

Kapitel 14.: Regeltechnik

ungekürzte Version

0. Allgemeines

Regeltechnik hat nicht primär etwas mit Elektrotechnik zu tun.

Sie ist eigentlich ein Teilgebiet der Physik und findet in der **gesamten Technik** Anwendung.

Überdies kommen Regelkreise und ihre Gesetze in der **gesamten Natur** vor, man könnte also auch von "Regelnatur" sprechen, oder die Regeltechnik als Teil der Biologie ansehen.

Man darf sogar sagen, ohne "Regeltechnik" bzw. Regelkreise könnte die Welt nicht existieren. Denn sie ist ein gigantisches Netzwerk von zusammengekoppelten Regelkreisen, von astronomischen Dimensionen bis hinunter zum Molekül.

Aus der Alltagserfahrung können wir ganz allgemein definieren, dass eine Regelung dazu da ist, die **Abweichung** eines Werts von einer bestimmten Vorgabe **auszukorrigieren**.

Die **Regelung** ist dabei nur der eine **Teil** eines **Regelkreises**.

(Der andere Teil ist die **Regelstrecke**, das, was man regeln will)

Regelkreise können stabil sein, oder sie können schwingen, oder sie können aus dem Ruder laufen.

Beschreibung einiger Regelkreise und ihrer Regelungsvorgänge:

Natürliche Regelkreis-Systeme:	Menschengemachte Regelkreis-Systeme:
Körpertemperatur: Die Körpertemperatur von Säugetieren inkl. Mensch wird bekanntlich auf rund 37 Grad geregelt. Dies ist die optimale Betriebstemperatur für alle anderen Regelsysteme im Körper. Wenn wir krank sind, wird der Soll-Wert erhöht, der Regelkreis regelt die Temperatur höher, wir haben Fieber, weil damit die biochemische Reaktionszeit verkürzt wird und das Immunsystem effizienter arbeitet.	Qualitätskontrolle in einer Firma: Ist die Qualität eines Produktes zu schlecht, wird die Produktion optimiert, so dass die Qualität wieder steigt.
Das Stehen: Wenn wir stehen, läuft ein hochdynamischer Regelprozess, ohne den wir umfallen. Unsere Nerven in Bein und Gehirn registrieren Abweichungen aus der Senkrechtlage, und die Muskeln werden so gesteuert, dass wir schliesslich eben nicht umfallen. Bekanntlich braucht ein Baby rund ein Jahr, um diesen "Regler" zu trainieren. Viele Säugetiere stehen wenige Minuten nach der Geburt auf den Beinen...	Wirtschaft: Wenn die Nachfrage nach Erdöl steigt, steigt der Preis, so dass die Nachfrage gedämpft wird.
Augen: Unsere Augen regeln das Scharfstellen je nach Distanz des Objekts und die Pupillenöffnung je nach Helligkeit.	Wohnungsheizung: Wenn es draussen kälter wird, erhöht die Heizungsregelung die Vorlauftemperatur des Heizungswassers. Wenn es in der Wohnung warm genug ist, reduziert das Regelventil am Radiator den Durchfluss und damit die Wärmeabgabe.
Das Klima: Wenn es heiss ist, verdampft mehr Wasser und bildet Wolken, welche die Sonne abdecken und zu einer Abkühlung führen.	WC-Spülkasten: Nach dem Spülen wird der Einlauf geöffnet. Sobald der Wasserspiegel nach oben kommt, wird der Zufluss langsam zugezogen und schliesslich ganz abgestellt.

Fortsetzung: Natürliche Regelkreis-Systeme:	Fortsetzung: Menschengemachte Regelkreis-Systeme:
Populationen: Wenn zuviele Fische in einem Teich leben, sinkt das Nahrungsangebot, damit sinkt die Reproduktionsrate der Fische, so dass die Nachfrage schliesslich wieder sinkt.	Antiblockier- und Antischlupfsysteme: Wenn die Räder eines Autos oder Zugs blockieren bzw. durchdrehen, wird der Bremsdruck bzw. die Beschleunigung reduziert.
Weitere natürliche Regelkreis-Systeme: - Herzfrequenz - Atemfrequenz - Blutzuckerspiegel - Cholesterinspiegel - Photosynthese bei Pflanzen: Bildung von Biomasse aus dem CO ₂ der Luft	Weitere menschengemachte Regelkreissysteme: - ein Staat - Kriminalität - Verkehrsstau / Umwegsuche

1. Unterscheidung von Steuerung und Regelung

Der Begriff Steuerung muss klar vom Begriff Regelung unterschieden werden.

Was ist eine Steuerung?

Eine Steuerung ist die Beeinflussung von Maschinen oder Vorgängen durch Befehle. Sie hat einen offenen und unidirektionalen Wirkungsablauf (Befehl -> Wirkung. Fertig). Sie hat keine Rückkopplung, es gibt kein Feedback.

Beispiele von Steuervorgängen:	Kommentare
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Eine Schaltuhr schaltet zu einer bestimmten Zeit einen Ventilator ein oder aus. ➤ Ein Mikrowellenofen schaltet nach einer bestimmten Zeit die Hitze ab. ➤ Eine Waschmaschine rasselt ihr vorgegebenes Programm durch <p>Sie haben die Absicht, das Licht einzuschalten oder ein PC-Programm auszuführen. Programme oder allgemein Automaten sind meistens reine Steuerungen. Aber was tun Sie, wenn sie den Lichtschalter gedrückt haben, und es kein Licht gibt? Wahrscheinlich werden Sie das nicht einfach hinnehmen, sondern irgendwie reagieren. Durch die Reaktion auf das Feedback werden Sie Teil eines Regelkreises.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sie kümmert sich nicht darum, ob der Ventilator wirklich läuft oder nicht. ➤ Er bekommt kein Feedback, ob das Essen wirklich gar oder warm ist. ➤ Es ist ihr egal ob Wäsche drin ist und egal wie schmutzig sie ist. <p>Sobald man das Feedback über eine den Apparat benützende Person miteinbezieht, so muss das Gesamtsystem meist bereits als Regelkreis verstanden werden. Die Person überprüft die wunschgemässe Ausführung des Steuervorgangs und trifft allenfalls mehr oder weniger angebrachte Korrekturmassnahmen. Z.B.: Schalter mehrfach betätigen, Sicherung überprüfen; nervöses Mausclicken bei Nichtreaktion einer Compi-Funktion, Fusstritt gegen störrischen Billettautomaten usw. :-)</p>

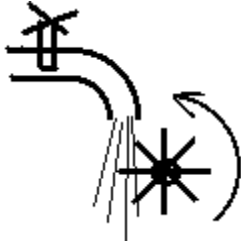
Es ist also recht schwierig, **reine Steuervorgänge** zu finden, sie sind wirklich **eher selten**. Es ist immer die Frage, wo man die **Systemgrenze** zieht. Zwei Steuerungen, die sich gegenseitig beeinflussen, bilden bereits einen Regelkreis!

Steuerkette:

Eine Steuerung führt einen Befehl aus. Sie kann nicht überprüfen, ob und inwiefern ihr Befehl auch ausgeführt wurde.

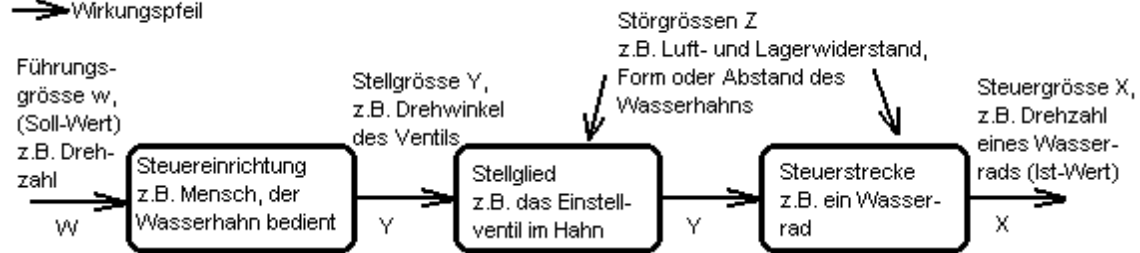
Der Wirkungsablauf ist offen. Es fehlt ein Feedback, eine Rückkopplung.

Beispiel: Ein Wasserhahn steuert ein Wasserrad.



Schema einer Steuerkette:

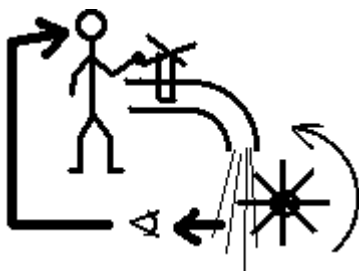
→ Wirkungsfeil



Regelkreis:

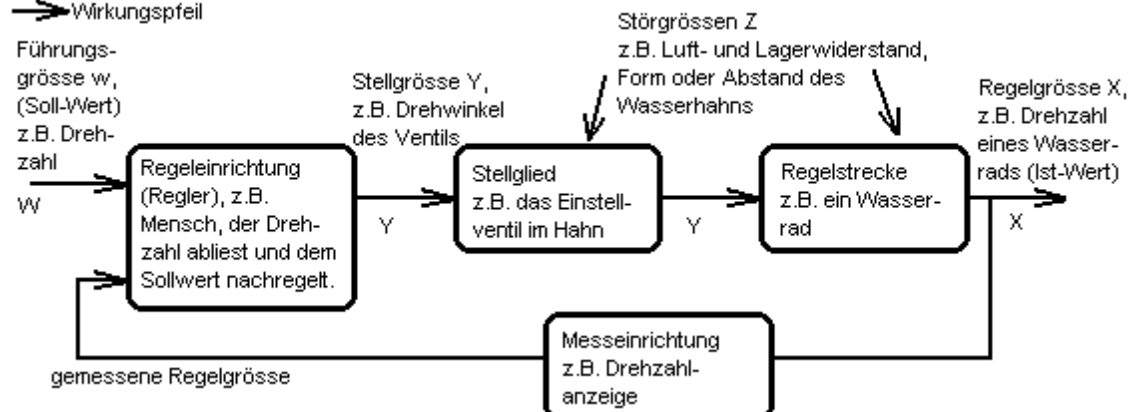
Bei einer Regelung wird der tatsächliche Wert der Regelgröße (hier die Drehzahl) erfasst und mit dem Sollwert (Führungsgröße) verglichen. Differenzen zwischen Soll- und Istwert werden vom Regler korrigiert.

Der Regler ist hier ein Mensch, der die Drehzahl überwacht und die Wasserzufuhr nach Wunsch einstellt.



