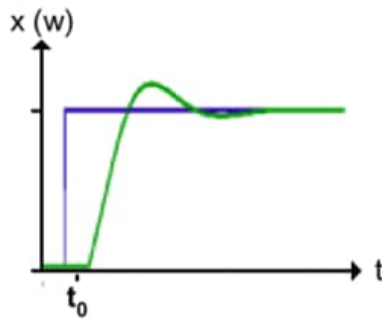


Fig. 6-4 Unterkritisch gedämpft

Unterkritisch gedämpft

Einmaliges Über- und Unterschwingen der Regelgröße, danach ist der Sollwert erreicht.

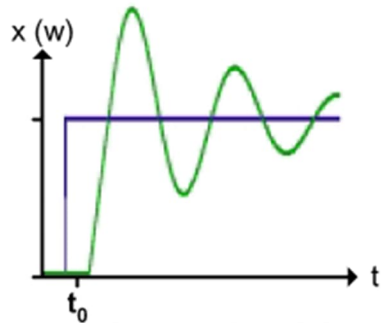


Fig. 6-5 Periodisch gedämpft

Periodisch gedämpft

Abklingendes, mehrmaliges Über- und Unterschwingen der Regelgröße (der Sollwert wird schlussendlich erreicht).

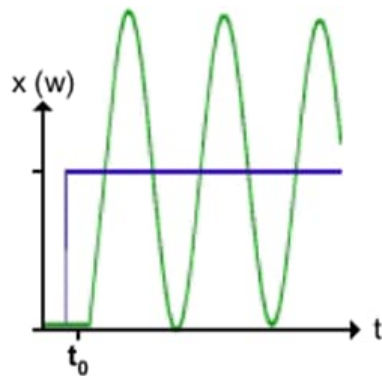


Fig. 6-6 Periodisch ungedämpft

Periodisch ungedämpft

Periodisches, gleichbleibendes Über- und Unterschwingen der Regelgröße (der Sollwert wird nie erreicht).

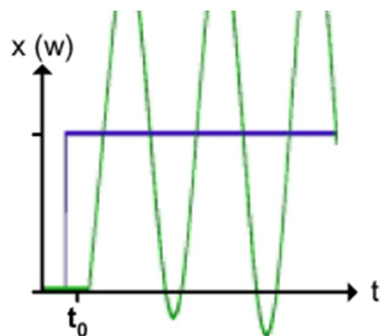


Fig. 6-7 Periodisch angefacht

Periodisch angefacht

Periodisch sich verstärkendes Über- und Unterschwingen der Regelgröße (schwingt immer stärker um den Sollwert).

6.2. Ziel der Regelung

Lange nicht alle möglichen Einschwingverhalten sind erwünscht. Das Ziel der Regelung ist:

- Stabiles Verhalten des geschlossenen Regelkreises
- Schnelle Ausregelung von Veränderungen

Um dieses Ziel zu erreichen, soll der Regler (d.h. Regeleinrichtung) mit Hilfe der Einstellparameter möglichst gut an die Gegebenheiten der Anlage (d.h. Regelstrecke) angepasst werden.

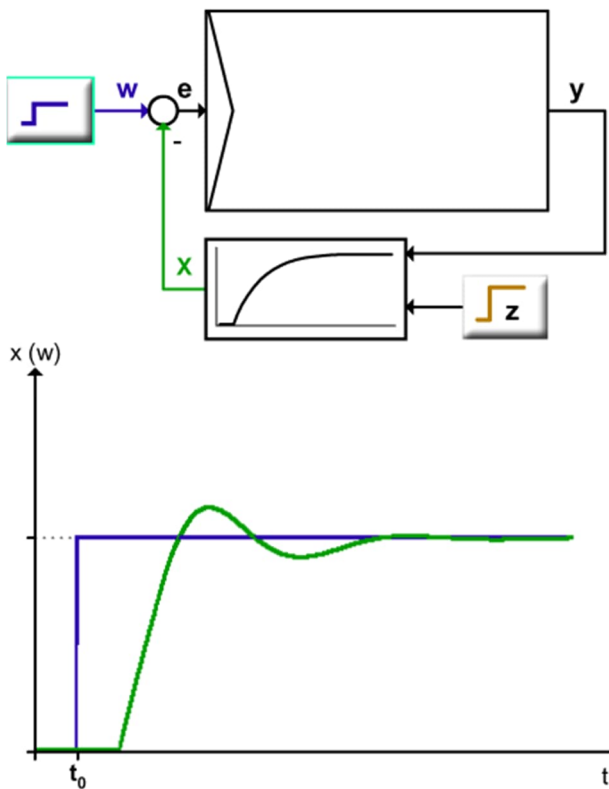


Fig. 6-8 Stabiler Einschwingvorgang in einem Regelkreis

Die in HLK-Anlagen üblicherweise angestrebten Einschwingvorgänge sind:

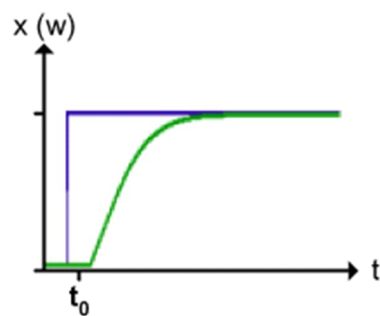


Fig. 6-9 Kritisch gedämpft

- Kritisch gedämpft
Die Regelgröße wird nicht überschritten.

