



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Inhaltsverzeichnis:

9.1 Grundlagen	2
9.1.1 Steuern	2
9.1.2 Regeln	6
9.1.3 Definition der Regelung: DIN 19 226	9
9.1.4 Prozess	9
9.1.5 Der Regelkreis	10
9.1.6 Abkürzungen regelungstechnischer Größen	11
9.1.7 Symbole der Regelungstechnik	13
9.2 Regelungsverfahren und -Strukturen	18
10 Reglertypen	19
10.1 Festwertregelung	19
10.2 Folgeregler	19
10.3 Kaskadenregelung	20
10.4 Verhältnisregelung	21
10.5 Fuzzy-Regler	22
10.6 Prädiktive Regler	24
11 Regelstrecken	25
11.1 P-Regelstrecke	26
11.2 I-Regelstrecke	27
11.3 Regelstrecke mit Totzeit	29
11.4 Regelstrecke mit Energiespeichern	31
11.4.1 Verzögerung 1. Ordnung	33
11.4.2 Verzögerungen 2. und höherer Ordnung	34
11.5 Regelbarkeit einer Strecke mit Ausgleich	38



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

9. Regelungstechnik

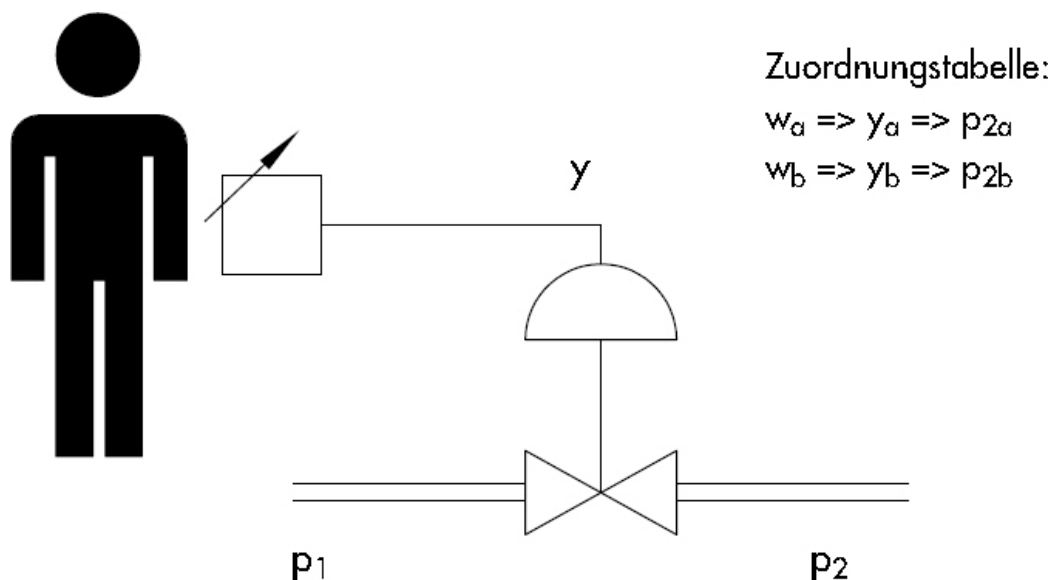
Die folgenden Textauszüge stammen im Wesentlichen aus Schulungspublikationen der Fa. Samson / Frankfurt

9.1 Grundlagen

9.1.1 Steuern

Die Steuerung ist ein Vorgang, bei dem über eine oder mehrere Eingangsgrößen eines Systems eine Prozessgröße beeinflusst wird. Der sich tatsächlich einstellende Wert der Prozessgröße wird nicht überprüft, so dass sich eine mögliche Abweichung z.B. hervorgerufen durch äußere Störungen nicht auf den Steuerungsvorgang auswirkt. Kennzeichen der Steuerung ist somit ein offener Wirkungsablauf.

Der in Bild 1 dargestellte Bediener hat die Aufgabe mit einem Stellventil den Druck (p_2) in einer Rohrleitung einzustellen. Dazu nutzt er eine Zuordnungsvorschrift, in der für jeden Sollwert (w) ein bestimmtes Stellsignal (y) des Fernstellers festgelegt ist. Da dieses Stellverfahren mögliche Durchflussschwankungen nicht berücksichtigt, sollte eine Größe nur dann gesteuert werden, wenn sichergestellt ist, dass sie nicht durch Störungen in unzulänglicher Weise beeinflusst wird.





Rheinische Fachhochschule Köln
University of Applied Sciences

Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

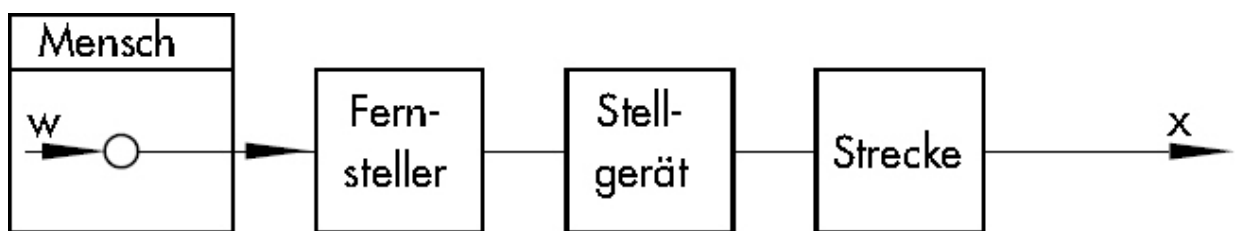
Der Bediener steuert über den Fernsteller die Prozessgröße p_2



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

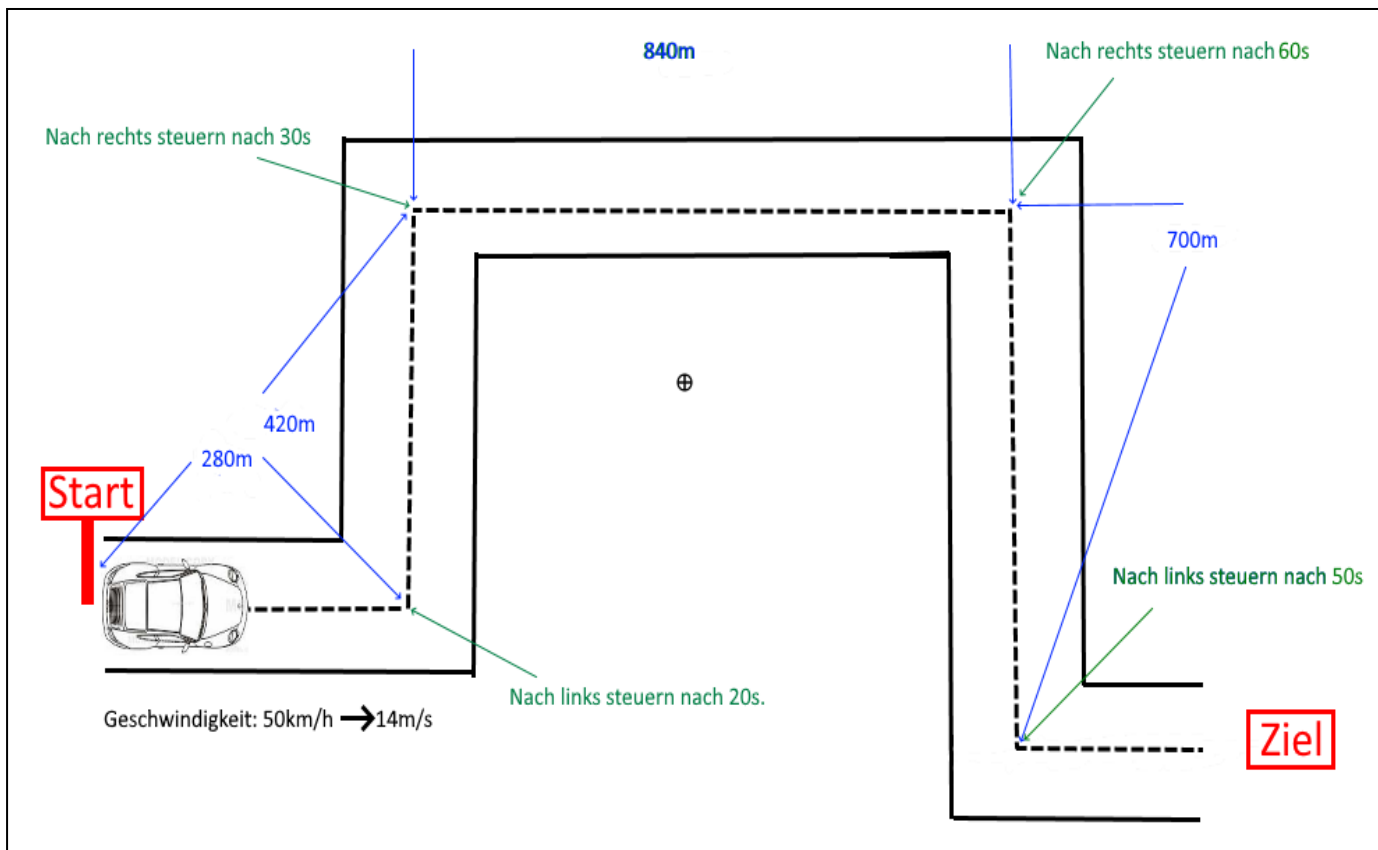
Kennzeichen einer Steuerung sind der:

- Offene Wirkungsablauf
- Störungen werden nicht erkannt



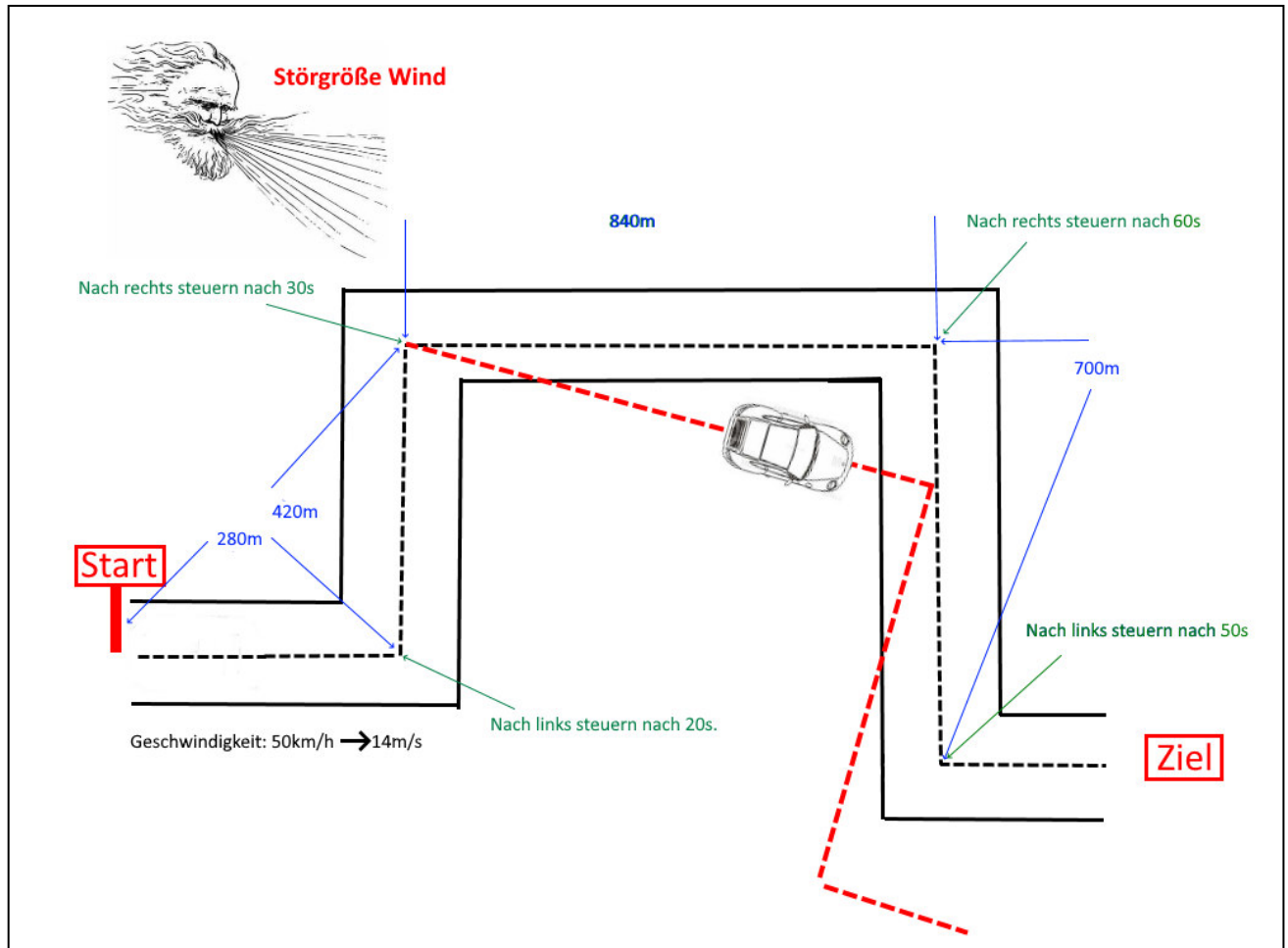
Blockschaltbild der Handsteuerung

Einfluss von Störgrößen





Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020





Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

9.1.2 Regeln

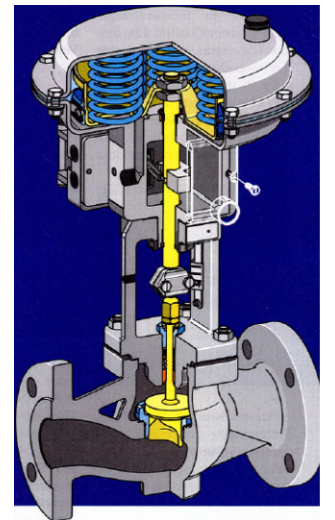
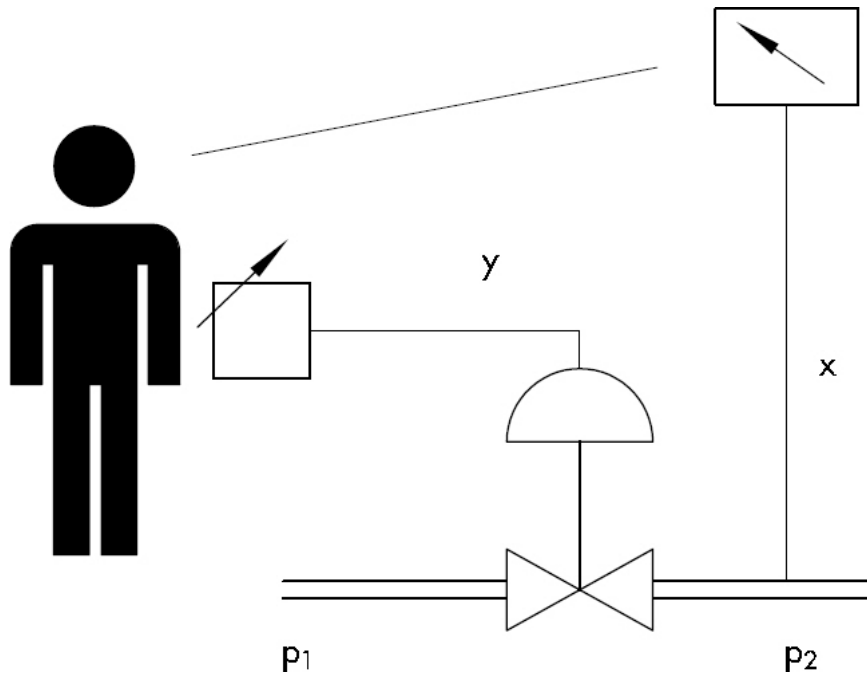
Bei einer Regelung wird die zu regelnde Größe (Regelgröße x) fortlaufend gemessen und mit einem vorgegebenen Wert (Führungsgröße w) verglichen. Besteht zwischen diesen beiden Größen eine Differenz (Regeldifferenz e bzw. Regelabweichung xw), so wird abhängig von der gemessenen Differenz ein Verstellvorgang eingeleitet, welcher die Regelgröße mit der Führungsgröße wieder in Übereinstimmung bringen soll. Kennzeichen der Regelung ist somit ein geschlossener Wirkungsablauf.

Der in Bild 2 dargestellte Bediener überwacht den Druck p_2 in der Rohrleitung, an der verschiedene Verbraucher angeschlossen sind. Erhöht sich der Verbrauch, so sinkt der Druck in der Leitung. Dies erkennt der Bediener, woraufhin er den Steuerdruck des pneumatischen Stellventils solange verändert, bis der gewünschte Druck p_2 wieder angezeigt wird. Durch die ununterbrochene Beobachtung der Druckanzeige und den unverzüglichen Regeleingriff sorgt der Bediener dafür, dass sich der Druck immer auf dem gewünschten Wert hält.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

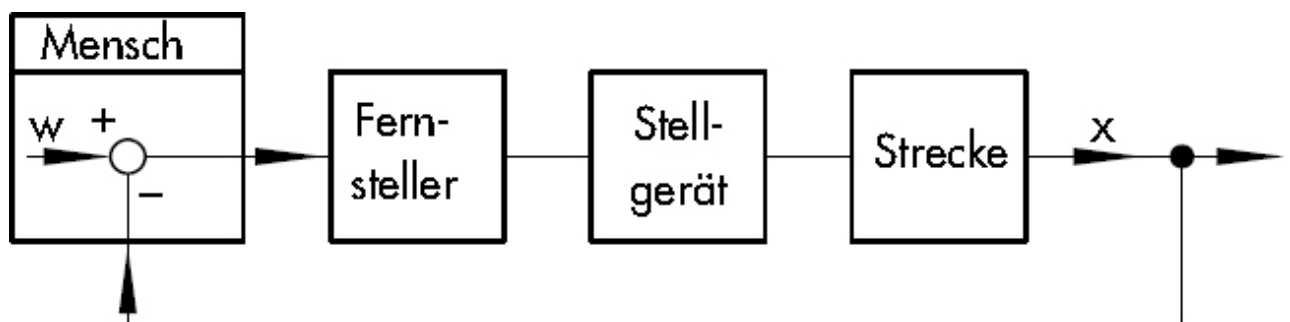
Aufgrund der Rückführung der Prozessgröße p_2 über die Druckanzeige zum Bediener liegt ein geschlossener Wirkungsablauf vor, das typische und notwendige Merkmal einer Regelung.