Schema eines Regelkreises:

→ Wirkungsfeil



Ziel der Regeltechnik:

In der Regeltechnik geht es darum, für jede Regelstrecke (Einrichtung, welche die gewünschte Grösse ausgibt, z.B. Motor, der Drehzahl erzeugt) den optimalen Regler zu finden. Also eine Regeleinrichtung möglichst gut auf das Verhalten der Regelstrecke (des zu regelnden Geräts) und die Bedürfnisse des Benutzers abzustimmen. Die Regelstrecke selber kann meist nicht beeinflusst werden! Dazu muss man das physikalische Verhalten oder den Typus der **Regelstrecke** möglichst genau kennen. Mehr dazu später. Zuerst wollen wir hier die **Arten von Reglern** vorstellen, wie sie in der Technik verwendet werden, weil man diese eben der Regelstrecke anpassen kann. Wenn die Bedürfnisse nicht allzu hoch sind, kann ein Regler auch sehr einfach ausfallen. Ein solcher einfacher Regler ist der Zweipunktregler.

2. Der Zweipunktregler

Ein Zweipunktregler heisst so, weil der Regler nur **zwei bestimmte Werte** für die **Stellgrösse** ausgeben kann.

Ein Beispiel, das in keinem Haushalt fehlt, ist die **Regelung der Kühlschrankschranktemperatur**.

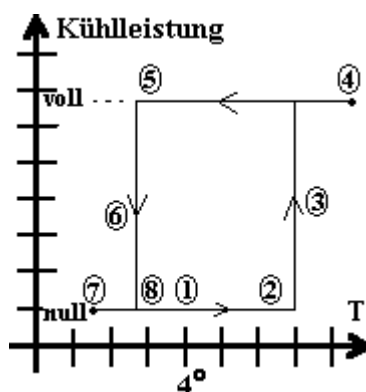
Wir können alle Elemente eines Regelkreises benennen:

Führungsgrösse	<i>Solltemperatur im Innenraum</i>
Regelgrösse	<i>die tatsächliche Innentemperatur</i>
Störgrösse(n)	<i>z.B. die Umgebungswärme</i>
Stellgrösse	<i>Kühlleistung</i>
Regelstrecke (erzeugt die Regelgrösse)	<i>Verdampfer des Kühlaggregats plus der Innenraum</i>
Sollwertesteuer	<i>Thermostat, Temperatureinstellrad</i>
Messeinrichtung	<i>auch der Thermostat</i>
Regler (bewirkt den Regelvorgang)	<i>auch der Thermostat</i>
Stellglied	<i>Kühlaggregat</i>

Funktion der Zweipunktregelung:

Beispiel Sollwert: Die Kühlschrankschranktemperatur soll 4 Grad betragen.

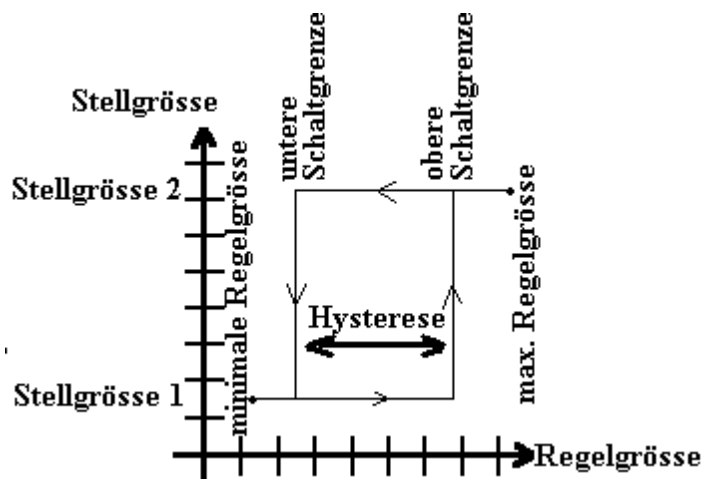
Die nummerierten Phasen der Regelung stellen den gegenseitigen Verlauf von Regelgrösse (Temperatur) und Stellgrösse (Kühlleistung) dar. Die Zeit spielt bei dieser Darstellung keine Rolle und kommt im Diagramm nicht vor!



1. Wir beginnen bei der Solltemperatur von 4 Grad
2. Da die Umgebung des Kühlschranks wärmer ist, steigt die Temperatur im Schrank langsam an, und zwar über die Solltemperatur.
3. Sobald die obere Schwellengrenze des Thermostaten erreicht ist, schaltet dieser das Kühlaggregat ein.
4. Bis der Kühleffekt einsetzt, steigt die Temperatur noch leicht an.
5. Danach sinkt die Temperatur im Innenraum, und zwar unter die Solltemperatur.
6. Sobald die untere Schwellengrenze des Thermostaten erreicht ist, wird das Kühlaggregat ausgeschaltet.
7. Bis der Kühleffekt abklingt, sinkt die Temperatur noch leicht ab.
8. Die Temperatur steigt wieder langsam an, der Prozess wiederholt sich.

Das ist genau das Verhalten eines **Schmitt-Triggers** (eine OpAmp-Schaltung, siehe Kapitel 12). Auch Schmitt-Trigger lassen sich als 2-Punkt-Regler einsetzen!

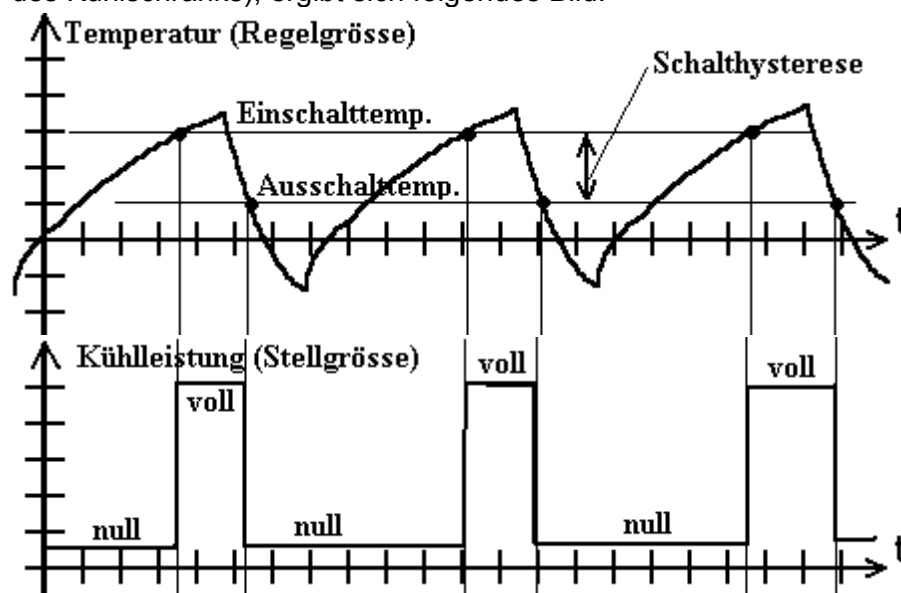
Verallgemeinerung des Verlaufs von Regelgröße und Stellgröße beim Zweipunktregler:



Eigenschaften der Zweipunktregelung:

- Ein Zweipunktregler ist ein so genannt **unstetiger** Regler, das heisst, er kann nur **sprungartig** wechselnde Werte für die Stellgröße ausgeben.
- Kann normalerweise nur **eine** Störgröße ausregeln, also nur auf Abweichungen der Regelgröße in **eine** Richtung reagieren (z.B. auf Erwärmung beim Kühlschrank, nicht aber auf ausserordentliche Kälte).
- Die Regelgröße kann **nicht auf dem Sollwert** gehalten werden, sondern pendelt darum herum. Der Sollwert wird während eines Zyklus' jeweils zweimal ganz kurz erreicht.
- Wird eingesetzt, wenn es nichts macht, das die Regelgröße in relativ breitem Gebiet schwankt.
- Die Schaltdifferenz zwischen unterem und oberem Schaltwert der Regelgröße heisst **Schalthyterese**.
- Je **kleiner die Schalthyterese** eingestellt wird, desto **genauer** liegt die Regelgröße beim **Sollwert**, aber desto **grösser** ist die **Schalthäufigkeit** des Reglers!

Wenn man den **Verlauf von Regel und Stellgröße auf der Zeitachse** darstellt (hier am Beispiel des Kühlschranks), ergibt sich folgendes Bild:



Weitere Anwendungen der Zweipunktregelung:

Kühlschrank, Heizöfeli, Raclettofen, Luftbefeuchter, Luftentfeuchter, Haarfön, Klimageräte, Dämmerungsschalter (siehe unten).

Mehrpunktregler

Der Zweipunktregler kann nur abrupte Änderungen zwischen **zwei** Werten der Stellgrösse vornehmen. Falls diese Änderungen zu grob sind, kann man auch Drei- oder Mehrpunktregler konstruieren. Das heisst, man definiert mehrere Schaltwerte, also mehrere Werte der Regelgrösse, bei denen der Regler mit einer entsprechenden Stellgrösse reagieren soll. Die Regelgrösse schwankt so unter Umständen weniger stark, die Stellgrösse kann aber dann zwischen mehreren Werten wechseln.

Beispiel: Eine zweistufige Heizung (zwei mögliche Heizleistungen, die dritte Heizleistung ist null, Heizung abgeschaltet) benötigt einen **Dreipunktregler**:

Bei der wärmsten Schalttemperatur schalten beide Stufen ab.

Bei der mittleren Schalttemperatur schaltet die Stufe eins ein (und Stufe 2 schaltet aus).

Bei der kältesten Schalttemperatur schaltet die Stufe zwei ein.

Die Haupt-Regelkreisglieder, also die Regelstrecke und der Regler selbst, werden nach ihrem zeitlichen Verhalten unterschieden. Zwei- oder Mehrpunktregler sind **unstetige** oder **diskrete Regler**, weil sie nur sprungartig diskrete (bestimmte) Werte ausgeben können. Wenn genügend Stufen vorhanden sind, kann man auch von einem "digitalen" Regler sprechen, der quasi-stetig regelt (also ohne grosse Sprünge).

Der Zweipunktregler ist der einfachste diskrete oder digitale Regler!

Elektronische Realisierung eines Zweipunktreglers

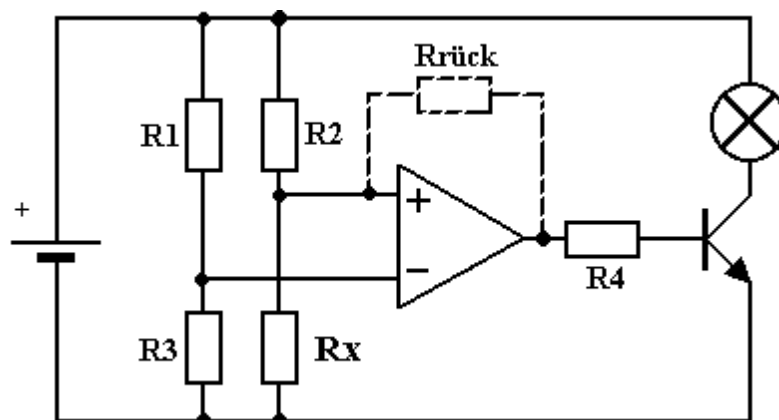
Wenn Rx ein **lichtempfindlicher** Widerstand ist, so ergibt die Schaltung einen **Dämmerungsschalter**.