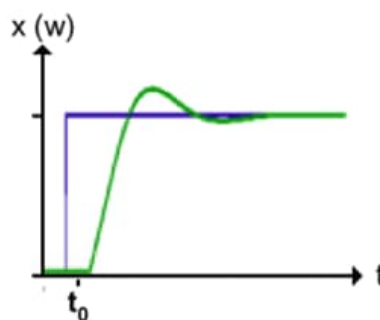


Fig. 6-10 Unterkritisch gedämpft

- Unterkritisch gedämpft
Die Regelgröße überschwingt maximal um 20 %.

6.3. Einflüsse auf das Regelverhalten

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Einflüsse, die auf den Regelkreis einwirken können:

- Die Änderung der Führungsgröße w
- Die Störung oder Laständerung z

Daraus werden zwei unterschiedliche Verhaltensarten eines Regelkreises definiert:

6.3.1. Führungsverhalten

Das Führungsverhalten beschreibt die Art und Weise, wie der Regelkreis auf eine Änderung der Führungsgröße w reagiert.

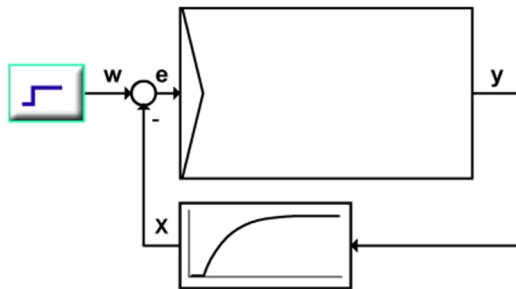


Fig. 6-11 Führungsverhalten

6.3.2. Störverhalten

Das Störverhalten beschreibt die Art und Weise, wie der Regelkreis auf eine Störung z (oder Laständerung), die auf die Regelstrecke einwirkt, reagiert.

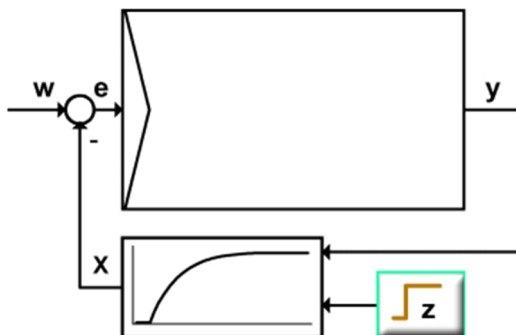


Fig. 6-12 Störverhalten

6.4. Reglerparameter

Die Reglerparameter dienen dazu, die Regler an die Regelstrecke anzupassen.

Um das Ziel einer stabilen und schnell reagierenden Regelung zu erreichen, müssen die Reglerparameter korrekt eingestellt werden. Die folgenden Parameter sind dafür wesentlich:

Regler	Reglerparameter / Kenngröße	
P-Regler	Übertragungsbeiwert	K_P (oder X_P)
PI-Regler	Übertragungsbeiwert	K_P (oder X_P)
	Nachstellzeit	T_n (basiert auf K_I und K_P)
PID-Regler	Übertragungsbeiwert	K_P (oder X_P)
	Nachstellzeit	T_n
	Vorhaltezeit	T_v (basiert auf K_D und K_P)

Fig. 6-13 Reglerparameter für verschiedene Reglerarten

6.5. Reglereinstellregeln

Bereits vor einigen Jahrzehnten haben sich Wissenschaftler die Frage gestellt, wie man schnell und zuverlässig gute Einstellwerte (Parameter) für einen Regler findet.

6.5.1. Reglereinstellregeln nach Ziegler / Nichols

Die Herren Ziegler und Nichols publizierten 1942 nach umfangreichen Versuchen und mathematischen Überlegungen einfache Regeln, d.h. Faustformeln, um einen Regler an die Gegebenheiten einer Regelstrecke anzupassen. Diese Einstellregeln basieren auf einer Einspeicherstrecke (vgl. 3.3 Einfache Strecke).

Ziel von Ziegler / Nichols: Unterkritisch gedämpfter Einschwingvorgang

Ziegler / Nichols strebten bei ihren Versuchen einen unterkritisch gedämpften Einschwingvorgang an, der ein einmaliges Überschwingen der Regelgröße von maximal 20 % zulässt.

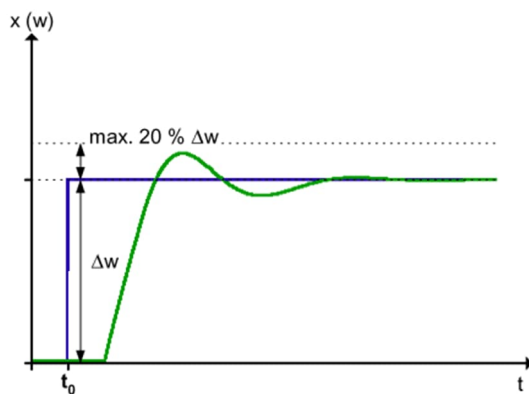


Fig. 6-14 Unterkritisch gedämpfter Einschwingvorgang nach Ziegler / Nichols

Überblick der Einstellregeln (Parameter) nach Ziegler / Nichols

Die Einstellregeln von Ziegler / Nichols liefern gute Startwerte. Werden diese Einstellungen als Anfangswerte eingesetzt, verhält sich der Regelkreis schon annähernd stabil.