Der Bediener regelt die Prozessgröße p_2

Kennzeichen einer Regelung sind der:

- Geschlossene Wirkungsablauf
- Störungen werden ausgeregelt



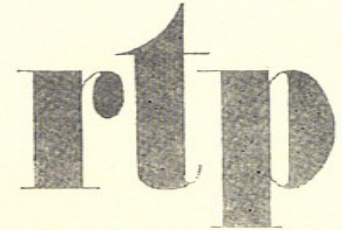
Blockschaltbild der Handregelung



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Regelungstechnische Praxis

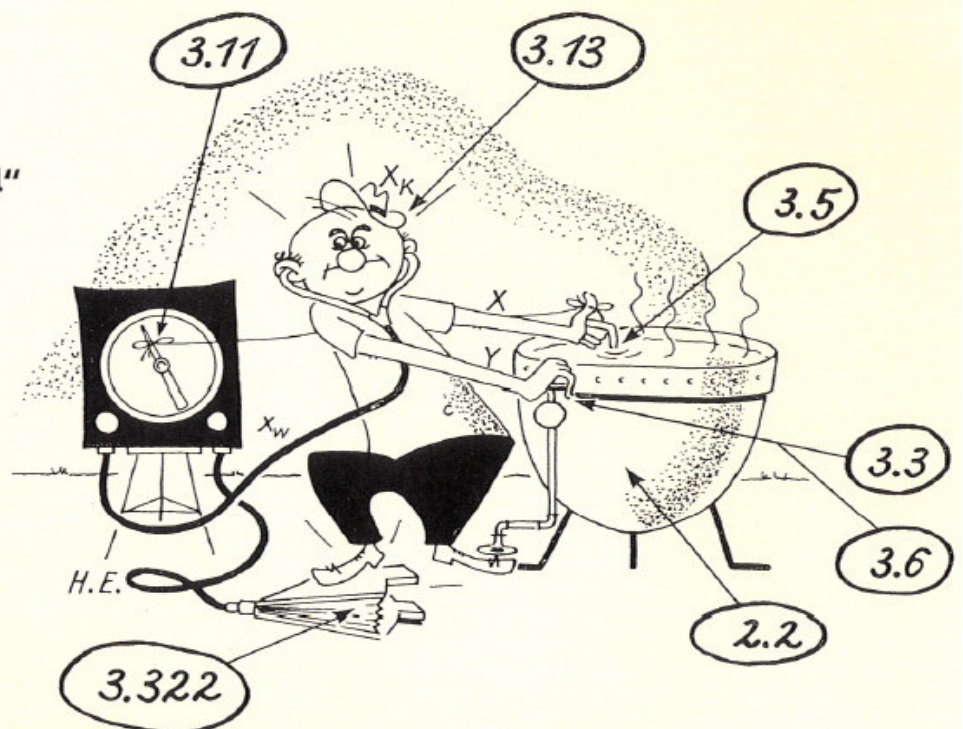
Steuern, Regeln
und Automatisieren im Betrieb



HEFT I SEITE 47-94 2. JAHRGANG 1960

Herausgegeben als Ergänzung zur Zeitschrift REGELUNGSTECHNIK im Verlag R. Oldenbourg, München

Der Regelkreis –
als „Blockschaltbild“
gemäß DIN 19226



X = Regelgröße (Istwert)
 x_w = Regelabweichung ($X_K - X$)
 Y = Stellgröße
H.E. = pneumatische Hilfsenergie.

- 2.2** Die Regelstrecke ist der Bereich einer Anlage, in welcher eine Größe durch die Regelung beeinflusst wird und dessen Zustandsänderungen für den Ablauf der Regelung maßgebend sind.
- 3.11** Der Istwert der Regelgröße ist der Wert, den diese Größe jeweils tatsächlich hat.
- 3.13** Der Sollwert X_K ist der am Sollwertesteller des Reglers eingestellte Betrag der Regelgröße.
- (3.3) (3.6)** ... Das Stellglied, das die Eigenschaft eines Stellers hat, stellt am Stellort den Stellstrom ein.
- 3.322** Beim Regler mit Hilfsenergie wird die zum Verstellen des Stellgliedes erforderliche Arbeit einer Hilfsenergiequelle entnommen.
- 3.5** Der Meßort ist die Stelle, an der der Wert der Regelgröße durch den Regler gemessen wird.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

9.1.3 Definition der Regelung: DIN 19 226

In der DIN 19 226 ist der Begriff der Regelung wie folgt definiert:

Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst..

Anmerkung: Im Englischen wird sowohl für .regeln. als auch für .steuern. der Begriff control. verwendet. Daher wird bei Übersetzungen nicht immer deutlich, ob ein Regel- und ein Steuervorgang beschrieben wird. Sind beide Aufgabenstellungen gemeint, übersetzt man .control häufig mit automatisieren oder leiten. (Leitwarte). Eine exakte Unterscheidung ist nur dann möglich, wenn Regelungen mit .closed loop control übersetzt werden.

9.1.4 Prozess

Ein Prozess ist eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, in dem Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder auch gespeichert wird. Durch geeignete Abgrenzungen können Teilprozesse oder umfassende Prozesse festgelegt werden.

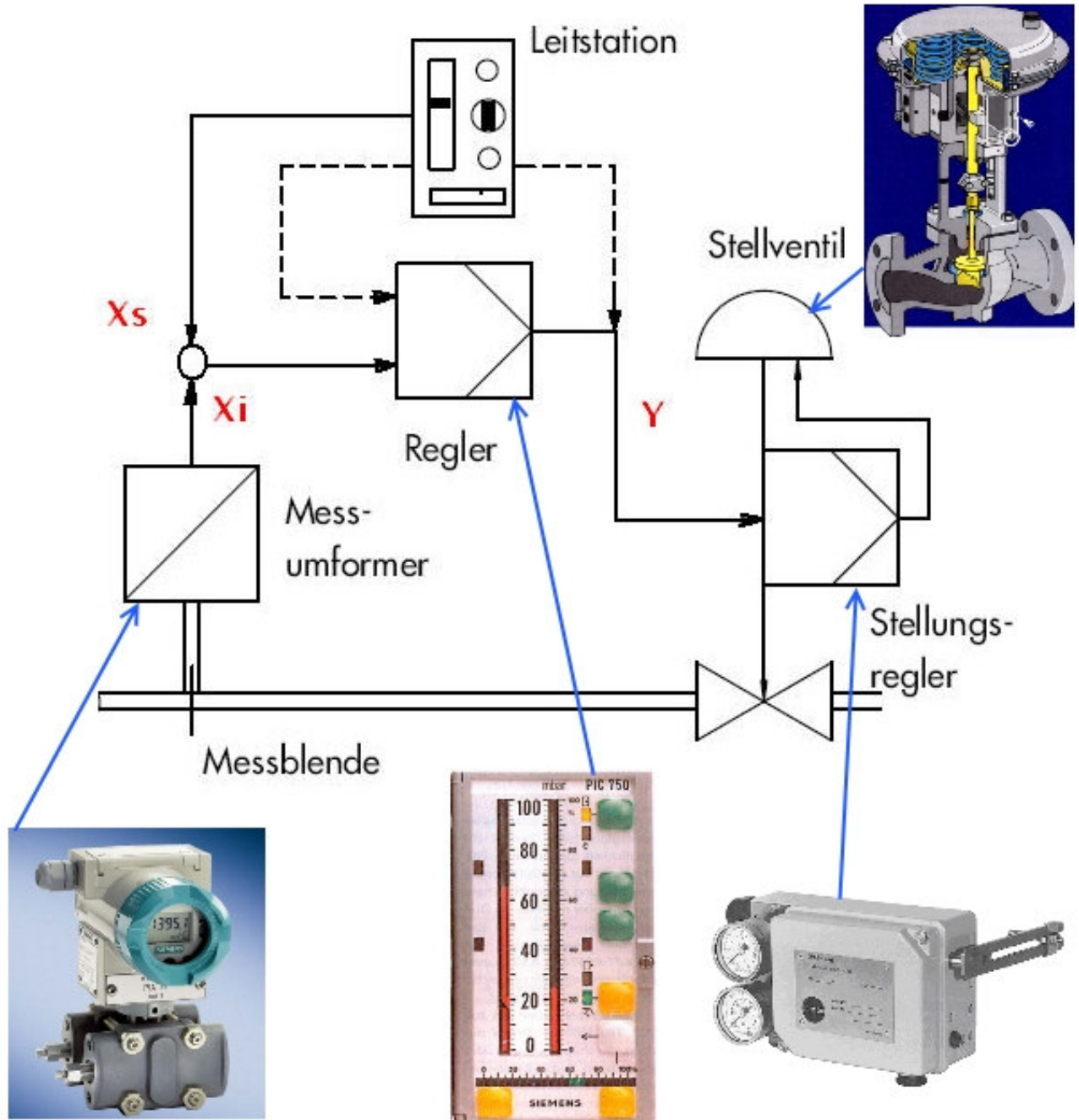
Beispiele:

- Erzeugung elektrischer Energie in einem Kraftwerk
- Verteilung von Energie in einem Gebäude
- Erzeugung von Roheisen in einem Hochofen
- Transport von Gütern



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

9.1.5 Der Regelkreis





Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Die Elemente eines Regelkreises werden entsprechend ihrer jeweiligen Teilaufgaben wie folgt unterschieden:

Komponenten des Regelkreises:

Regeleinrichtung	<i>Regler und Steller</i>
+ Strecke	<i>Stellglied sowie Pumpe, Rohrleitung etc.</i>
+ Messeinrichtung	<i>Temperatur-, Druckaufnehmer o.ä.</i>
= Regelkreis	

Die Elemente der Stelleinrichtung werden zum Teil der Regeleinrichtung und teilweise der Strecke zugeordnet.

Komponenten der Stelleinrichtung:

Steller	<i>(Teil der Regeleinrichtung)</i>	<i>Stellantrieb</i>
+ Stellglied	<i>(Teil der Strecke)</i>	<i>Drosselkörper</i>
= Stelleinrichtung		<i>Stellventil</i>

Diese Unterscheidung ergibt sich unmittelbar aus der Aufgabenverteilung: während der Steller das Reglerausgangssignal aufbereitet und verstärkt, greift das Stellglied . als Teil der zu regelnden Strecke . in den Massen- oder Energiestrom ein.