Funktion: Die OpAmpschaltung **ohne Rück** ist ein **Komparator** (siehe Kap 12).

Bekanntlich führt der Ausgang des OpAmps die positive Betriebsspannung, falls die Spannung am + Eingang grösser ist als am - Eingang, der Transistor leitet, die Lampe brennt. Dies ist der Fall, wenn der Widerstand Rx sehr gross ist, also bei Dunkelheit.

Umgekehrt ist es bei Helligkeit, der Ausgang ist 0, der Transistor sperrt, die Lampe brennt nicht.

Damit sich eine Schalthysterese ergibt, muss man eine schwache Rückkopplung (Mittkopplung) einbauen (Rrück), so dass die Schaltung ein Schmitt-Trigger wird. Damit wird verhindert, dass die Lampe im Bereich der Schaltschwelle ständig ein- und ausschaltet.

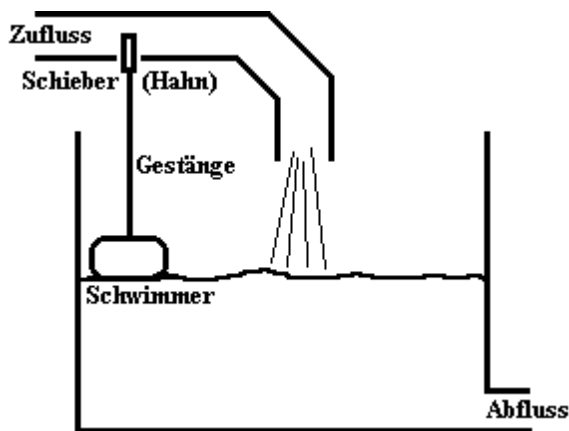


Wenn Rx ein **temperaturabhängiger** Widerstand ist, so ergibt die Schaltung einen **Thermostaten**. Je nach Wahl des Typs von Rx schaltet die Lampe bei Kälte oder bei Wärme ein.

3. Proportionalregler (P-Regler)

Den einfachsten **stetigen Regler** wollen wir an einem Beispiel kennen lernen:
In der untenstehenden Skizze seien:

Regelstrecke:	Flüssigkeitsstand in einem Gefäss mit Zu- und Abfluss
Führungsgrösse w :	Sollwert des Flüssigkeitsstandes
Regelgrösse x :	Tatsächlicher Flüssigkeitsstand
Störgrösse z :	z.B. Abflussmenge
Stellgrösse y :	Durchmesser des Zuflussrohrs
Messeinrichtung:	Schwimmer
Regler:	Schwimmer - Gestänge - Rohrschieber
Stellglied:	Rohrschieber
Sollwerteinsteller:	Länge des Gestänges zwischen Schwimmer und Schieber



Beobachten der Funktion der Regelung:

Am Anfang sei Zuflussmenge = Abflussmenge, z.B. 3 Liter/min., der Wasserstand sei auf dem Sollwert. Der Schwimmer ist mit einem Schieber im Zuflussrohr verbunden und misst so den Pegelstand.

Wenn die Abflussmenge nun auf z.B. 4 Liter/min. steigt (**Störgrösse**), so sinkt der Pegel ab. Es ergibt sich eine Differenz zwischen Sollwert und Istwert des Pegels, die **Regelabweichung**. Dadurch geht der Schwimmer nach unten und zieht den Schieber mit nach unten. Dadurch vergrössert sich die **Stellgrösse**, nämlich der Durchmesser der Zuflusses. Sobald dadurch die Zuflussmenge um 1L/min. erhöht worden ist, bleibt der Pegelstand wieder **konstant** und sinkt nicht weiter ab. Wäre die **Regelabweichung** doppelt so gross, so würde auch die **Stellgrösse um den doppelten Wert verändert**. Dieses **proportionale Verhalten** gibt diesem Regler die Bezeichnung **Proportionalregler**. Wir stellen aber fest:

Solange die **Störgrösse** wirkt (erhöhte Ablussmenge), solange muss auch die **Stellgrösse** (Durchmesser der Zuflusses) **verstellt bleiben**, damit auch die Zuflussmenge erhöht bleibt. Sonst sinkt der Pegel weiter. Dazu wiederum muss aber auch die **Abweichung** des Wasserpegels vom Sollwert (Regeldifferenz) **erhalten bleiben!**

(Der Sollwert für den Pegel könnte mit der Länge des Schwimmergestänges verstellt werden.)

Aus dem Beispiel lassen sich Eigenschaften ableiten, welche sich verallgemeinern lassen. Regler mit diesen Eigenschaften heissen **P-Regler**. Dies darum, weil die **Veränderung** der Stellgrösse proportional zur Regeldifferenz ist.

Eigenschaften der Proportionalregelung (P-Regelung):

Erkenntnis aus dem Beispiel:	Allgemeine Eigenschaften von Proportionalreglern (P-Reglern)
Die Änderung des Zuflusses ist proportional zur Änderung des Wasserstandes.	Die Veränderung der Stellgrösse ist proportional zur Veränderung der Regelgrösse.
Trotz Erhöhung der Zuflussmenge kann der Sollwert des Wasserstandes nicht eingehalten werden.	Eine P-Regelung kann die Regelgrösse nie genau auf dem Sollwert halten.
Auf die Senkung des Wasserstandes reagiert der Regler sofort , der Schieber geht sofort auf.	P-Regelungen bewirken eine schnelle Ausregelung
Solange der Abfluss erhöht bleibt, muss auch der Wasserstand eine Abweichung vom Sollwert behalten	P-Regelungen haben eine bleibende Regelabweichung
Würde der Abfluss weiter verändert, müssten sich auch der Wasserstand und damit der Zufluss weiter verändern.	Eine P-Regelung kann die Regelgrösse nur bei konstanter Störgrösse und konstanter Führungsgrösse konstant halten
Das Verhältnis von Zufluss änderung zu Wasserstands änderung ist quasi die "Verstärkung" des Reglers, auch Uebertragungsfunktion oder Uebertragungskoeffizient genannt. Sie ist ein Mass dafür, wie heftig der Regler auf Abweichungen vom Sollwert reagiert.	Die Uebertragungsfunktion des Proportionalreglers ist also Abweichung der Stellgrösse geteilt durch Abweichung der Regelgrösse , eine Proportionalität, eine konstante Grösse . (Weder zeitabhängig noch von sonstwas abhängig.) $K_p = \frac{y - y_0}{x - x_0}$
Je stärker also der Zufluss bei gesunkenem Wasserstand vergrössert wird, desto näher bleibt der Wasserstand beim Sollwert.	Je grösser dieser Uebertragungswert / Verstärkung ist, desto genauer kann der Sollwert eingehalten werden, aber desto heftiger reagiert der Regler auf Regelabweichungen.

Beispiel für proportionale Regler:

- Elektronische Verstärker: Das Ausgangssignal ist immer proportional zum Eingangssignal
- Das vorhin besprochene Beispiel entspricht dem Prinzip des WC-Spülkastens. Allerdings sind dort die Störgrössen entweder null (gar kein Abfluss) oder extrem gross (Spülen). Kleine Störungen sind selten, ausser wenn der Kasten rinnt. Und es ist auch nicht das Ziel, den Wasserstand konstant zu halten. Die Aufgabe wäre auch mit einem Zweipunktregler zu bewältigen: Füllen wenn leer, Nichtfüllen sobald voll. Nur kurz vor dem Abstellen der Wasserzufuhr wird das proportionale Verhalten sichtbar: Je näher der Wasserstand beim Sollwert (voll) ist, desto kleiner wird der Zufluss.

3.1 Sprungfunktion und Sprungantwort

Um das zeitliche Verhalten von Regeleinrichtungen zu testen, verwendet man die Methode mit **Sprungfunktion und Sprungantwort**. Was ist das?

- Eine **Sprungfunktion** ist eine stufenförmige, eben **sprungartige Veränderung** einer Grösse in z.B. einem physikalischen System.
Sprungfunktionen sind eigentlich nur mathematische Gebilde, in der Realität sind sie nicht zu verwirklichen, denn sie würden unendlich schnellen Aenderungen entsprechen.
- Die **Sprungantwort** ist die **Reaktion** des Systems auf die Sprungfunktion.
Diese Sprungantwort hängt von den Komponenten des Systems ab und gibt Auskunft über das zeitliche Verhalten des Systems.

Beispiel:

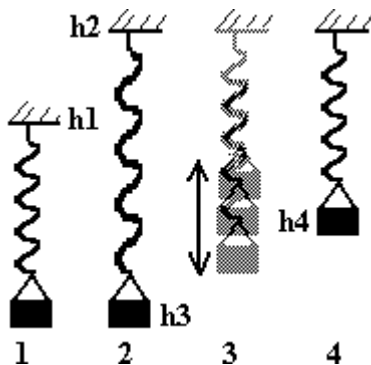
Die Sprungantwort eines Federpendels auf die sprunghafte Veränderung seiner Aufhängehöhe:

Phase 1: Aufhängung ist auf Höhe h_1 , Pendel auf Höhe h_3 .

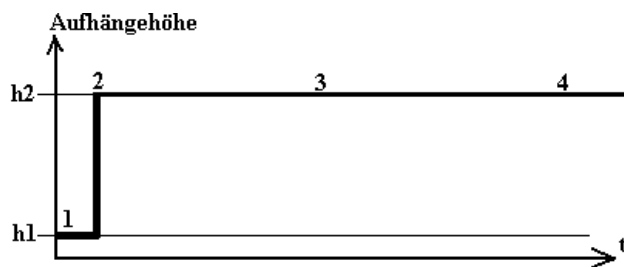
Phase 2: Aufhängung wird sprunghaft auf h_2 verändert. Die Sprungantwort erfolgt aufgrund der Trägheit verzögert.

Phase 3: Das Pendel federt nach, es führt eine abklingende Schwingung aus.

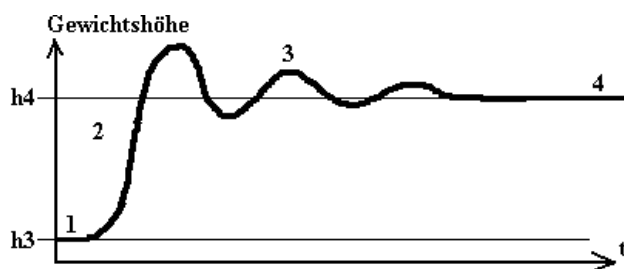
Phase 4: Das Pendel beruhigt sich auf der neuen Höhe h_4



Sprungfunktion:



Sprungantwort:



Fazit: Die Sprungantwort dieses Systems ist eine gedämpfte Schwingung bestimmter Auslenkung, Frequenz und Dauer.