Für bekannte Strecken:

Regler Parameter	P	PI	PD	PID
X_P	$X_h \cdot S$	$1.25 \cdot X_h \cdot S$	$0.83 \cdot X_h \cdot S$	$0.83 \cdot X_h \cdot S$
T_n		$3 \cdot T_t$		$2 \cdot T_t$
T_v			$0.25 \cdot T_t$	$0.42 \cdot T_t$

Regler Parameter	P	PI	PD	PID
K_P	$T / (K_S \cdot T_t)$	$0.9 \cdot T / (K_S \cdot T_t)$	$1.2 \cdot T / (K_S \cdot T_t)$	$1.2 \cdot T / (K_S \cdot T_t)$
T_n		$3,3 \cdot T_t$		$2 \cdot T_t$
T_v			$0.25 \cdot T_t$	$0.42 \cdot T_t$

Fig. 6-15 Einstellregeln nach Ziegler / Nichols

6.5.2. Reglereinstellregeln nach Chien / Hrones / Reswick (C/H/R)

Drei Herren, deren Einstellregeln auch sehr häufig zur Anwendung kommen, sind Chien, Hrones und Reswick. Sie haben Ihre Einstellregeln 1952 publiziert.

In Erweiterung zu Ziegler / Nichols haben Chien / Hrones / Reswick die folgenden Fälle für den Einschwingvorgang unterschieden:

- Aperiodischer Verlauf $\Rightarrow$ Kein Überschwingen der Regelgröße
- Kürzeste Ausregelzeit $\Rightarrow$ Maximal 20 % Überschwingen der Regelgröße

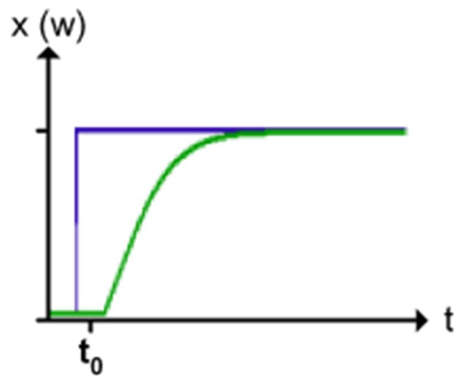


Fig. 6-16 Aperiodischer Verlauf

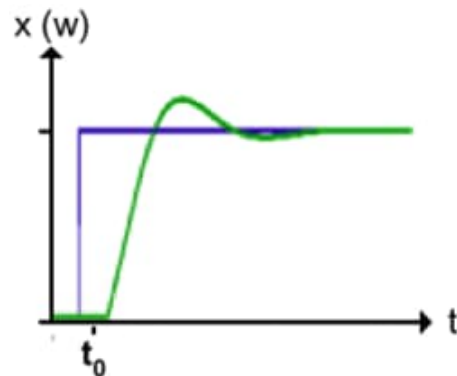


Fig. 6-17 Kürzeste Ausregelzeit

Für beide Fälle haben C/H/R jeweils das Führungsverhalten und das Störverhalten untersucht und dazu die entsprechenden Einstellregeln aufgestellt. Ihre Einstellregeln basieren auf Mehrspeicherstrecken (vgl.3.4)

Überblick der Einstellregeln (Parameter) nach Chien / Hrones / Reswick

Regler		aperiodischer Verlauf bei Störung Führung		kürzeste Ausregelzeit bei Störung Führung	
P	$V_0 =$	$0.3 \cdot T_g/T_u$	$0.3 \cdot T_g/T_u$	$0.7 \cdot T_g/T_u$	$0.7 \cdot T_g/T_u$
PI	$V_0 =$	$0.6 \cdot T_g/T_u$	$0.35 \cdot T_g/T_u$	$0.7 \cdot T_g/T_u$	$0.6 \cdot T_g/T_u$
	$T_n =$	$4 \cdot T_u$	$1.2 \cdot T_g$	$2.3 \cdot T_u$	T_g
PID	$V_0 =$	$0.95 \cdot T_g/T_u$	$0.6 \cdot T_g/T_u$	$1.2 \cdot T_g/T_u$	$0.95 \cdot T_g/T_u$
	$T_n =$	$2.4 \cdot T_u$	T_g	$2 \cdot T_u$	$1.35 \cdot T_g$
	$T_v =$	$0.42 \cdot T_u$	$0.5 \cdot T_u$	$0.42 \cdot T_u$	$0.47 \cdot T_u$

Fig. 6-18 Einstellregeln nach C/H/R

6.5.3. Kreisverstärkung V_0

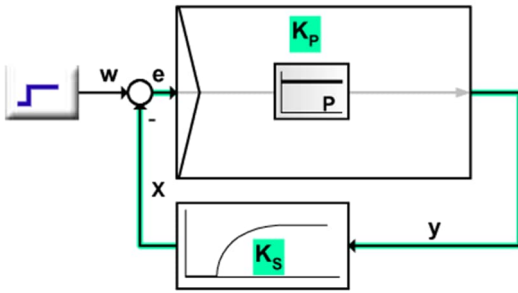


Fig. 6-19 Kreisverstärkung

Wird die Regelstrecke mit einem Regler zu einem Regelkreis zusammengeschaltet, hat der Übertragungsbeiwert K_S der Strecke für die zu wählende Reglereinstellung eine entscheidende Bedeutung.