9.1.6 Abkürzungen regelungstechnischer Größen

Eine verkürzte Schreibweise ermöglicht die Festlegung von einheitlichen Formelzeichen. Die im deutschen Sprachraum verwendeten Zeichen der DIN 19221 entsprechen den internationalen Ausweichzeichen, die die Publikation IEC 27-2A zulässt.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Regelgröße, Istwert x

In einem Regelkreis wird diejenige Prozessgröße mit x bezeichnet, deren Zustand geregelt werden soll. In der Verfahrenstechnik ist dies zumeist ein physikalischer (z.B. Temperatur, Druck, Durchfluss) oder chemischer Zustand (z.B. pH-Wert, Härte usw.).

Führungsgröße, Sollwert w

Diese Größe gibt den Wert vor, den die zu regelnde Prozessgröße einnehmen soll (Sollwert). Ihr physikalischer Wert w in Form einer mechanischen oder elektrischen Größe (Kraft, Druck, Strom, Spannung etc.) w wird im geschlossenen Regelkreis mit der Regelgröße x verglichen.

Rückführungsgröße r

Die aus der Messung der Regelgröße hervorgegangene Größe, die zum Reglereingang auf das Vergleichsglied zurückgeführt wird.

Regeldifferenz $e = w - x$

Die Eingangsgröße e des Regelgliedes, ist die vom Vergleichsglied errechnete Differenz aus Führungsgröße und Regelgröße. Wird die Wirkung der Messeinrichtung mit berücksichtigt, muss mit $e = w - r$ gerechnet werden.

Regelabweichung $x_w = x - w$

Die Definitionsgleichung zeigt, dass die Regelabweichung denselben Betrag hat wie die Regeldifferenz e , jedoch das umgekehrte Vorzeichen. Wird die Messeinrichtung mit einbezogen, so gilt: $x_w = r - w$.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Stellgröße y

Die Stellgröße ist die Ausgangsgröße der Regeleinrichtung und Eingangsgröße der Regelstrecke. Sie wird vom Regler bzw. bei Verwendung eines Stellers vom Steller generiert. Sie ist abhängig von der Einstellung der Regelparameter sowie vom Wert der Regelabweichung.

Reglerausgangsgröße y_r

Wird die Regeleinrichtung in Regler und Steller aufgeteilt, dann bezeichnet y_r die Ausgangsgröße des Reglers bzw. die Eingangsgröße des Stellers.

Störgröße z

Störgrößen wirken auf den Regelkreis und beeinflussen die Regelgröße in unerwünschter Weise. Es ist eine Aufgabe der Regelung, diesen Einfluss zu kompensieren.

Stellbereich y_h

Innerhalb des Stellbereichs y_h kann die Stellgröße y vom Regler vorgegeben werden:

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$$

9.1.7 Symbole der Regelungstechnik

Jedem Gerät ist ein zumeist genormtes grafisches Symbol zugeordnet. Apparaturen, die aus verschiedenen Teilgeräten bestehen, werden häufig durch mehrere aneinandergefügte Symbole dargestellt.

Die folgenden Bildzeichen für Regler, Stellventile und Softwarefunktionen sind genormt nach DIN 19 227 Teil 2.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020



Hand-
Stellantrieb



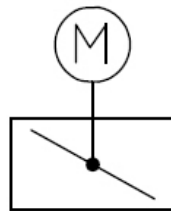
Membran-
Stellantrieb



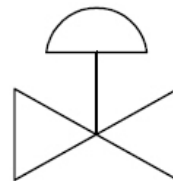
Motor-
Stellantrieb



Armatur



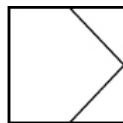
Klappe mit
Motorantrieb



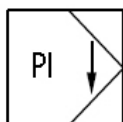
Armatur mit
Membrantrieb



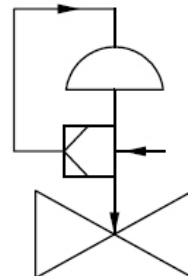
Regler
(altes Symbol)



Regler



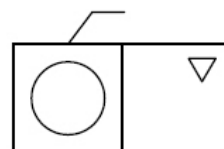
PI-Regler



Armatur mit
Membrantrieb
und angebautem
Stellungsregler



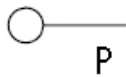
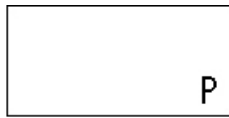
softwarerealisiertes
Radizierglied



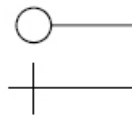
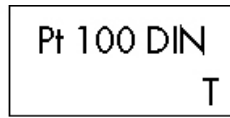
Softwarezähler mit
Grenzsinalgeber



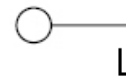
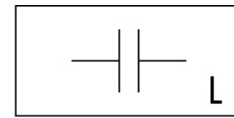
Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020



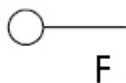
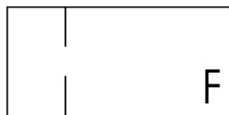
Messaufnehmer
für Druck



Messaufnehmer
für Temperatur



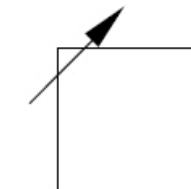
Messaufnehmer
für Stand



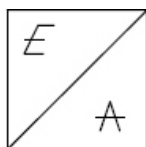
Messaufnehmer
für Durchfluss



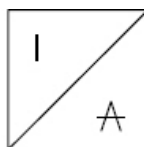
Analoganzeiger



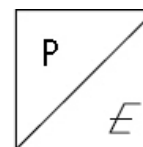
Einsteller



i/p-Umformer
elektrisches in
pneumatisches
Einheitssignal



Messumformer
für Strom mit
pneumatischem
Einheitssignalausgang

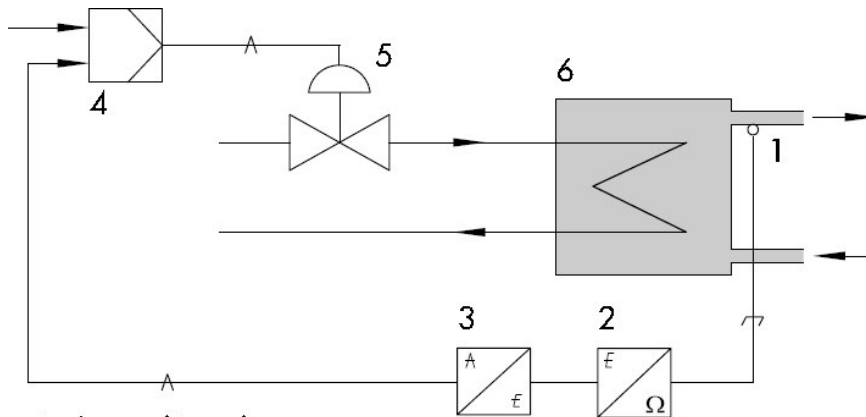


Messumformer
für Druck mit
elektrischem
Einheitssignalausgang



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

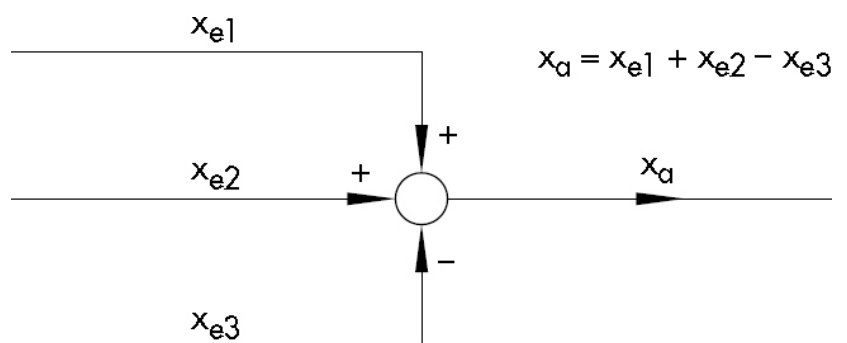
Beispiel: Grafische Symbole zur Beschreibung einer Temperaturregelung eines Wärmeaustauscher-Systems



- 1: Sensor (Temp.)
- 2: Messumformer
- 3: Signalumformer
- 4: Regler
- 5: pneumatisches Hubventil
- 6: Wärmeaustauscher

Additionsstelle:

Eine Additionsstelle beschreibt die algebraische Summe der Eingangssignale. Es können beliebig viele Eingänge auf einen Additionspunkt geführt werden, der durch einen offenen Kreis dargestellt wird. Die Eingänge werden entsprechend ihrem Vorzeichen addiert oder subtrahiert.