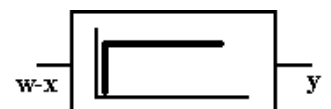
Sprungantwort der Proportionalregelung (P-Regelung)

Wendet man eine **Sprungfunktion auf den Proportionalregler** an, so ist die **Sprungantwort auch ein proportionaler Sprung**. In unserem Beispiel mit dem Wasserstandsregler heisst das:

Wenn man den **Wasserstand** (den **Eingang** des Reglers, die Regelabweichung x_d) sprunghaft ändert, so ändert sich auch der **Durchmesser** des Zuflussrohres sprunghaft (**Ausgang** des Reglers, die Stellgrösse y).

Dies ist bei jedem Proportionalregler so.

Deshalb verwendet man für die Darstellung eines Proportionalreglers (z.B. in einem Blockschaltbild) das folgende Symbol:



Natürlich ist das eine Idealvorstellung. Auch bei einer idealen Sprungfunktion ist in der Realität die Sprungantwort immer mit einer unvermeidbaren **Verzögerung** und ev. einer kleinen Schwingung verbunden!

4. Integrierende Regler (I-Regler)

Ein weiterer **stetiger Regler** ist der integrierende Regler.

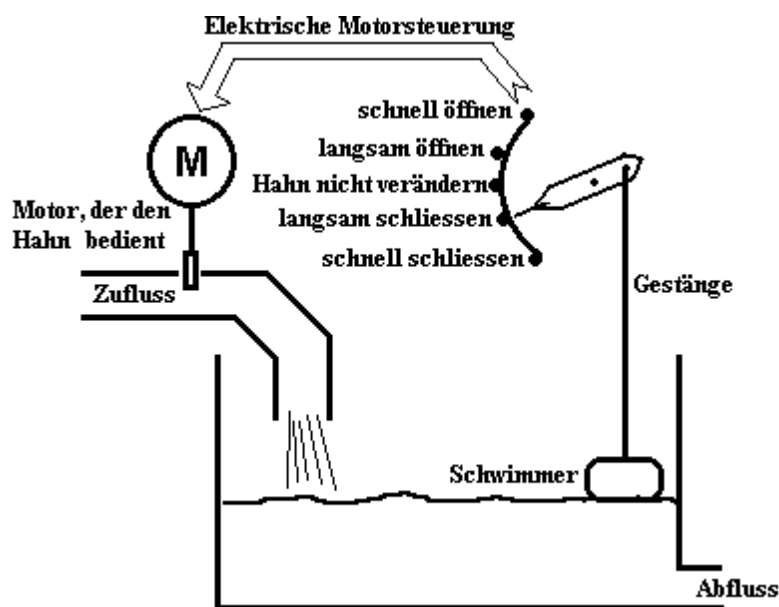
Der vorherige Proportionalregler hat ja den entscheidenden Nachteil, dass er den Sollwert nicht einhalten kann, also eine bleibende Regelabweichung hat. Das Problem beim **P-Regler** war ja, dass die Stellgrösse (der Zufluss) nur dann von der Ausgangsposition abweichen (also korrigieren) kann, wenn der Sollwert nicht eingehalten ist.

Die Stellgrösse müsste also auch verstellt bleiben können, wenn **keine** Regelabweichung besteht, also wenn der Sollwert eingehalten ist.

In unserem Wasserbeispiel darf man dazu die Oeffnungsweite des Schiebers nicht mehr direkt an den Wasserstand koppeln. Die Steuerung des Hahns erfolgt nun über einen Motor.

Im Weiteren gelten auch hier folgende Zusammenhänge:

Regelstrecke:	Flüssigkeitsstand im Gefäss mit Zu- und Abfluss
Führungsgrösse w :	Sollwert des Flüssigkeitsstandes
Regelgrösse x :	Tatsächlicher Flüssigkeitsstand
Störgrösse z :	z.B. Abflussmenge
Stellgrösse y :	Durchmesser des Zuflussrohrs
Messeinrichtung:	Schwimmer
Regler:	Schwimmer - Gestänge - Motorsteuerung - Motor- Rohrschieber (Die Motorsteuerung ähnelt dem Fahrpult einer Spielzeugetisenbahn)
Stellglied:	Rohrschieber
Sollwerteinsteller:	Länge des Gestänges zwischen Schwimmer und Motorsteuerung



Beobachten der Funktion der Regelung:

Am Anfang sei Zuflussmenge = Abflussmenge, z.B. 3 Liter/min., der Wasserstand sei auf dem Sollwert. Der Schwimmer misst den Pegel und ist mit einer Motorsteuerung verbunden. Wenn die Abflussmenge nun auf z.B. 4 Liter/min. steigt (**Störgrösse**), so sinkt der Pegel ab. Es ergibt sich eine Differenz zwischen Sollwert und Istwert des Pegels, die **Regelabweichung**. Dadurch geht der Schwimmer nach unten, er verstellt die Motorsteuerung in Richtung "**schnell öffnen**".

Der Motor dreht den Hahn auf, so dass sich die **Stellgrösse**, nämlich der Durchmesser der Zuflusses, **ständig** vergrössert. Der erhöhte Abfluss wird nach und nach ausgeglichen. Um den Pegel **auf dem Sollwert** zu halten, genügt es aber nicht, den Zufluss um 1L/min. zu erhöhen; hier würde der Pegel nur konstant bleiben, wie beim P-Regler. Da aber der Zufluss **ständig** vergrössert wird, beginnt der Pegel auch wieder zu steigen. Der Schwimmer stellt die Motorsteuerung zurück in Richtung "langsam öffnen". Die **Zunahme** der Zuflussmenge wird **langsamer**. Sobald der Sollwert erreicht ist, wird der Hahn nicht mehr weiter geöffnet. Der Zufluss zu dieser Zeit aber **grösser** als der Abfluss! Dies bedeutet, dass der Wasserpegel **über** den Sollwert steigt! Die Motorsteuerung geht damit auf "**langsam schliessen**". Die Zuflussmenge geht langsam zurück. Der Pegel sinkt aber erst wieder Richtung Sollwert, wenn der Zufluss kleiner ist als der Abfluss. Beim Sollwert hört die Schliessung des Hahns auf. Die effektive Zuflussmenge ist da aber bereits wieder kleiner geworden als die Abflussmenge. Der Regelvorgang beginnt noch einmal von vorne.

Je nach Dynamik des Systems pendelt der Pegel ein paarmal immer schwächer um den Sollwert, oder er schwingt ewig um den Sollwert oder schaukelt sich zu einer extremen Schwingbewegung auf!

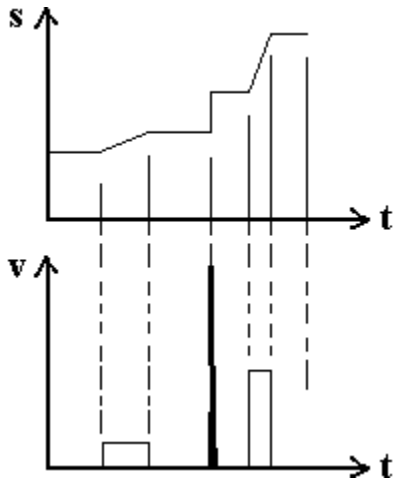
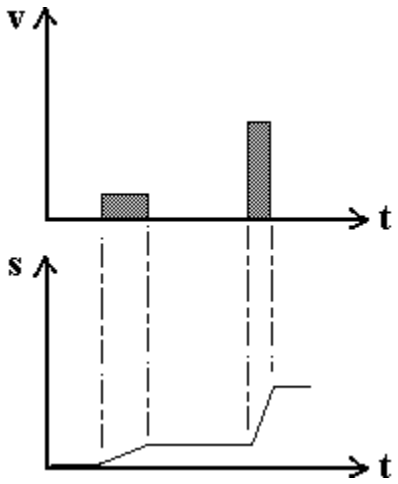
Einschub: Integral und Differential

Was ist das?

Am besten lässt sich dies anhand von Geschwindigkeit, Weg und Zeit darstellen.

Bekanntlich ist Geschwindigkeit definiert als $v = s / t$.

Integral ist das Gegenteil von Differential, deshalb hier eine Gegenüberstellung, ausgehend von der Geschwindigkeitsdefinition:

Differential	Integral
Also ist Geschwindigkeit = zurückgelegter Weg durch benötigte Zeit oder genauer Wegzunahme / Zeitzunahme .	Umgekehrt ergibt Geschwindigkeit mal Zeit den zurückgelegten Weg.
Man sagt, die Geschwindigkeit ist das zeitliche Differential des zurückgelegten Wegs.	Der zurückgelegte Weg ist das Integral der Geschwindigkeit über die betrachtete Zeit.
<u>Mathematisch:</u> Die momentane Geschwindigkeit entspricht der Steilheit des Wegverlaufs .	<u>Mathematisch:</u> Der zurückgelegte Weg entspricht der Fläche unter dem Geschwindigkeitsverlauf (zwischen Zeitachse und Kurve) während der betrachteten Zeit.
Differentieren heisst: Die momentane Steilheit einer Kurve (oben) ermitteln (dargestellt unten).	Integrieren heisst, die Fläche unter einer Kurve (oben) ermitteln (aufsummiert unten).
	
Bei konstantbleibendem Weg ist die Geschwindigkeit null.	Bei Geschwindigkeit null bleibt der zurückgelegte Weg konstant.
Eine lineare Zunahme des Weg lässt auf eine konstante Geschwindigkeit schliessen.	Bei konstanter Geschwindigkeit nimmt der zurückgelegte Weg linear zu.
Eine sprunghafte Zunahme des Wegs würde eine unendlich hohe Geschwindigkeit während einer unendlich kurzen Zeit erfordern (so genannter Nadelimpuls oder Dirac-Impuls). Solches Verhalten ist natürlich ist keinem realen System möglich und existiert deshalb nur als mathematisches Gedankenspiel.	Eine sprunghafte Aenderung der Geschwindigkeit ist möglich und bewirkt einen Knick im Verlauf des Wegs.

Zurück um Beispiel mit dem Wasserkübel mit dem Motorreglerhahn:

Aus dem beschriebenen Verhalten des Systems lassen sich Eigenschaften ableiten, welche sich verallgemeinern lassen.

Für dieses System finden wir analoge Sachverhalte wie beim vorher beschriebenen integralen Verhalten (Spalte rechts).

- Bei Regelabweichung null wird die Stellgrösse nicht verändert, sie bleibt konstant.
- Bei **konstanter** Regelabweichung wird die Stellgrösse **dauernd linear** verändert.

Regler mit diesen Eigenschaften heissen deshalb **integrierende Regler** oder **I-Regler**.

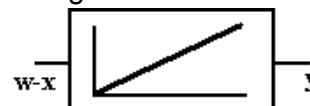
Wendet man eine **Sprungfunktion auf den Integralregler** an (sprunghafte Aenderung der Regelabweichung), so ist die **Sprungantwort ein integrierendes Verhalten**.

In unserem zweiten Beispiel mit dem Wasserstandsregler heisst das:

Wenn man den **Wasserstand** (den **Eingang** des Reglers, die Regelabweichung $x_d = w - x$, den Wasserstand) sprunghaft ändert, so ändert sich der **Durchmesser** des Zuflussrohres konstant **linear** (**Ausgang** des Reglers, die Stellgrösse y). Der Zufluss wird also laufend grösser.