Kreisverstärkung V_0

Das Produkt aus dem Übertragungsbeiwert K_S der Strecke und K_P des P-Reglers, ergibt die Kreisverstärkung V_0 .

$$V_0 = K_S \cdot K_P$$

Die Kreisverstärkung V_0 beschreibt, wie stark ein Signal in einem Durchlauf durch den Regelkreis verstärkt wird.

Die Kreisverstärkung V_0 ist dimensionslos. Bei der Ermittlung der Kreisverstärkung V_0 ist es daher wichtig, dass die beiden Übertragungsbeiwerte K_S und K_P mit den passenden Einheiten eingesetzt werden.

Stabile Regelkreise

Für Regelkreise sind verschiedene Diagramme zusammengestellt worden, die aufzeigen, bei welcher Kreisverstärkung $V_{0 \text{ krit}}$ ein Regelkreis gerade noch stabil läuft.

Die Kreisverstärkung $V_{0 \text{ krit}}$ ist abhängig von K_S und von Schwierigkeitsgrad S .

$$S = \frac{T_t}{T}$$

Für einen Regelkreis mit bekannter Strecke ergibt sich aus:

$$V_0 = K_S \cdot K_P$$

der Übertragungsbeiwert K_P

$$K_P = \frac{V_0}{K_S}$$

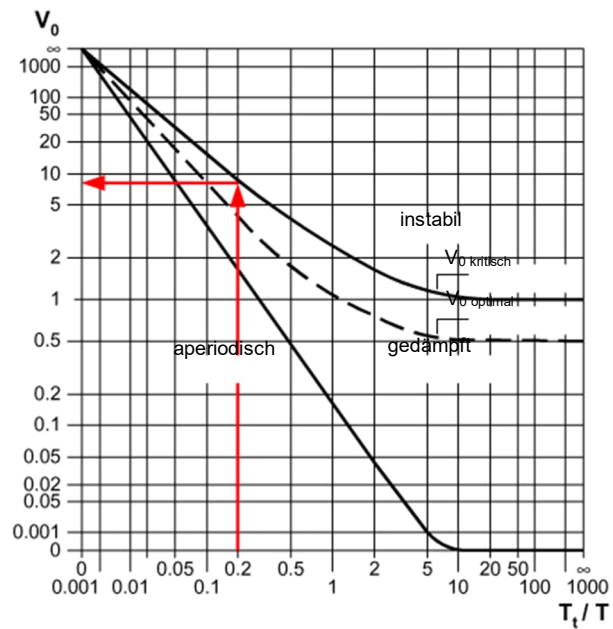


Fig. 6-20 Kreisverstärkung und Stabilitätsgrenzen (mit Einspeicherstrecke)

Beispiel aus dem Diagramm oben:

$$K_S = 0.5 \frac{\text{K}}{\%} \quad S = \frac{T_t}{T} = 0.2 \quad \Rightarrow V_0 = 9$$

$$\Rightarrow K_P = \frac{V_{0 \text{ krit}}}{K_S} = \frac{9}{0.5 \frac{\text{K}}{\%}} = 18 \frac{\%}{\text{K}}$$

⇒ Aus Diagrammen können zulässige Werte für V_0 ermittelt werden - in Abhängigkeit des Schwierigkeitsgrades S . Damit lässt sich der Regler an die Strecke anpassen.

6.6. Einschwingvorgänge

6.6.1. Begriffe

Toleranzbereich

Der Toleranzbereich ist die Bandbreite, um welche die Regelgröße um den Sollwert (resp. den Beharrungszustand bei P-Regelung) schwanken darf (z.B. $21\text{ °C} \pm 0.5\text{ K}$).

Überschwingweite

Die Überschwingweite ist die größte vorübergehende Sollwertabweichung während des Übergangs von einem Beharrungszustand in einen neuen.

Anregelzeit

Die Anregelzeit ist die Zeitspanne, die beginnt, wenn die Regelgröße nach einem Sollwertsprung den aktuellen Toleranzbereich verlässt, und die endet, wenn sie erstmalig in den neuen Toleranzbereich eintritt.

Ausregelzeit

Die Ausregelzeit ist die Zeitspanne, die beginnt, wenn die Regelgröße nach einem Sollwertsprung den aktuellen Toleranzbereich verlässt, und die endet, wenn sie zum dauernden Verbleib in den neuen Toleranzbereich eintritt.

Anregel- und Ausregelzeit bei Störung

Die Anregel- und Ausregelzeit werden sinngemäß auch für die Reaktion der Regelgröße auf eine Störung verwendet.