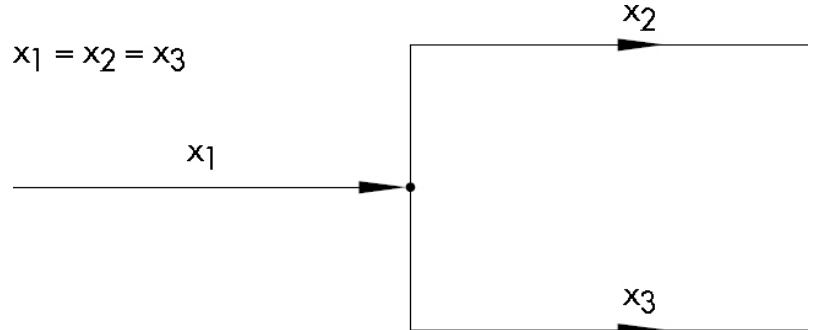




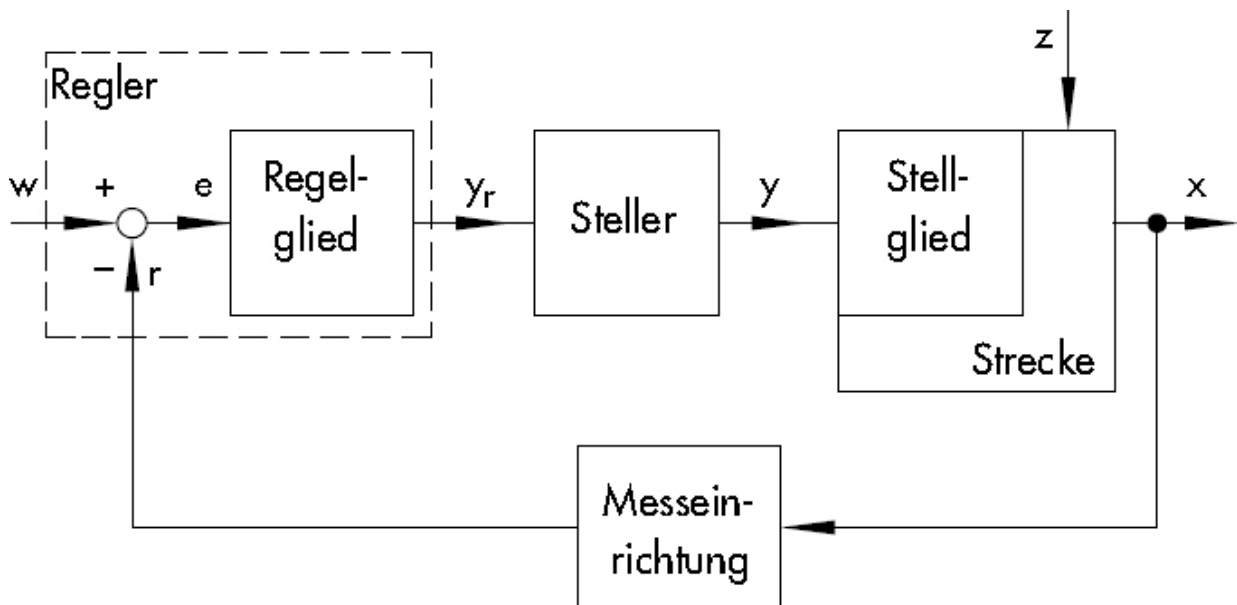
Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Verzweigungsstelle:

Ein Punkt bezeichnet eine Verzweigungsstelle. In ihr spaltet sich eine Wirkungslinie in zwei oder mehrere auf. Dabei wird das Signal unverändert weitergegeben.



Blockschaltbild eines Regelkreises:





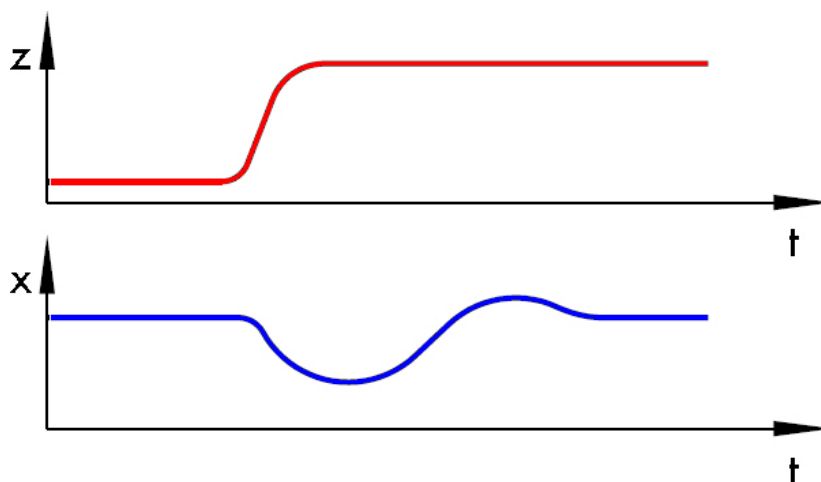
Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

9.2 Regelungsverfahren und -Strukturen

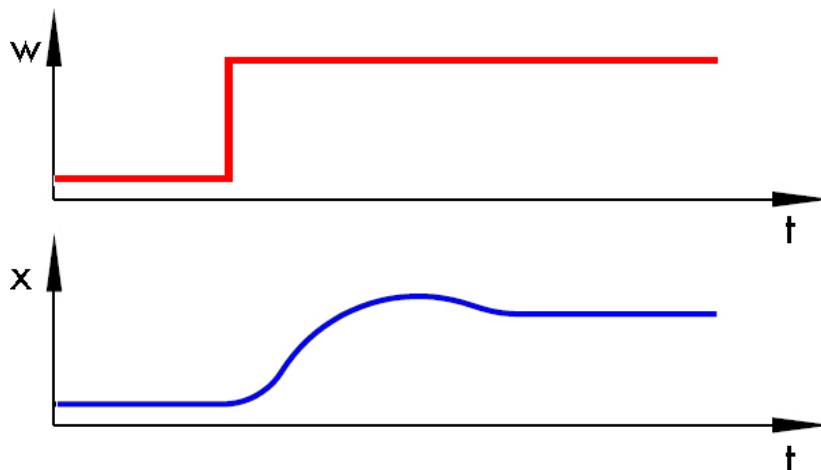
In der Praxis kommen ganz unterschiedliche Regelungsstrukturen zum Einsatz. Diese unterscheiden sich vor allem in der Art und Weise, wie für einen betrachteten Regelkreis die Führungsgröße w generiert wird.

Dies beeinflusst auch die Reglereinstellung, denn es ist regelungstechnisch ein Unterschied, ob sich in erster Linie die Führungsgröße des Regelkreises ändert oder ob vor allem Störgrößen auszuregeln sind.

Ein gutes **Störverhalten** ist dadurch gekennzeichnet, dass der Regler beim Auftreten einer Störung den ursprünglichen Gleichgewichtszustand sehr schnell wiederherstellt



Das **Führungsverhalten** wird danach beurteilt, wie schnell und exakt die Regelgröße einen neu vorgegebenen Sollwert erreicht.





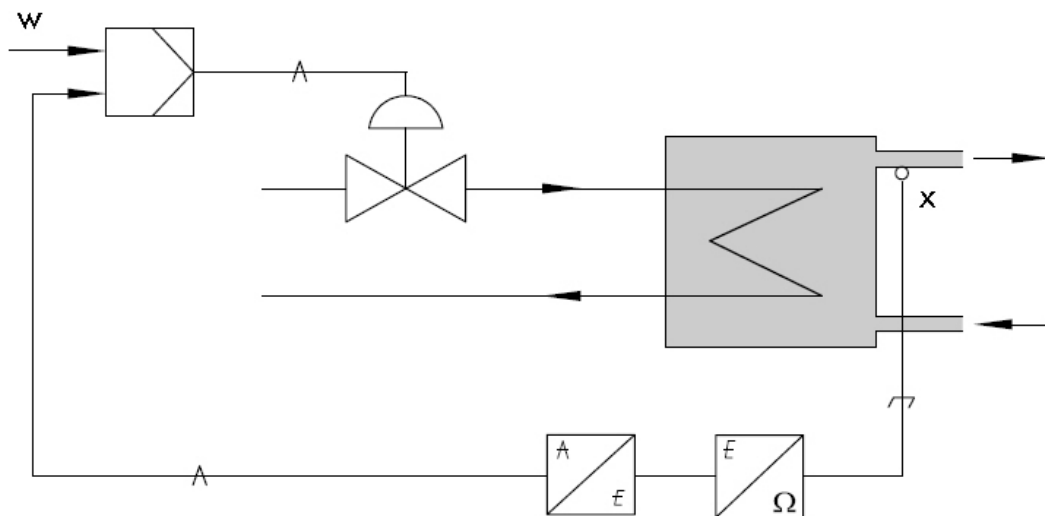
Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

10 Reglertypen

10.1 Festwertregelung

Bei der Festwertregelung wird für die Führungsgröße w ein konstanter Wert eingestellt. Festwertregler haben die Aufgabe Störungen auszuregulieren und werden dementsprechend auf ein gutes Störverhalten ausgelegt. Die Temperaturregelung aus der Abbildung dient als Beispiel für eine Festwertregelung.

Die Temperatur des aus dem Speicher fließenden Mediums soll durch die Regelung des Heizkreises konstant gehalten werden. Ein gutes Regelergebnis ist nur dann erreichbar, wenn im Heizkreis keine stärkeren, durch Störungen verursachte Druckschwankungen auftreten.



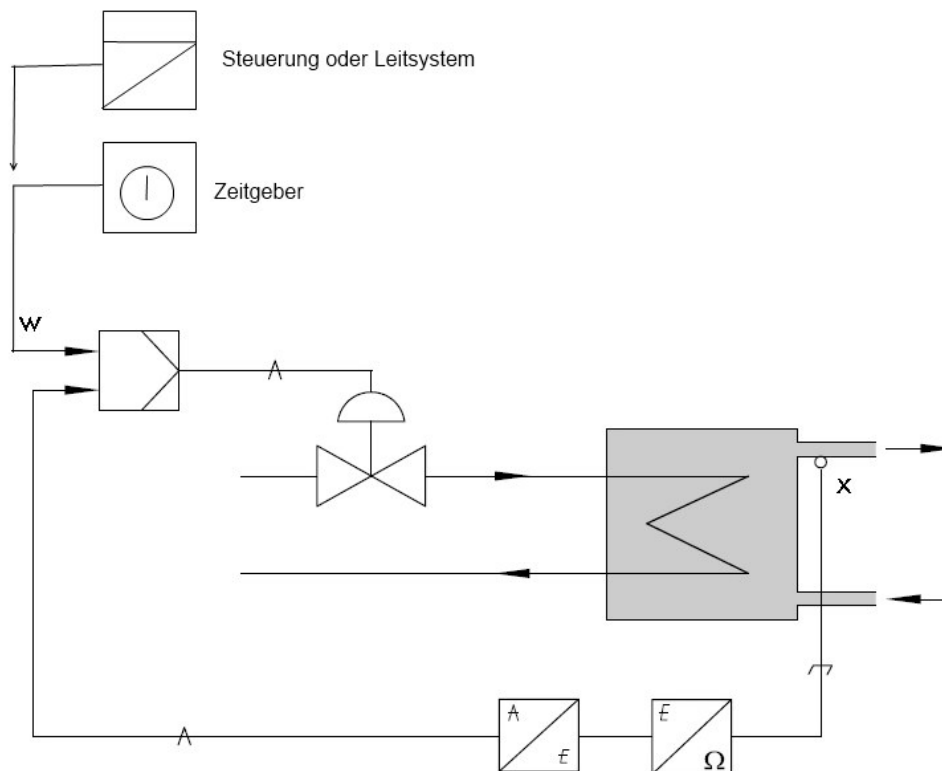
10.2 Folgeregler

Im Gegensatz zur Festwertregelung ist bei der Folgeregelung die Führungsgröße nicht konstant, sondern ändert sich mit der Zeit. Zumeist wird sie vom Anlagenbetreiber oder von externen Geräten vorgegeben. Eine schnell veränderliche Führungsgröße erfordert einen Regelkreis mit gutem Führungsverhalten.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Sind zudem größere Störungen auszuregulieren, muss auch das Störübertragungsverhalten bei der Reglerauslegung berücksichtigt werden. Folgeregler brauchen Gutes Führungsverhalten.