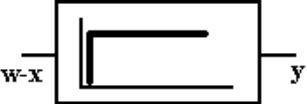
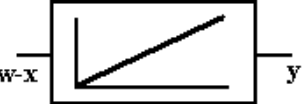
Dies ist bei jedem Integralregler so.

Deshalb verwendet man für die Darstellung eines Proportionalreglers (z.B. in einem Blockschaltbild) das nebenstehende Symbol:



Gegenüberstellung P-Regler / I-Regler:

<p>Zu m Vergleich noch einmal: Eigenschaften von P-Reglern</p>	<p>Erkenntnis aus vorigen Beispiel für I-Regler:</p>	<p>Allgemeine Eigenschaften von I-Reglern</p>
<p>Die Abweichung der Stellgrösse von ihrer Ausgangslage ist proportional zur Abweichung der Regelgrösse.</p>	<p>Die Oeffnungs- oder Schliessgeschwindigkeit des Hahns ist proportional zur Abweichung des Wasserstandes vom Sollwert.</p>	<p>Die Aenderungsgeschwindigkeit der Stellgrösse ist proportional zur Veränderung der Regelgrösse (also prop. zur Regeldifferenz).</p>
<p>Eine P-Regelung kann die Regelgrösse nie genau auf dem Sollwert halten.</p>	<p>Die kontinuierliche Erhöhung der Zuflussmenge führt zum Ausgleich des gesunkenen Wasserstandes.</p>	<p>Eine I-Regelung kann die Regelgrösse auf den Sollwert korrigieren.</p>
<p>P-Regelungen haben eine bleibende Regelabweichung</p>	<p>Solange der Abfluss grösser ist als der Zufluss, wird die Stellgrösse laufend verändert, der Zufluss ständig erhöht.</p>	<p>I-Regelungen haben keine bleibende Regelabweichung</p>
<p>P-Regelungen bewirken eine schnelle Ausregelung</p>	<p>Auf die Senkung des Wasserstandes reagiert der Regler verzögert. Der Motor beginnt zwar sofort zu drehen, er muss aber zuerst eine Weile drehen, bis sich der Zufluss vergössert.</p>	<p>I-Regelungen bewirken eine relativ langsame Ausregelung</p>

<p>Fortsetzung</p> 	<p>Erkenntnis aus vorigen Beispiel:</p>	<p>Fortsetzung</p> 
<p>Eine P-Regelung kann die Regelgrösse nur bei konstanter Störgrösse und konstanter Führungsgrösse konstant halten</p>	<p>Würde der Abfluss dauernd höher, könnte der Regler auch den Zufluss dauernd vergrössern, so dass der Wasserstand konstant bliebe.</p>	<p>Eine I-Regelung kann die Regelgrösse auch bei konstant ändernder Störgrösse oder konstant ändernder Führungsgrösse konstant halten.</p>
<p>Die Uebertragungsfunktion K_p des Proportionalreglers ist eine Proportionalität, also eine konstante Grösse. (Weder zeitabhängig noch von sonstwas abhängig).</p> <p>Verhältnis von Änderung der Stellgrösse zu Regeldifferenz</p> $K_p = \frac{y - y_0}{x - x_0}$	<p>Hier ist die Heftigkeit der Reaktion des Reglers gegeben durch das Verhältnis von Zuflussänderungs-geschwindigkeit zu Wasserstandsänderung.</p> <p>Wenn der Pegel stark vom Sollwert abweicht, so ändert sich der Zufluss auch schnell (Zeitkomponente!)</p>	<p>Die Uebertragungsfunktion des Integralreglers ist eine zeitabhängige Grösse.</p> <p>Verhältnis von Änderunggeschwindigkeit der Stellgrösse zu Regeldifferenz</p> $K_i = \frac{(y - y_0)/\Delta t}{x - x_0}$
<p>Keine entsprechende Eigenschaft. Kein Ueberschwingen.</p>	<p>NEU: Beim Ausregeln "rennt" der Regler über den Sollwert hinaus. Er muss nachher in die Gegenrichtung korrigieren. Dieser Vorgang kann sich mehrere Male wiederholen, wird aber im Normalfall immer kleiner.</p>	<p>I-Regler haben ein unvermeidliches Ueberschwingen. Die Regelgrösse pendelt ein paar Mal um den Sollwert, bis er ihn erreicht.</p>
<p>Je grösser der Uebertragungswert / Verstärkung ist, desto genauer (nicht schneller) kann der Sollwert eingehalten werden.</p>	<p>Je schneller der Zufluss bei gesunkenem Wasserstand vergrössert wird, desto schneller wird der Sollwert wieder erreicht, aber desto höher ist auch das Ueberschwingen.</p>	<p>Kleine Regeldifferenzen bewirken ein langsames Ausregeln, grosse Regeldifferenzen ein schnelles Ausregeln.</p>

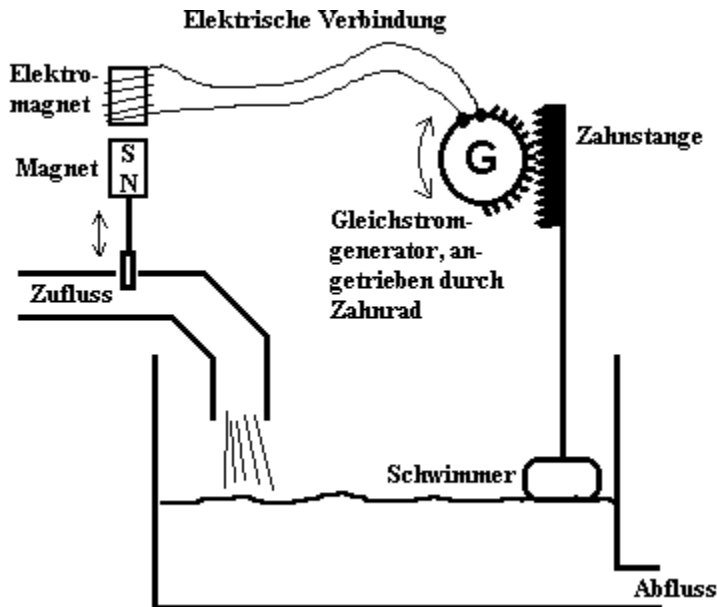
5. Differenzierender "Regler" (D-Regler)

Man kann nun das Gedankenspiel weiterspinnen.

Ein weiterer **stetiger Regler** wäre der differenzierende Regler oder D-Regler.

"Wäre" deshalb, weil er - falls **allein** verwendet - keine sinnvolle Verwendung findet, wie wir unten sehen werden.

Als Anschauungsbeispiel dient wieder der Wasserbehälter mit einer elektromechanischen Regelung:



Funktion dieser Regelung:

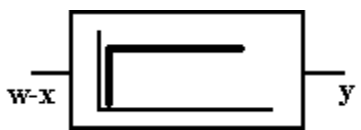
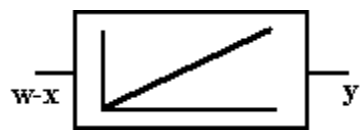

Immer wenn sich der Pegel bewegt, wird die Zahnstange bewegt. Diese dreht an einem Zahnrad, das einen Gleichstromgenerator antreibt. Der Strom dieses Generators wird auf einen Elektromagneten geführt. Der Elektromagnet zieht den Schieber mit dem Dauermagneten hoch oder stösst ihn nach unten, je nach Polarität der Generatorspannung. Wenn sich der Pegel nicht verändert, ist die Generatorspannung null, der Zufluss nimmt den Normalwert an.

Erkenntnisse aus dem Beispiel:	Allgemeine Eigenschaften von D-Reglern
Eine schnelle Aenderung des Pegelstandes bewirkt eine höhere Spannung , damit eine stärkere magnetische Kraft und damit ein grösseres Verstellen des Zuflusses.	Die Verstellung der Stellgrösse ist proportional zur Änderung sgeschwindigkeit der Regelgrösse.
Während einer Veränderungen des Wasserstandes reagiert der Regler sofort , der Schieber geht sofort auf oder zu.	D-Regelungen reagieren sehr schnell auf Änderungen der Regeldifferenz bzw. der Regelgrösse.
Wenn der Pegel zu hoch oder zu tief, aber konstant ist, so verändert der Regler den Zufluss nicht , der Zufluss geht auf den Normalwert!	D-Regelungen haben eine bleibende Regelabweichung , die sogar sehr gross sein kann. Konstante Regeldifferenzen werden nicht ausgeregelt!
Ein D-Regler reagiert also nur auf Änderungen der Regelgrösse bzw. der Regeldifferenz.	Eine D-Regelung für sich alleine macht keinen Sinn, da sie auch grosse Abweichungen nicht auskorrigieren kann.

Die **Sprungantwort** des D-Reglers wäre ebenfalls die Reaktion auf ein unendlich schnelles Aendern der Regelgrösse. Dies bewirkt gemäss dem Einschub über das Differential einen extrem kurzen, aber extrem starken Impuls aus dem Generator und damit eine extrem kurze aber extrem grosse Verstellung der Stellgrösse. Es wäre als Grenzfall der so genannte Nadelimpuls oder **Dirac-Impuls**. Deshalb verwendet man als Symbol für reines D-Verhalten das Symbol rechts:



Gegenüberstellung der Grundreglertypen:

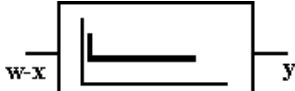
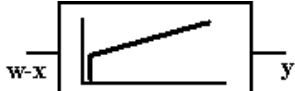
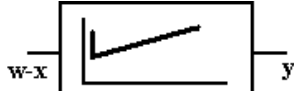
Proportionalregler	Integralregler	Differentialregler
		
Die Verstellung der Stellgröße ist proportional zur Regeldifferenz. mathematisch: $K_p = \frac{y - y_0}{x - x_0}$	Die Verstellungsgeschwindigkeit der Stellgröße ist proportional zur Regeldifferenz: mathematisch: $K_i = \frac{(y - y_0)/\Delta t}{x - x_0}$	Die Verstellung der Stellgröße ist proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße mathematisch: $K_d = \frac{y - y_0}{(x - x_0)/\Delta t}$
regelt relativ schnell	regelt langsam	regelt sehr schnell
bleibende Regelabweichung	keine Regelabweichung	bleibende Regelabweichung
kein Überschwingen	Überschwingen	kann nicht ausregeln

6. PD-, PI- und PID-Regler

Wie wir sehen, hat jeder dieser Grundreglertypen bestimmte Nachteile.

Da ein Regler auf alle denkbaren Störeinflüsse möglichst optimal reagieren soll, ist es naheliegend, die Eigenschaften der verschiedenen Reglertypen zu kombinieren.

Theoretisch-mathematisch und auch experimentell kann man zeigen, dass die verschiedenen Kombinationen mit dem P-Regler günstige Regeleigenschaften ergeben.