Begriffe am Beispiel eines PI-Reglers

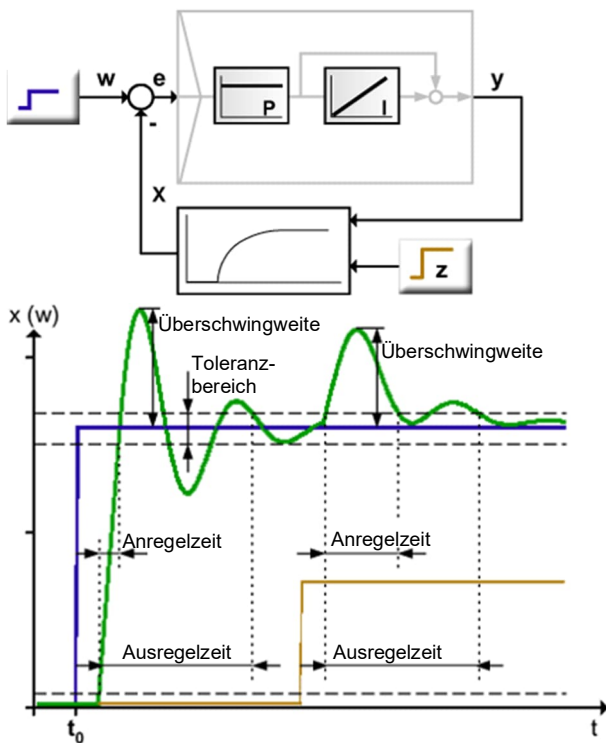


Fig. 6-21 Einschwingvorgang und zugehörige Begriffe (z.B. PI-Regler)

Die Anregel- und Ausregelzeit und das Verhältnis dieser beiden Zeiten zueinander helfen, eine Aussage über die Geschwindigkeit und Qualität des Einschwingvorganges zu machen.

6.6.2. Optimierter Einschwingvorgang eines P-Reglers

Übertragungsbeiwert K_P

Für die Ausregelzeit eines P-Regelkreises ist der Übertragungsbeiwert K_P wesentlich.

Je nach Einstellung des Übertragungsbeiwertes K_P verhält sich die Regelgröße x unterschiedlich.

- Große K_P
Bei großen K_P schlägt die Regelgröße x stark aus und beruhigt sich innerhalb der betrachteten Zeit nicht mehr.

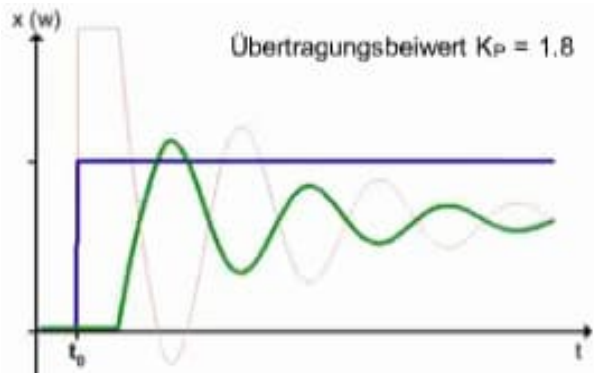


Fig. 6-22 Verhalten des P-Reglers bei großem K_P -Wert

- Kleine K_P
Bei kleinen K_P ergibt sich ein stabiler Ausregelvorgang.

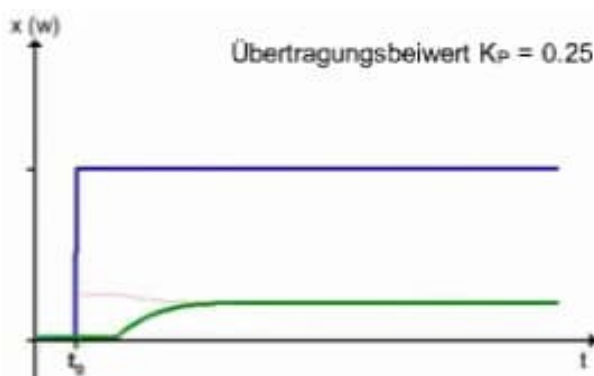


Fig. 6-23 Verhalten des P-Reglers bei kleinem K_P -Wert

Sehr gut wird ersichtlich, dass selbst bei einem stabilen Ausregelvorgang, die Regelgröße x den gewünschten Sollwert nicht erreicht (es sei denn, seine Grundeinstellung entspricht dem Sollwert).

Grund: Der P-Regler hat eine bleibende Regeldifferenz e_b .

Je größer K_P eingestellt wird, umso kleiner wird diese bleibende Regeldifferenz.

6.6.3. Optimierter Einschwingvorgang eines PI-Reglers

Optimiert man die Reglereinstellung (K_P und T_n) bei einem PI-Regler, so kann man den neuen Einschwingvorgang (2) mit dem ursprünglichen Einschwingvorgang (1) vergleichen.