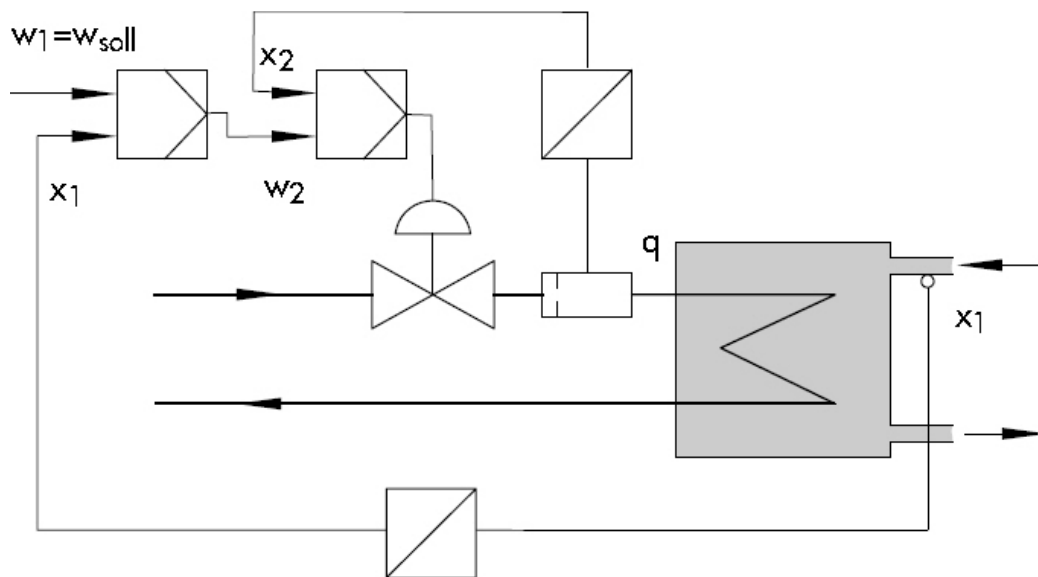
10.3 Kaskadenregelung

Eine Kaskadenregelung erfordert mindestens zwei Regler, den Führungs- und den Folgeregler. Charakteristisches Merkmal ist, dass die Ausgangsgröße des überlagerten Führungsreglers die Führungsgröße des Folgereglers ist.

Durch die Kaskadenregelung liefert die Temperaturregelung des Wärmeaustauschers (Bild) auch dann gute Ergebnisse, wenn am Heizkreis mehrere Verbraucher angeschlossen sind. Die entstehenden Druck- bzw. Durchflussschwankungen berücksichtigt der dem Temperaturregler unterlagerte Durchflussregelkreis (w_2 , x_2).

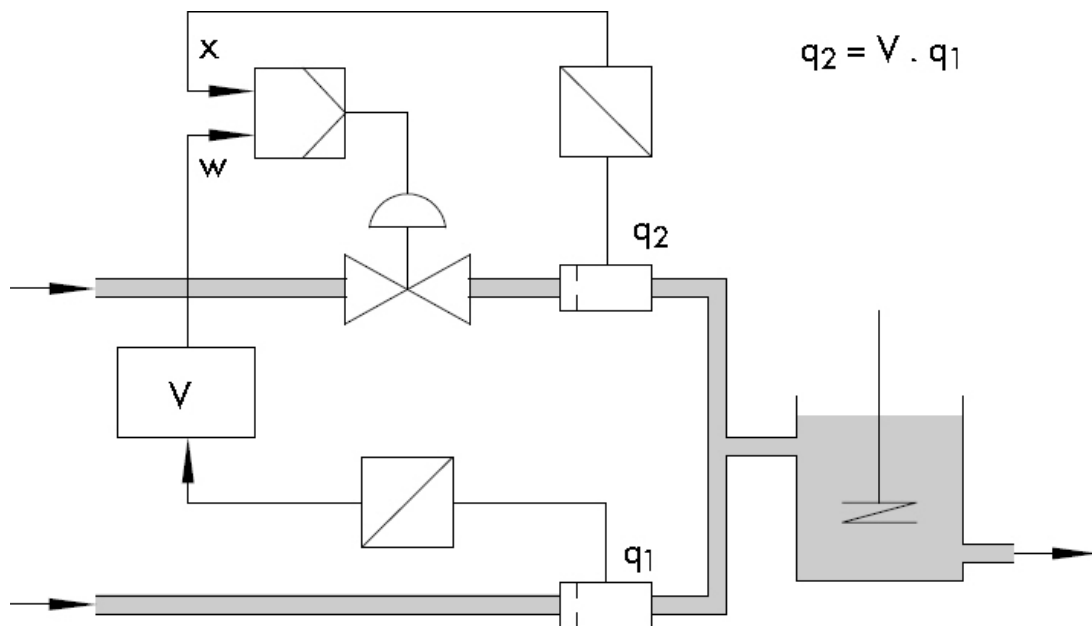


In diesem Beispiel sollte beim äußeren Regelkreis (w_1 , x_1) die Reglerauslegung vom Störverhalten bestimmt werden, der innere . unterlagerte . Regelkreis sollte ein gutes Führungsverhalten aufweisen.



10.4 Verhältnisregelung

Die Verhältnisregelung ist eine Sonderform der Folgeregelung. Sie dient dazu, das vorgegebene Verhältnis zweier Größen konstant zu halten. Dazu benötigt sie ein Rechenglied (V), dessen Eingangsgröße der gemessene Zustand der Prozessgröße 1 ist und dessen Ausgangsgröße den Regler der Prozessgröße 2 führt.



Bei dem dargestellten Mischer wird abhängig vom Volumenstrom q_1 eines Materials der Volumenstrom q_2 eines anderen Materials geregelt.

Verhältnisregelungen findet man auch sehr oft im Bereich von Gasbrennern. Die Aufgabe des Verhältnisreglers besteht in solchen Fällen darin, das richtige Gas-/Luftverhältnis zu regeln.

10.5 Fuzzy-Regler

Die Fuzzy-Regelung stellt heutzutage einen neuen wichtigen Zweig der Regelungstechnik dar. Die konventionellen Verfahren werden nicht verdrängt sondern, je nach Anwendungsbereich, wesentlich ergänzt. Die größten Erfolge im Bereich industrieller und kommerzieller Anwendungen von Fuzzy-Methoden erzielte bisher der Fuzzy-Regler.

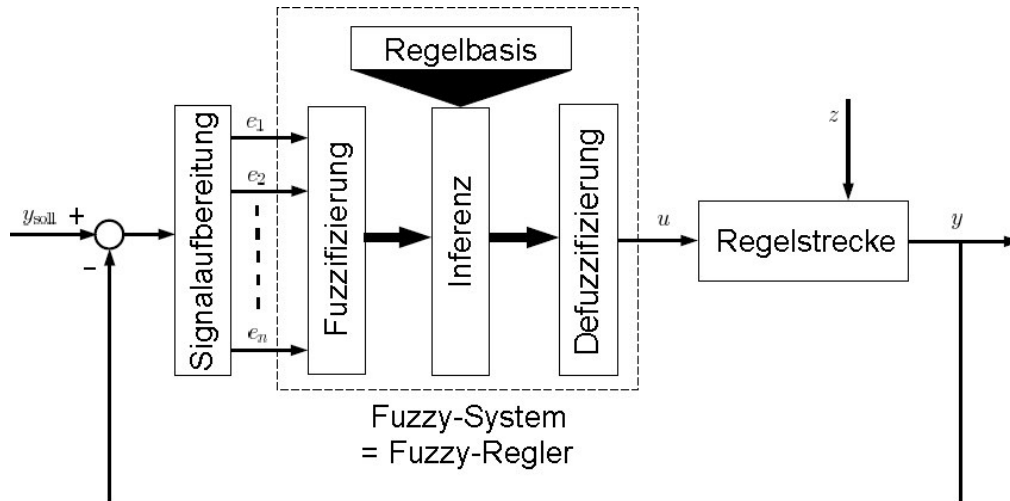


Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Fuzzy-Regler sind nichtlineare Regler. Durch geeignete Wahl von Zugehörigkeitsfunktionen und Aufstellen einer Regelbasis können Nichtlinearitäten in der Regelstrecke ausgeglichen werden. Zugehörigkeitsfunktionen sind mathematische Modelle für linguistische Terme, wie z.B. Dreiecksfunktion, Trapezfunktion oder Gaußfunktion.