	PD-Regler	PI-Regler	PID-Regler
Zeichen			
Aufbau	Parallelschalten eines P-Reglers und eines D-Reglers	Parallelschalten eines P-Reglers und eines I-Reglers	Parallelschalten eines P-Reglers, eines I-Reglers und eines D-Reglers
Regelgeschwindigkeit	schnellere Ausregelung gegenüber einem reinen P-Regler	schnellere Ausregelung gegenüber einem reinen I-Regler	schnellste Ausregelung
Regelqualität	hat bleibende Regelabweichung	keine bleibende Regelabweichung	keine bleibende Regelabweichung

DI-Regler werden nicht verwendet. Der **PID-Regler** ist ein verbreiteter Standardregler. Zum Beispiel für Heizungsregelungen in jedem Haus.

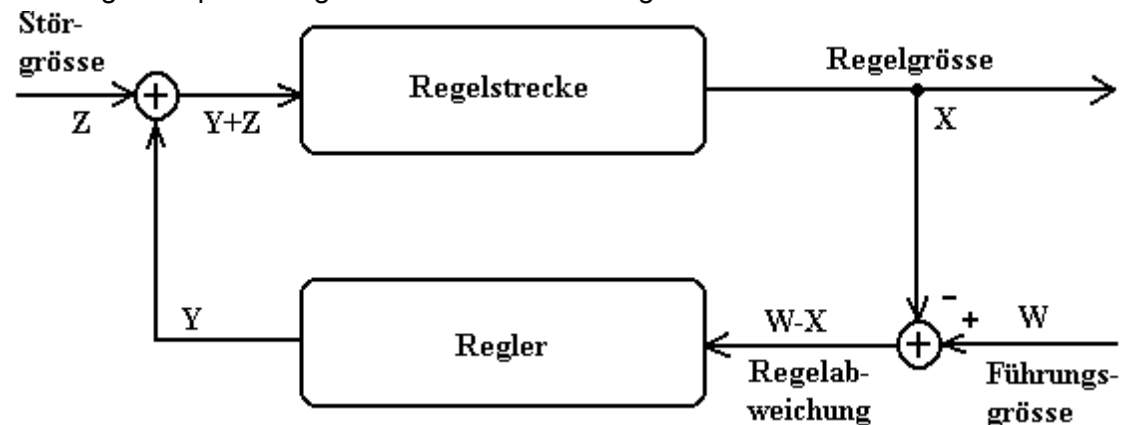
Wenn wir unser Anschauungsbeispiel vom Wasserbehälter mit einer PID-Regelung optimieren möchten, müsste man das Zuflussrohr in drei Teilzuflüsse aufteilen. Je ein Teilrohr würde nun mit einem P- bzw. D- bzw. I-Regler ausgestattet. Die einzelnen Anteile könnte man durch je einen Regulierhahn pro Rohr einstellen. Das Einstellen von Reglern ist häufig eine experimentelle und nicht wissenschaftliche Arbeit, weil das Verhalten der Regelstrecke nicht immer exakt genug beschreibbar ist.

Der Regler würde also aus **drei Teilreglern** bestehen, welche alle einen Beitrag an die Regelung und damit an die Stellgrösse liefern. Die **Stellgrössen** jedes Reglers werden **addiert**. Damit wird erreicht, dass dort, wo **ein** Regler allein zu wenig schnell oder zu ineffizient wäre, ein anderer Regler den erforderlichen Anteil der Stellgrösse liefert. Andererseits kann der eine Regler auch eine Überreaktion eines andern Reglers abdämpfen, indem er eine negative, also entgegengesetzt wirkende Stellgrösse ausgibt.

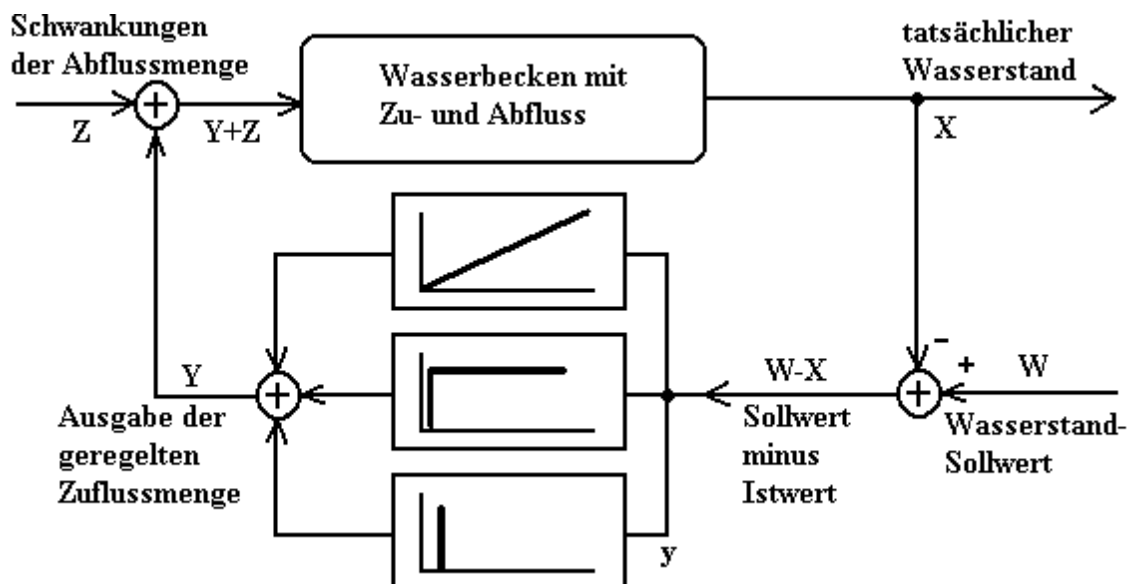
Insgesamt ist der kombinierte Regler stabiler und zuverlässiger als ein einzelnder Reglertyp.

Hier noch zur Wiederholung die Darstellung eines Regelkreises in seiner allgemeinsten und einfachsten Form:

- Hauptbestandteile sind die Regelstrecke (Gerät, das Regelgrösse erzeugt) und der Regler
- Messeinrichtung und Stellglied werden nicht gezeichnet
- Istwert minus Sollwert wird dem Regler zugeführt
- Stellgrösse plus Störgrösse wirken auf die Regelstrecke



Angewendet auf das Beispiel mit dem Wasserbecken sieht der Regelkreis mit einem PID-Regler nun folgendermassen aus:



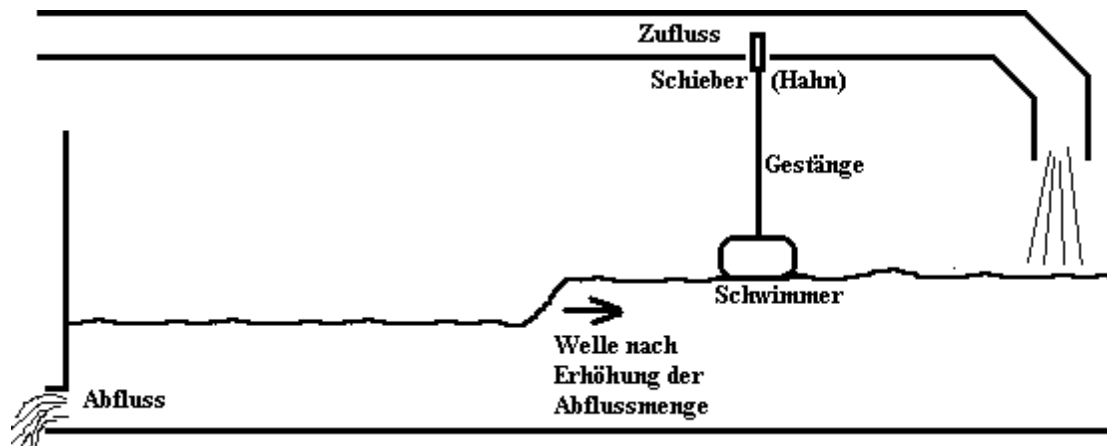
Beim Beispiel Wasserbecken haben wir praktisch nie vom Verhalten der Regelstrecke gesprochen. Dieses Verhalten hängt schon bei diesem simplen Beispiel von vielen Faktoren ab und charakterisiert die Regelstrecke. Dieser Charakter (physikalisch/mathematisch) kann für die Auswahl und Optimierung des Reglers von Bedeutung sein.

7. Typen von Regelstrecken

Beim Wasserbeckenbeispiel sind wir davon ausgegangen, dass die Abflussmenge in einem gewissen Bereich ungefähr proportional mit dem Füllstand zusammenhängt, da der Druck am Fuss des Beckens proportional zur Wasserstandshöhe ist. Dies allein hilft uns allerdings noch nicht viel weiter, wenn wir beurteilen sollten, wie schnell dieses System zum Beispiel auf eine Störung (Änderung des Abflusses) reagiert. Und wie es auf die Korrektur der Zuflussmenge reagiert. Hier geht es um **zeitliches** Verhalten: Wie schnell, oder mit welcher Verzögerung ändert sich etwas.

Vieles hängt beispielsweise allein schon von der Form des Beckens ab!

- Ist das Becken eher ein Schacht, also ein schmales, hohes "Becken"?
- oder haben wir einen langen liegenden Tank, sind Zu- und Abfluss weit voneinander entfernt?
- Wo ist der Schwimmer? Im Bereich des Zuflusses? Oder beim Abfluss? Oder in der Mitte?



Schon allein aus diesen Überlegungen muss klar werden, dass es eben "draufankommt".

Genau wie die Regler kann man auch die Regelstrecken testen auf ihr zeitliches Verhalten: Nämlich mit der Sprungfunktion. Man appliziert also eine sprunghafte Veränderung der Eingangsgrösse (Y oder Z) und untersucht die Reaktion der Regelgrösse X.

Im Fall des Beckens heisst das, man verändert entweder sprunghaft den Abfluss (Änderung der Störgrösse Z)

oder

verkürzt schlagartig das Gestänge des Schwimmers (Änderung von Sollwert, Führungsgrösse W) und beobachtet das Verhalten des Wasserstandes.

Es braucht nicht viel Phantasie um zu erkennen, dass man hier bereits keine generellen Aussagen mehr machen kann.

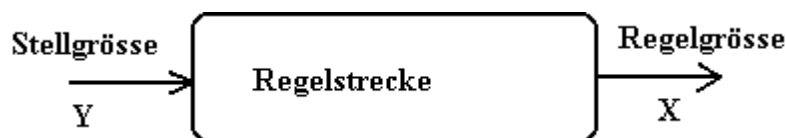
- Wo soll man den Wasserstand beobachten?
- Wie weit sind Zu- und Abfluss voneinander entfernt?
- Wie weit ist der Schwimmer von Abfluss und Zufluss entfernt?
- Ist die Flüssigkeit wirklich Wasser? Oder vielleicht Honig?