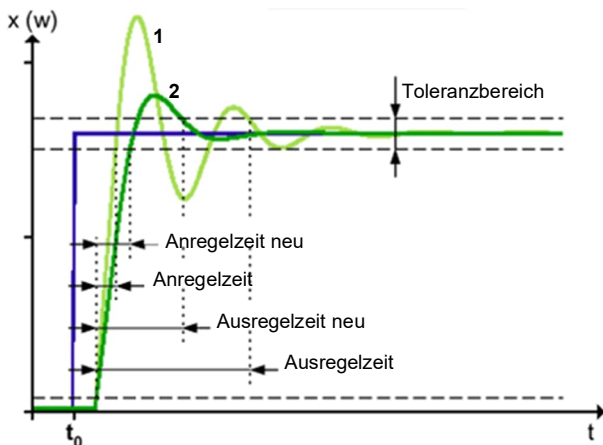


Fig. 6-24 Optimierter Einschwingvorgang

Feststellung:

- Die Anregelzeit wird nur unwesentlich länger.
- Die Ausregelzeit wird massiv verkürzt.
- Die Regelgröße x bleibt viel früher innerhalb des Toleranzbereichs

Verhalten des PI-Reglers mit einer Mehrspeicherstrecke

Eine Mehrspeicherstrecke kann in einer ähnlichen Art und Weise beurteilt werden wie eine Einspeicherstrecke.

Verkürzung des Einschwingvorgangs

Benutzt man die Einstellwerte für K_P und T_n nach C/H/R für eine vorliegende Regelstrecke, wird ein überkritisch gedämpfter Führungsverlauf erreicht, der den Sollwert nicht übersteigt (vgl. Grafik unten). Der Einschwingvorgang dauert allerdings noch ziemlich lange.

Um den Einschwingvorgang zu verkürzen, wird die Nachstellzeit T_n verkleinert. Durch das Verkleinern der Nachstellzeit T_n wird schneller ausgeregelt, die Regelgröße überschwingt aber noch etwas zu stark.

Wird nun der Übertragungsbeiwert K_P auch noch verkleinert, reduziert sich das Überschwingen, ohne dass der Ausregelvorgang länger dauert. Die Ausregelzeit verkürzt sich dabei erheblich.

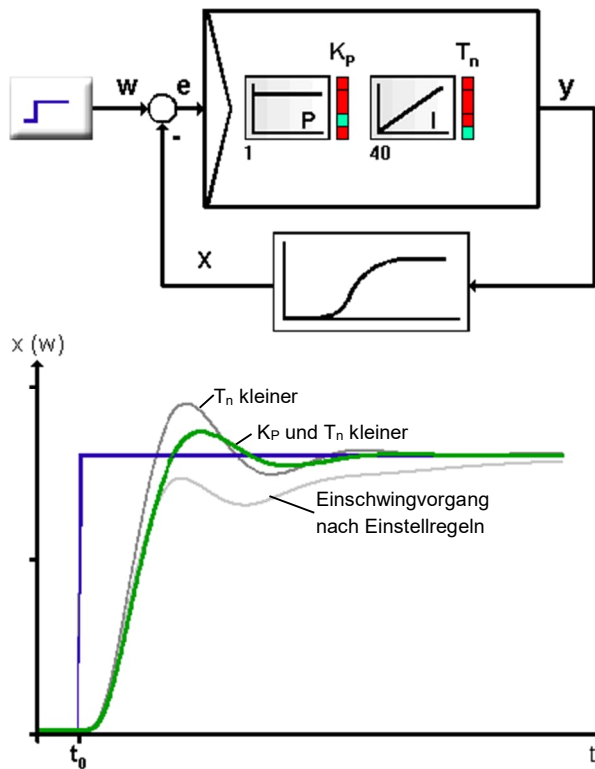


Fig. 6-25 Verbesselter Einschwingvorgang durch Anpassung von K_P und T_n

6.6.4. Optimierter Einschwingvorgang eines PD-Reglers

Auf den ersten Blick unterscheidet sich der Einschwingvorgang des PD-Reglers kaum vom P-Regler. Auch der PD-Regler erreicht den gewünschten Sollwert nicht und hat eine bleibende Regeldifferenz, d.h. er ist lastabhängig.

Vergleicht man den Einschwingvorgang des PD-Reglers aber mit dem eines P-Reglers, so zeigt sich die stabilisierende Wirkung des D-Anteils.

Beispiel:

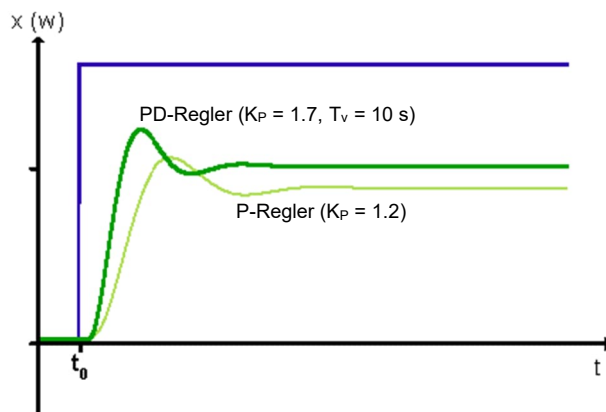


Fig. 6-26 Verhalten von P- und PD-Regler

K_P kann bei einem PD-Regler größer gewählt werden als bei einem reinen P-Regler. Das wirkt sich günstig aus:

- Der Einschwingvorgang wird beschleunigt.
- Das Überschwingen bleibt in Grenzen.
- Die bleibende Regeldifferenz wird kleiner.