Wie bei einem konventionellen Regler werden im Fuzzy-Regler Eingangsgrößen in Ausgangsgrößen umgewandelt, die dann auf den Prozess bzw. die Regelstrecke wirken. Mehrere Ein- und Ausgangsgrößen werden miteinander verknüpft, so dass komplexe Systeme leicht geregelt werden können. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen sind scharfe Werte in Form von Signalen. Die für Fuzzy-Methoden typische Unschärfe spielt nur innerhalb des Reglers eine Rolle. In einem Fuzzy-Regler werden drei Verarbeitungsschritte durchlaufen:

Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung. Der Entwurf eines Fuzzy-Reglers beinhaltet die Auswahl der Eingangs-/Ausgangsgrößen, die Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen und die Aufstellung der Regelbasis.





Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

10.6 Prädiktive Regler

Die Modellgestützte Prädiktive Regelung ist ein besonders gut für Mehrgrößen Systeme geeigneter Ansatz, bei dem unter Einbeziehen von Prozesswissen in Form eines Modells der Regelstrecke die gewichteten Abweichungen der Regelgrößen y innerhalb eines bestimmten Zeitfensters von einer vorgegebenen Trajektorie ¹⁾ w minimiert werden.

In der verfahrenstechnischen Industrie (z.B. Petrochemie) setzt sich die prädiktive Regelung verstärkt durch. Die Grundidee dieser Methoden ist, die Regelgröße nicht in der theoretisch kleinsten erreichbaren Zeit dem Sollwert gleichzustellen. Vielmehr wird bei der vorausschauenden Regelung, unter Inkaufnahme einer etwas langsameren Ausregelung, sowohl ein stabiler und ruhiger Prozesseingang (Stellsignal) als vor allem auch eine robuste (unempfindliche) Regelung erreicht. Hierbei können auch eventuelle Einschränkungen hinsichtlich des Stellsignals und anderer Nebenbedingungen problemlos berücksichtigt werden.

Prädiktive Regelungen eignen sich besonders für schwierige Prozesse, wie z.B. totzeitbehaftete Mehrgrößensysteme mit physikalischen Beschränkungen und Nichtlinearitäten.

Die herkömmlichen Regelungsalgorithmen, wie die PID-Regelung berechnen das Stellsignal (z.B. Ventilstellung) so, dass die Regelgröße (z.B. Temperatur) in kürzester Zeit dem Sollwert (der gewünschten Temperatur) angepasst wird. Die vermutlichen, zukünftigen Verläufe der repräsentierenden Prozessgrößen werden dabei nicht berücksichtigt.

Prädiktive Regelungsalgorithmen wurden mit der Simulationssprache Matlab/Simulink entwickelt und Simulationsbeispiele für Ein- und Mehrgrößenregelungen ausgearbeitet. Für die Industrieautomatisierung wurden prädiktive Regler in der graphischen Programmiersprache LabVIEW erstellt und können kostengünstig in einem PC-basierten System eingesetzt werden.

1) Mit **Trajektorie** wird in der Mathematik allgemein eine Bahnkurve bezeichnet, die sich beispielsweise als Lösung einer Differentialgleichung ergibt.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

11 Regelstrecken

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

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

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

Die Regelbarkeit der Strecken ist eine bestimmende Größe für eine erfolgreiche Lösung der regelungstechnischen Aufgabe. Hierzu muss unterschieden werden, ob sich nach einer Stellgrößenänderung oder einer Störung ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt oder ob sich die Regelgröße stetig verändert (steigt oder fällt):

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

Strecken ohne Ausgleich erfordern zwingend eine Regelung, denn die Stellgröße des Reglers muss zurückgenommen bzw. zu null werden, sobald die Regelgröße den geforderten Gleichgewichtszustand erreicht hat. Nur mit der Rückführung des geschlossenen Wirkungskreises erreicht man dies zum richtigen Zeitpunkt und im rechten Maß.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

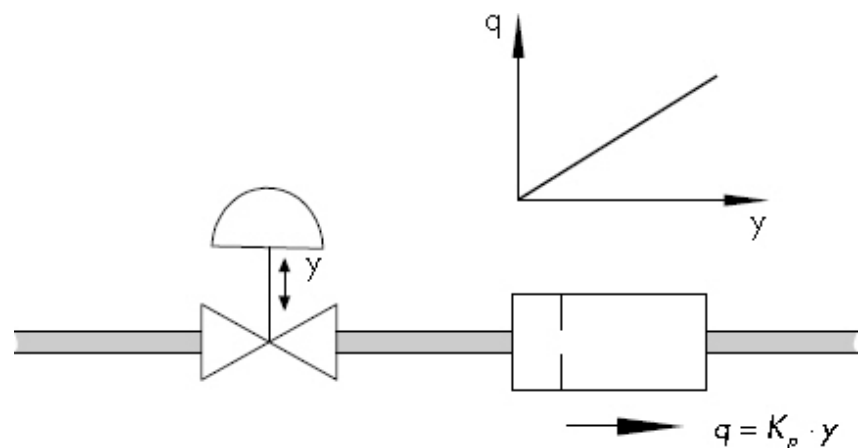
Die Praxis zeigt, dass sich Strecken ohne Ausgleich häufig schwieriger regeln lassen, da sie zum Schwingen bzw. zu Instabilitäten neigen. Umso wichtiger ist hier die gut angepasste Reglereinstellung.

11.1 P-Regelstrecke

Bei Regelstrecken mit Proportionalverhalten ändert sich die Regelgröße x proportional mit der Stellgröße y . Dabei folgt die Regelgröße der Stellgröße ohne die geringste Verzögerung. Der Proportionalitätsfaktor wird als K_p abgekürzt und häufig leider nicht immer richtig als Streckenverstärkung bezeichnet.

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

- Beispiel: Durchflussregelung

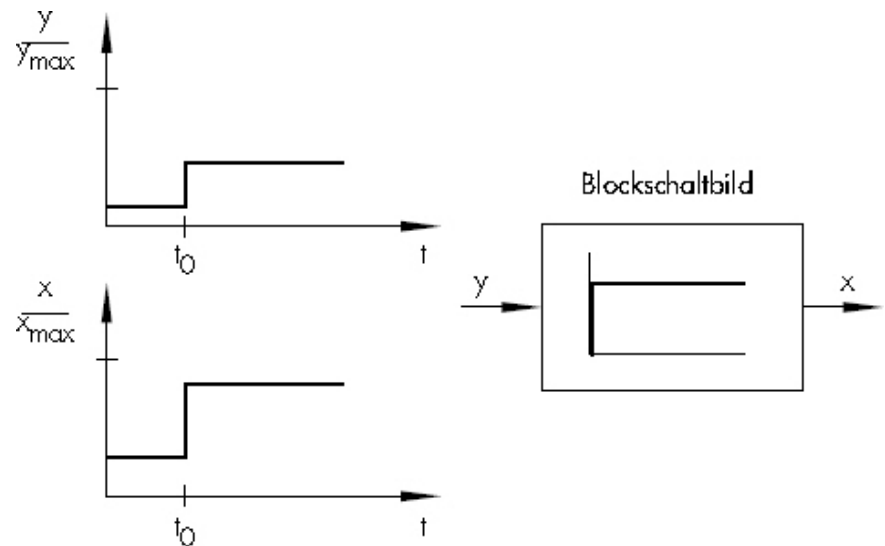


Verändert man bei der Druckregelstrecke den Ventilhub, so stellt sich (fast) sofort ein neuer Durchfluss q ein. Bei entsprechender Ventilkennlinie verläuft die Regelgröße proportional zur Stellgröße: Die Strecke hat dann ein proportionales Verhalten.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

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



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

11.2 I-Regelstrecke

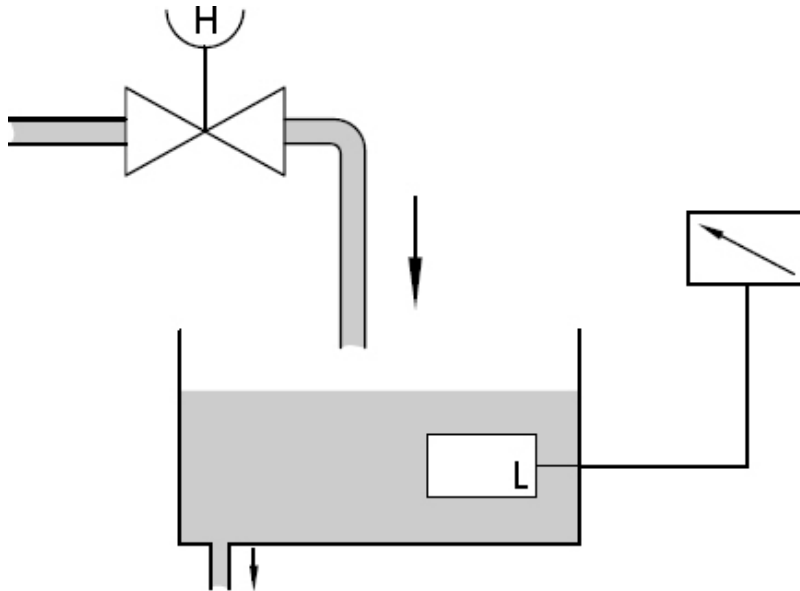
Eine integrale Regelstrecke ist eine Strecke ohne Ausgleich. Ist die Stellgröße ungleich null, nimmt die integrale Strecke keinen Gleichgewichtszustand ein.