Aus der obigen Skizze kann man einige Erkenntnisse ableiten:

- Wenn der Abfluss erhöht wird, sinkt der Wasserpegel zuerst im Bereich des Abflusses, der Schwimmer merkt noch nichts davon. Eine absinkende Welle bewegt sich vom Abfluss auf den Schwimmer zu.
- Erst wenn die Welle den Schwimmer erreicht, kann der Regelungsvorgang einsetzen, der Zufluss wird gemäss der P-Regler-Charakteristik erhöht.
- Der erhöhte Zufluss seinerseits bewirkt eine steigende Wasserwelle, die sich vom Zufluss auf den Schwimmer zu bewegt. Der Schwimmer und damit der Regler reagiert also auf die Störung verzögert und auch auf die Korrektur durch die Stellgrösse verzögert.

8. Regelstrecken **ohne** Ausgleich

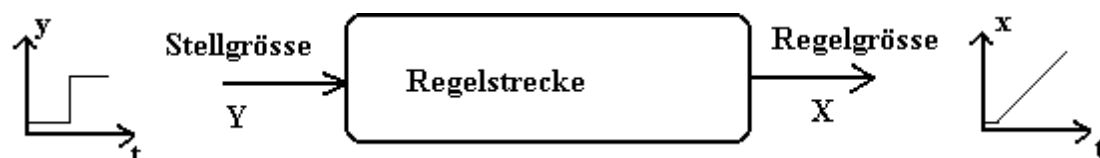
Der "Ausgleich" bezieht sich auf die Regelgröße, also den Ausgang der Regelstrecke. Ausgleich bedeutet: Die Regelgröße strebt einen Beharrungszustand an, sie läuft auf einen stationären Endwert hin. Dies alles, wenn die Stellgröße sprunghaft verändert wird (Sprungfunktion als Eingangssignal der Regelstrecke).



- **Mit Ausgleich** würde bedeuten, dass nach einem Sprung der Stellgröße die Regelgröße einem bestimmten Wert entgegenstrebt und dann nicht weiter ansteigt.
- **Ohne Ausgleich** bedeutet, dass sich die Regelgröße nach einem Sprung der Stellgröße **dauernd linear verändert**.

Eine Regelstrecke ohne Ausgleich ist zum Beispiel unser bestbekanntes **Wasserbecken**beispiel: (Genau genommen, nur wenn der Abfluss ganz zu ist!)

Wenn im Ruhezustand des Regelkreises die Stellgröße (Zufluss) sprunghaft erhöht wird, so steigt der Pegel linear an.



Jede Regelstrecke ohne Ausgleich ist eine reine **integrierende Strecke** (analog dem integrierenden Regler, der bei jeder Regelabweichung (Eingang) die Stellgröße (Ausgang) laufend linear verändert).

Jede Füllstandsstrecke ist eine Regelstrecke ohne Ausgleich.
 Strecken ohne Ausgleich sind reine I-Strecken.
 Beispiele: WC-Spülkasten, Badewanne, Oeltank

In der Realität ist natürlich der Anstieg der Regelgröße bei jeder integrierenden Strecke irgendwo durch den "Katastrophenfall" begrenzt (Ueberlaufen eines Beckens, Platzen eines Tanks).

Grundsätzlich kann man genau wie bei den Reglern Symbole entwerfen für die Regelstreckentypen. Diese Symbole müssten ebenfalls die Sprungantwort des Ausgangs auf eine Sprungfunktion am Eingang darstellen.

Bei einer Strecke ohne Ausgleich, welche ja eine I-Strecke ist, kann man deshalb ein ähnliches Symbol wie beim I-Regler verwenden.

Zusätzlich muss man Strecken **mit und ohne Verzögerung** unterscheiden. In der Realität hat natürlich jedes System eine kleine Verzögerung, die nicht immer berücksichtigt werden muss. Die Verzögerungszeit verzögert den Eintritt des integralen Verhaltens. Strecken mit einer **ausgeprägten** Verzögerungszeit kann man auch mit dem Symbol rechts verdeutlichen.



9. Regelstrecken mit Ausgleich

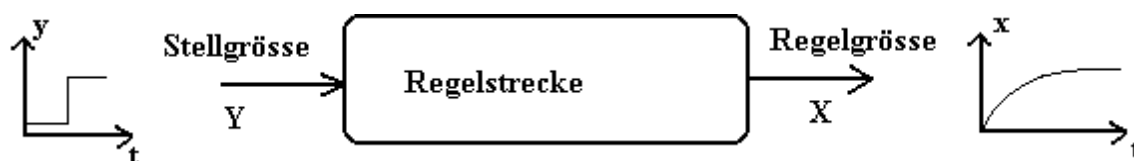
Wesentlich häufiger sind Regelstrecken **mit** Ausgleich.

Die Regelgrösse strebt auch nach einem Sprung der Stellgrösse einen Beharrungszustand an, sie läuft auf einen stationären Endwert hin.

- **Mit Ausgleich** bedeutet, dass nach einem Sprung der Stellgrösse die Regelgrösse einem bestimmten Wert entgegenstrebt und dann nicht weiter ansteigt.

Beispiele:

- **A)** Ein Elektroofen wird eingeschaltet (Stellgrösse ändert sich sprunghaft). -> Der Ofen erreicht je nach zugeführter und abgeführter Leistung eine bestimmte **Endtemperatur**. Wenn man die Anschlussspannung sprunghaft verändern würde, so stellt sich eine andere Endtemperatur ein.
- **B)** Ein Elektromotor läuft mit 5V auf einer gewissen Drehzahl. Nun wird die Spannung verdoppelt (Sprungfunktion). Die Drehzahl steigert sich und strebt einem neuen, höheren Endwert entgegen (Sprungantwort).



Jede Regelstrecke mit Ausgleich ist eine **proportionale Strecke** (P) mit einer oder mehreren Zeitkomponenten (Verzögerungen T).

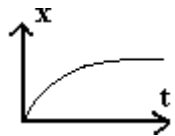
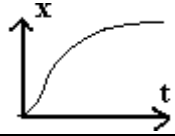
- Proportional deshalb, weil die Endhöhe von x immer proportional zur Sprunghöhe von y ist.
- Die Zeitkomponenten zeigen sich in der Steilheit des Anstiegs und in der Zeit, bis sich der Verlauf z.B. auf 90% an den Endwert angenähert hat. Grafisch und mathematisch handelt es sich um eine oder mehrere überlagerte e-Funktionen

Für solche Regelstrecken wird oft eine der folgenden Bezeichnungen verwendet:

PT1, wenn die Zeitverzögerung erster Ordnung ist,

PTn, wenn die Verzögerung höherer (n-ter) Ordnung ist.

PT0 ist ein Idealfall einer reinen Proportionalen Regelstrecke ohne Verzögerung, der streng genommen nicht existiert, aber als Annäherung an "schnelle" Regelstrecken verwendet werden darf.

Wie oben sichtbar ist, ist die Sprungantwort einer PT1 -Strecke eine e-Funktion, wie sie beim Laden des Kondensators auftritt.	
Bei Strecken mit Zeitverzögerungen höherer Ordnung (PTn) gleicht die Kurve einer S-Kurve.	
PT1	
PT2 und PTn	

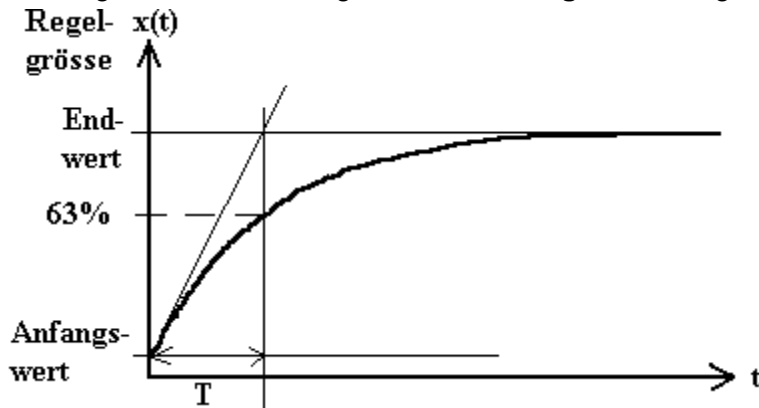
Die Sprungantworten kann man auch gerade als Symbol zur Kennzeichnung dieser Strecken benutzen.

Das obige **Beispiel A** (Elektroofen) gehört sicher in die **PTn**-Kategorie (wahrscheinlich PT2), weil ja die Erwärmung des Elektro-Heizfadens zuerst den Heizkörper durchdringen muss, bevor sie an der Oberfläche (dem Ausgang der Regelstrecke) spürbar wird.

Hingegen kann man beim **Beispiel B** (Elektromotor) davon ausgehen, dass die Geschwindigkeit des Motors **sofort** und verzögerungsfrei nach Erhöhung der Spannung zunimmt, womit wir diese Regelstrecke **PT1**-Charakteristik zuordnen können.

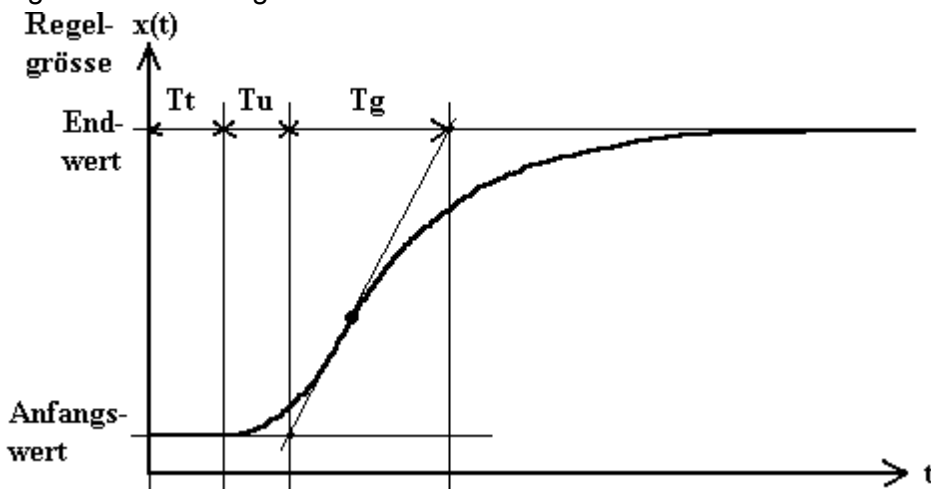
10. Eigenschaften von Regelstrecken

Eine Regelstrecke mit Ausgleich **1. Ordnung** hat die folgende Sprungantwort (e-Funktion):



Das charakteristische eigenzeitliche Verhalten der Regelstrecke ist an der Zeit **T** ablesbar. Es ist die Zeit, bis die Funktion auf 63% ihres Endwerts gestiegen ist (mathematisch bedingt). Grafisch erhält man die Zeit **T**, wenn man am Fusspunkt die Tangente an die Kurve legt und mit dem Endwert schneidet. **T** heisst **Zeitkonstante** (analog dem Ladevorgang beim Kondensator). Die Halbwertszeit **T_{1/2}** wäre übrigens **T_{1/2} = T • ln2 = T • 0.693**

Die Regelstrecke mit Ausgleich **2. Ordnung** hat als Sprungantwort eine S-Kurve (2 überlagerte e-Funktionen). Die Kurve hat einen sogenannten **Wendepunkt** (der markierte Punkt). Das ist die Stelle, wo sich der Krümmungssinn der Kurve ändert. Wenn man in diesem Punkt die Tangente an diese Kurve legt (sogenannte Wendetangente), kann man daraus ebenfalls charakteristische Zeiten ablesen. Dies ist auch wichtig für die Beurteilung der Regelbarkeit der Regelstrecke.