6.6.5. Optimierter Einschwingvorgang eines PID-Reglers

Der PID-Regler regelt sowohl Sollwertänderungen wie auch Laständerungen schnell aus. Der Einschwingvorgang unterscheidet sich auf den ersten Blick kaum von einem PI-Regler.

Vergleicht man den Einschwingvorgang des PID-Reglers aber mit dem eines PI-Reglers, so zeigt sich auch hier die stabilisierende Wirkung des D-Anteils:

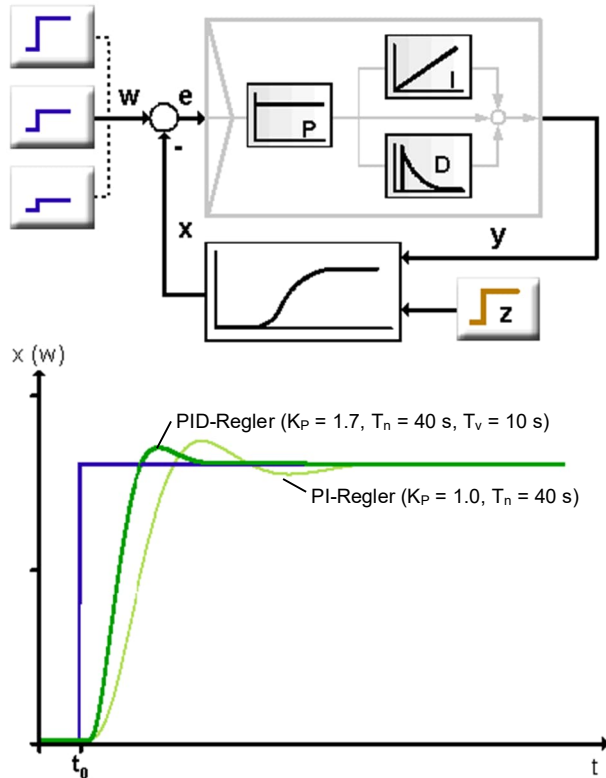


Fig. 6-27 Verhalten von PI- und PID-Regler

K_P kann bei einem PID-Regler größer gewählt werden als bei einem PI-Regler. Das wirkt sich günstig aus:

- Der Einschwingvorgang wird beschleunigt.
- Das Überschwingen bleibt in Grenzen.

Verkürzung des Einschwingvorgangs

Wie beim PI-Regler wird mit den Einstellwerten für K_P , T_n und T_v nach C/H/R ein überkritisch gedämpfter Führungsverlauf erreicht, der den Sollwert nicht übersteigt. Der Einschwingvorgang dauert allerdings auch hier noch ziemlich lange, bis er vollständig ausgeregelt hat.

Um den Einschwingvorgang zu verkürzen, wird die Nachstellzeit T_n verkleinert. Durch Verkleinern der Nachstellzeit T_n wird schneller ausgeregelt, die Regelgröße überschwingt aber noch etwas zu viel.

Wird nun der Übertragungsbeiwert K_P auch noch verkleinert, reduziert sich das Überschwingen, ohne dass der Ausregelvorgang länger dauert.

Hinweis:

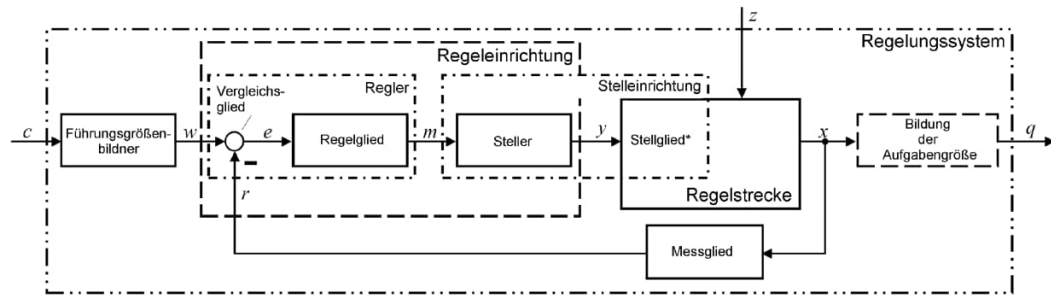
D-Anteil beschleunigt Ausregelvorgang. Der D-Anteil im PID-Regler kann aber auch zu einem instabilen Ausregelverhalten des Regelkreises führen. Er muss also gezielt eingesetzt werden. Eventuell müssen andere Regelkonzepte gewählt werden, z.B. eine P-PI-Kaskade.