Tt: Totzeit	Zeit, in der keine Reaktion der Regelstrecke feststellbar ist.
Tu: Verzugszeit	Zeit vom Beginn der Reaktion bis ungefähr zum Beginn der Eigenzeitfunktion der Regelstrecke.
Tg: Ausgleichszeit	Zeit vom Beginn der charakteristischen Eigenzeitfunktion bis diese Funktion auf ca. 63% an den Endwert herangekommen ist.

Wenn **Tu=0** wäre, so reduziert sich die Strecke zu einer Strecke **1. Ordnung**.

Für die Beurteilung der Regelbarkeit solcher Regelstrecken gibt es Faustregeln.

Die Regelbarkeit ist abhängig vom Verhältnis zwischen **Verzugszeit Tu** und **Ausgleichszeit Tg**.

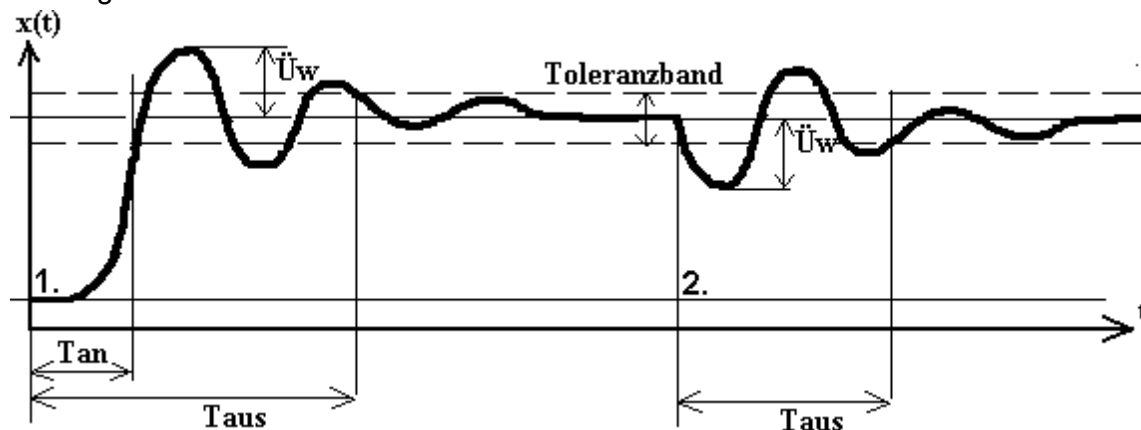
Falls	gilt die Regelstrecke als
Tg viel grösser als Tu ($Tg/Tu > 10$)	gut regelbar
Tg leicht grösser als Tu ($Tg/Tu = 3..10$)	mässig regelbar
Tg im Bereich oder unter Tu ($Tg/Tu < 3$)	schlecht regelbar

Für das Finden des optimalen Reglers gibt es viele eher experimentell ermittelte Einstellregeln, die wir aber nicht behandeln.

Was bei der Wahl immer mitspielt sind die Anforderungen an die technische Anlage oder die Bedürfnisse der Benutzenden. Ebenso haben die Angriffspunkte von Stör- und Führungsgrößen im Regelkreis einen grossen Einfluss.

Regelgüte, Führungs- und Störungsverhalten

Im folgenden Bild sehen Sie einen typischen Verlauf einer Regelgrösse, zuerst nach einer **Sollwertveränderung**, gefolgt von einer **Störung**. Hier sind Führungsverhalten und Störungsverhalten ähnlich.



Gütekriterien:

Zuerst muss ein **Toleranzband** festgelegt werden, das die erlaubten Abweichungen vom Sollwert angibt. Dann kann man sich an folgende Gütekriterien halten:

T_{an} : Anregelzeit	Zeit bis zum ersten Eintritt ins Toleranzband
T_{aus} : Ausregelzeit	Zeit bis zum definitiven Eintritt ins Toleranzband
Ü_w Überschwingweite	Höhe des Ausschlags über den Sollwert (Endwert) hinaus

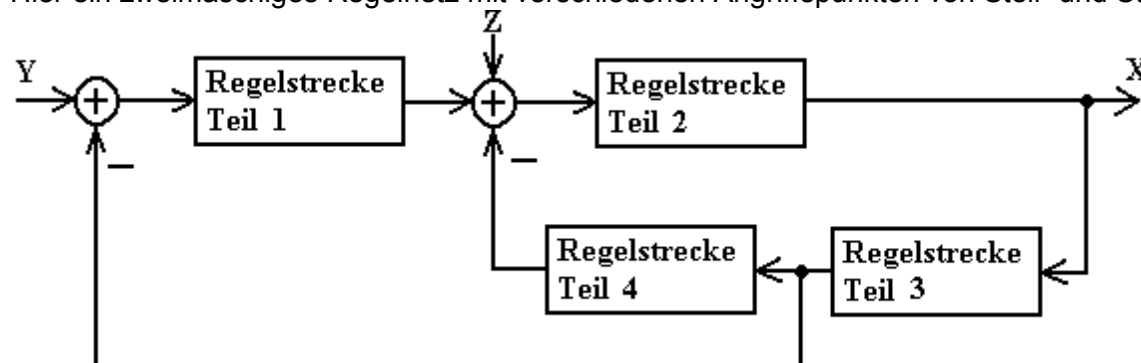
In der Praxis ist es häufig so, dass man nicht alle Anliegen unter einen Hut bringt. Eine kleinere Überschwingweite beispielsweise bewirkt meist eine längere Ausregelzeit. Ferner kann man nicht immer Führungs- **und** Störverhalten optimieren.

Regelkreis auf Führung optimiert (Führungsverhalten ist günstig) heisst:	Der Regelkreis kommt auch mit heftigen und sprungartigen Änderungen des Sollwerts (Führungsgrösse) umgehen, und das System bleibt stabil.
Regelkreis auf Störung optimiert (Störungsverhalten ist günstig) heisst:	Der Regelkreis kommt auch bei verschiedenen heftigen und sprungartigen Störungen nicht aus der "Ruhe" und das System bleibt einigermassen stabil.

Bis jetzt haben wir immer nur von **einmaschigen** Regelkreisen gesprochen.

Der Vollständigkeit halber muss hier erwähnt werden, dass viele reale (technische oder natürliche) Regelsysteme nicht nur "Kreise" sind, sondern eigentliche mehrmaschige **Regelnetzwerke!**

Hier ein zweimaschiges Regelnetz mit verschiedenen Angriffspunkten von Stell- und Störgrösse:



Den optimalen Regler zu finden ist hier natürlich noch schwieriger.

11. Spezielle Regler

Feedforward Regler

Alle bisher behandelten Regler erhalten ihre benötigte Information vom Ausgang der Regelstrecke (Feedback-Regler). Bei Regelstrecken mit hohen Durchlaufzeiten ist das Feedback oft so stark verzögert, dass der Regler versagt. Mit einem Feedforward-Regler erkennt man Störungen bereits, bevor sie sich am Ausgang der Regelstrecke bemerkbar machen, der Regler kann rechtzeitig korrigierend wirken. Das Problem ist aber, dass der Regler den Effekt seiner Korrektur erst wieder verzögert erhält. Woher weiss der Regler also, welchen Stellwert er einstellen soll, wenn er die Rückkopplung des Istwerts noch gar nicht hat? Er muss - salopp gesagt - "gescheit" sein oder auf einen Erfahrungsschatz zurückgreifen können.

Diese Fähigkeit kann er durch folgende Möglichkeiten erhalten:

- mathematische Beschreibung aller Regelstreckenteile.
- Kenntnis aller möglichen vorkommenden Zustände des Systems
- Beschreibung des Regelkreises durch sogenannte modellfreie Expertensysteme (künstliche neuronale Netzwerke oder Fuzzy-Logik (siehe unten))
"Expertenwissen" kann zum Beispiel heissen, dass dem Regler Informationen über seltene, aber gefährliche Systemzustände vorliegen: "Vorsicht, vor 2 Stunden ist bei dieser Konstellation die Temperatur schlagartig angestiegen."

Fuzzy-Regler

Fuzzy ist englisch und heisst auf deutsch *verschwommen, unscharf*. Oft spricht man auch von Fuzzy-Logik, also von unscharfer Logik. Fuzzy-Logik ist das 'Handling' unscharfer Werte mit einer geeigneten Verknüpfungslogik. Der Fuzzy-Controller kann zum Beispiel auf eine Datenbank mit Expertenwissen zurückgreifen, dies ist auch dem menschlichen Verhalten meist näher als das exakt mathematisch vordefinierte Verhalten der klassischen Regler (z.B. PID-Regler). Am einfachsten machen wir ein Beispiel: Auto fahren:

Wenn unser Kopf ein PID-Regler wäre, würde er das folgende machen:

"Bei 57,41 km/h und 12,65 m Abstand vom mit 40,64 km/h fahrenden Vordermann muß ich mit 7,793 m pro s² Verzögerung abbremesen, damit es nicht crasht",

Unser Gehirn, ein 'Neuro-Fuzzy-Regler' macht aber folgendes:

"Wenn ich etwas mehr als 50 fahre und nur noch wenig Abstand zum Vordermann habe, der noch langsamer fährt als ich, dann sollte ich bald einmal ziemlich saftig bremsen."

Und das funktioniert erstaunlicherweise (meistens).

12. Wertvolle Ergänzungen (Stand Februar 2002)

Theorie:

Was	Google Suchbegriff(e)	W0
Z.B.: Einführung in die Fuzzy-Logik, künstliche neuronale Netzwerke, künstliche Intelligenz, genetische Algorithmen	Bratz "Einführung in Fuzzy-Logik	http://thor.tech.chemie.tu-muenchen.de/~bratz/fuzgerm/fuzzy.html

Interaktive Applets zur Veranschaulichung:

Was	Google Suchbegriff(e)	W0 (Bindestriche gehören dazu!)
PT3-Regelstrecke mit P-Regler geregelt (3 Wassertanks)	3-Tank-Animation	http://www.iei.tu-clausthal.de/~promise/rt1/3tank.html
Führungsverhalten einer Regelstrecke höherer Ordnung bei verschiedenen Reglereinstellungen		http://techni.tachemie.uni-leipzig.de/reg/regtest.html

Sprungantwort eines Systems zweiter Ordnung (Schwingfähigkeit)	fernuni hagen sprungantwort ordnung	http://es-i2.fernuni-hagen.de/JAVA/response/response.html
--	--	---