7 Anhang

7.1. DIN IEC 60050-351:2014-09

7.1.1. Elementares Regelungssystem

Wirkungsplan



* Das Stellglied ist definitionsgemäß ein Teil der Strecke (siehe IEC 351-49-01)

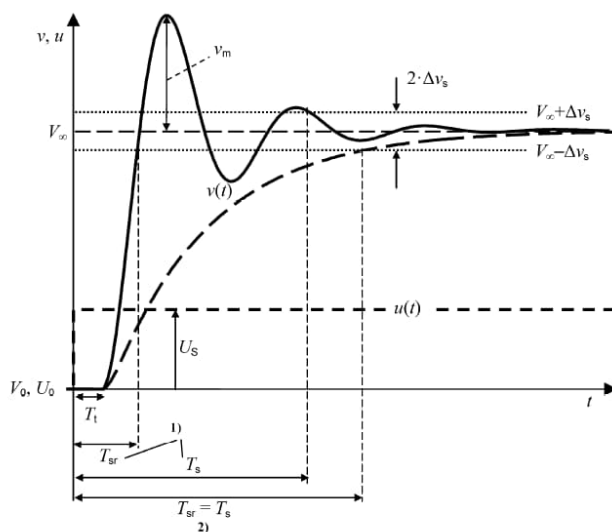
Fig. 7-1 Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Regelungssystems

Abkürzungen

c	Zielgröße	z	Störgröße
w	Führungsgröße	x	Regelgröße
e	Regeldifferenz	q	Aufabengröße
m	Reglerausgangsgröße	r	Rückführgröße
y	Stellgröße		
		○	Summierungspunkt
		•	Verzweigungspunkt

7.1.2. Sprungantwort

Sprungantwortverhalten



- 1) Bei periodischem Verhalten / for periodic behaviour / pour comportement périodique
- 2) Bei aperiodischem Verhalten / for aperiodic behaviour / pour comportement aperiodique

Fig. 7-2 Typisches Sprungantwortverhalten eines Systems

Abkürzungen

u	Eingangsgröße	v_m	Überschwingweite
U_0	Anfangswert der Eingangsgröße	$2 \cdot \Delta v_s$	Toleranzbereich
U_s	Sprunghöhe der Eingangsgröße	T_{sr}	Anschwingzeit
v	Ausgangsgröße	T_s	Einschwingzeit
V_0, V_∞	Werte der Ausgangsgröße im Beharrungszustand vor und nach dem Sprung	T_t	Totzeit

Ausgleichzeit und Verzugszeit

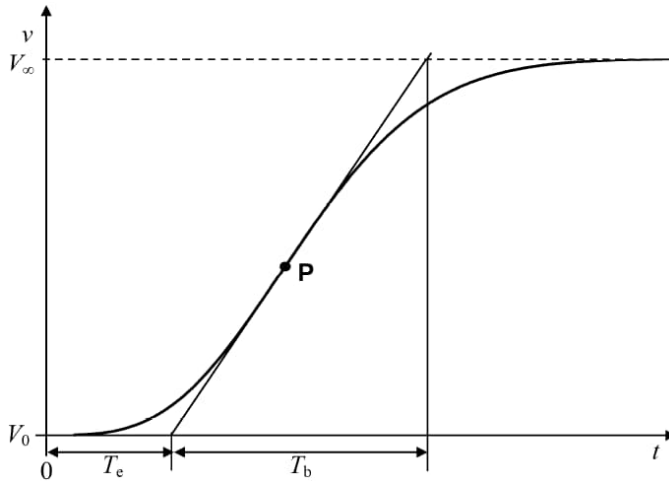


Fig. 7-3 Ermittlung von Ausgleichzeit und Verzugszeit aus einer Sprungantwort

Abkürzungen

v	Ausgangsgröße
V_0, V_∞	Werte der Ausgangsgröße im Beharrungszustand vor und nach dem Sprung
T_e	Verzugszeit
T_b	Ausgleichszeit
P	Wendepunkt

Smart Infrastructure verbindet auf intelligente Weise Energiesysteme, Gebäude und Industrien und verbessert die Art und Weise, wie wir leben und arbeiten, um Effizienz und Nachhaltigkeit deutlich zu steigern.

Gemeinsam mit unseren Kunden und Partnern schaffen wir ein Ökosystem, das sowohl intuitiv auf die Bedürfnisse der Menschen reagiert als auch Kunden dabei unterstützt, ihre Geschäftsziele zu erreichen.

Ein Ökosystem, das unseren Kunden hilft zu wachsen, das den Fortschritt von Gemeinschaften fördert und eine nachhaltige Entwicklung begünstigt, um unseren Planeten für die nächste Generation zu schützen.

Creating environments that care.

[siemens.com/smart-infrastructure](https://www.siemens.com/smart-infrastructure)

Herausgeber
Siemens Schweiz AG

Smart Infrastructure
Global Headquarters
Theilerstrasse 1a
6300 Zug
Schweiz
Tel. +41 58 724 24 24

Siemens AG
Smart Infrastructure
Lyoner Straße 27
60528 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel. +49 69 797-0

Siemens AG Österreich
Smart Infrastructure
Siemensstraße 90
1210 Wien
Österreich
Tel. +43 (51707) 0

Siemens Schweiz AG
Smart Infrastructure
Sennweidstrasse 47
6312 Steinhausen
Schweiz
Tel. +41 585 579 200

Siemens S.A.
Smart Infrastructure
21, rue Edmond Reuter
5326 Contern
Luxembourg
Tél. +352 43843 900

Schutzgebühr € 50

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Die Informationen in diesem Dokument enthalten lediglich allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale, welche im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der beschriebenen Form zutreffen bzw. welche sich durch Weiterentwicklung der Produkte ändern können. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind nur dann verbindlich, wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich vereinbart werden.

© Siemens 08/2022