Sie antwortet mit einer fortwährenden Änderung . stetigem Steigen oder Fallen . der Regelgröße.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Beispiel: Füllstandsregelung



Integrale Regelstrecke, Regelgröße: Füllstand

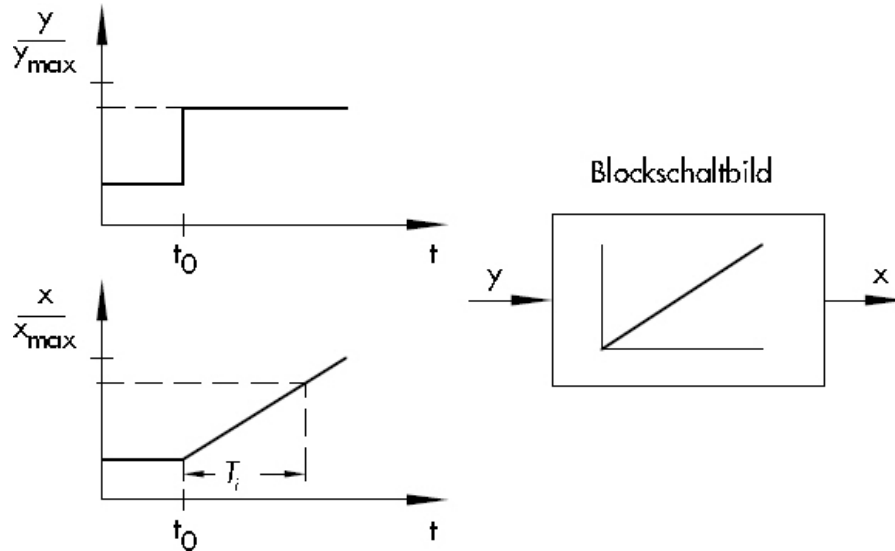
Bei einem Behälter mit Abfluss, dessen Zu- und Ablaufvolumenstrom gleich groß sind, stellt sich eine konstante Füllhöhe ein. Verändert sich der Durchfluss des Zu- oder Ablaufs, steigt oder fällt der Flüssigkeitsspiegel. Dabei verändert sich der Pegel umso schneller, je größer die Differenz zwischen Zu-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

Das Beispiel lässt erkennen, dass das Integralverhalten in der Praxis zumeist eine Begrenzung hat. Die Regelgröße steigt oder fällt nur so lange, bis sie einen systembedingten Grenzwert erreicht: Behälter läuft über oder leer, Druck erreicht Anlagenmaximum oder Minimum etc. Bild 4 zeigt das zeitliche Verhalten einer I-Strecke bei einer sprunghaften Änderung der Eingangsgröße sowie das daraus abgeleitete Blockschaltbildsymbol für integrales Verhalten. Die Integrierzeit T_i dient als Maß für das Integralverhalten und steht für die Anstiegsgeschwindigkeit der Regelgröße.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Eine kleine Integrierzeit bewirkt eine hohe Anstiegsgeschwindigkeit.

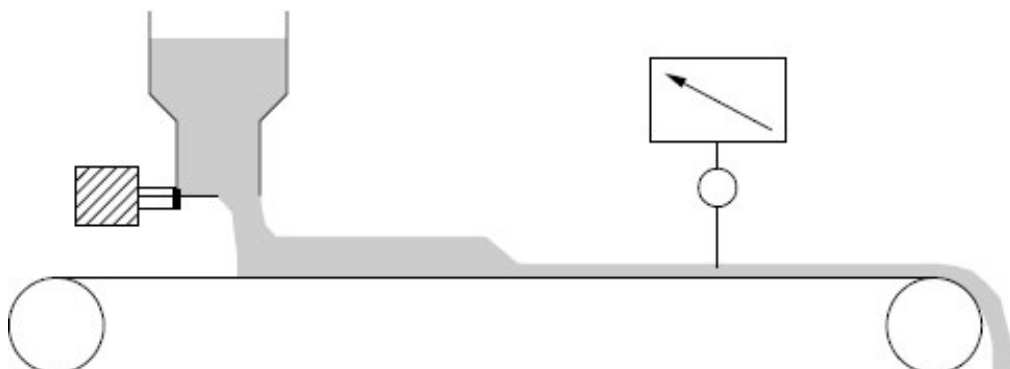


Zeitverhalten einer I-Regelstrecke (y : Ventilhub, x : Füllstandshöhe eines Behälters)

11.3 Regelstrecke mit Totzeit

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

Beispiel: Fördermengenverstellung beim Transportband



Regelstrecke mit Totzeit; Regelgröße: Transportvolumen



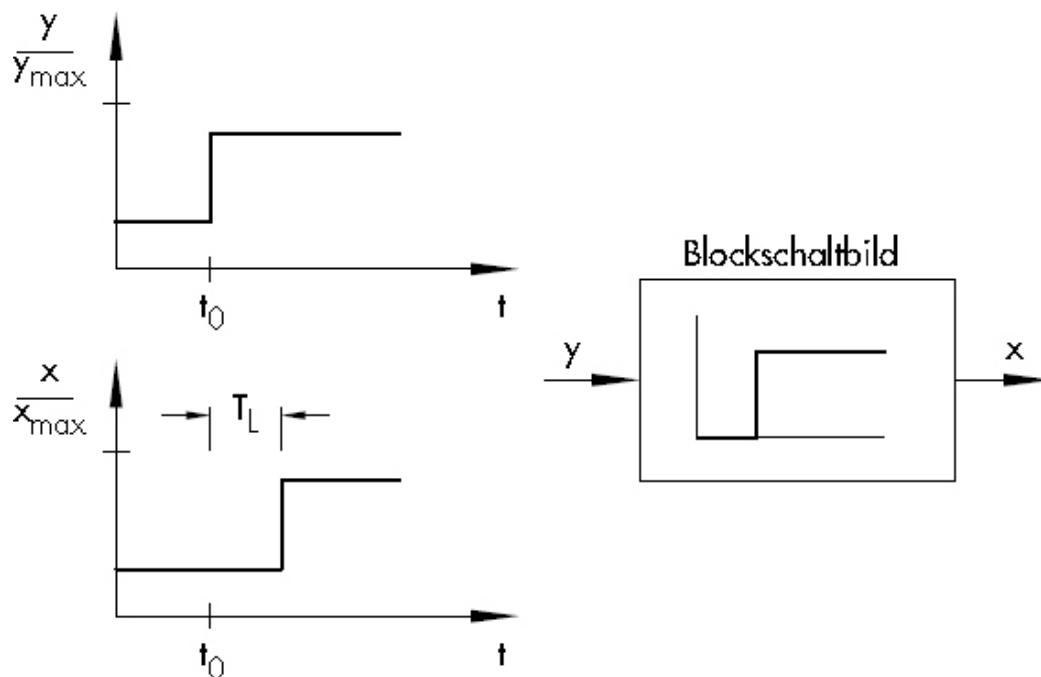
Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

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

Druckregelungen in langen Gasleitungen verhalten sich in ähnlicher Weise. Da das Medium kompressibel ist, dauert es eine Zeit, bis sich am Ende der Rohrleitung der neue Druckzustand einstellt. Häufig entstehen Totzeiten durch diverse Stellglieder im Regelkreis. Diese werden z. B. durch die Schaltzeiten von Schützen oder ein Spiel in einer Getriebeübersetzung hervorgerufen.

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

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



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



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

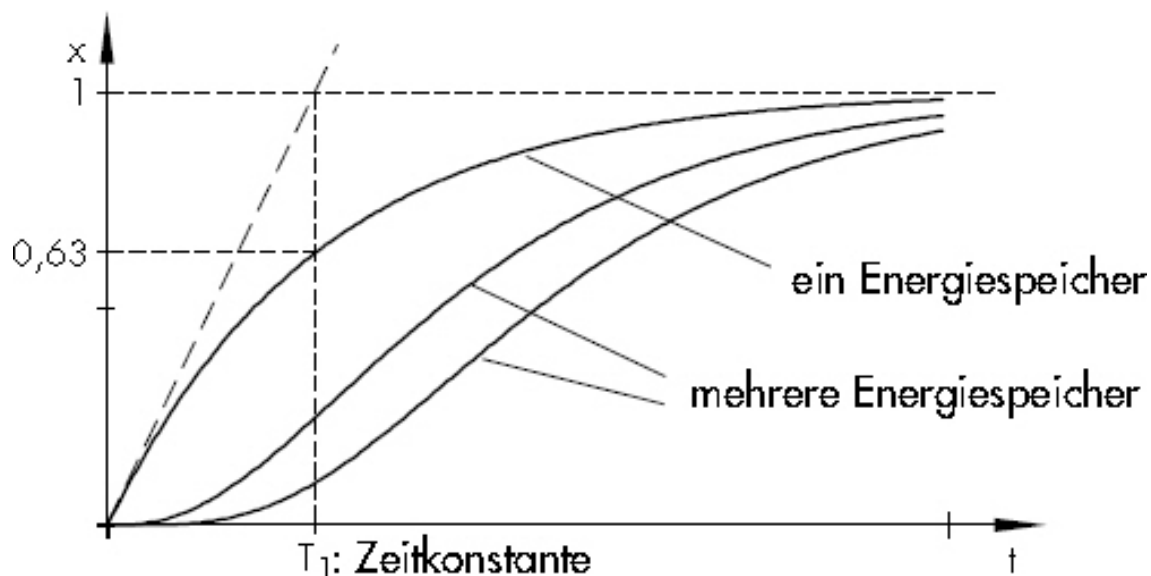
11.4 Regelstrecke mit Energiespeichern

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

Beispiel: Raumtemperaturregelung

Eine Heizungsanlage stellt eine Strecke mit vielen Energiespeichern dar: Heizkessel, Wasser, Heizkörper, Raumluft, Wände usw. Wenn man die Energiezufuhr des Heizkessels verändert oder in dem beheizten Raum das Heizkörperabsperrentil betätigt, ändert sich die Raumtemperatur nur allmählich bis zum Erreichen eines neuen Endwertes.

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



Exponentialfunktionen beschreiben Strecken mit Energiespeichern



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

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

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

Beispiel: Raumtemperaturregelung

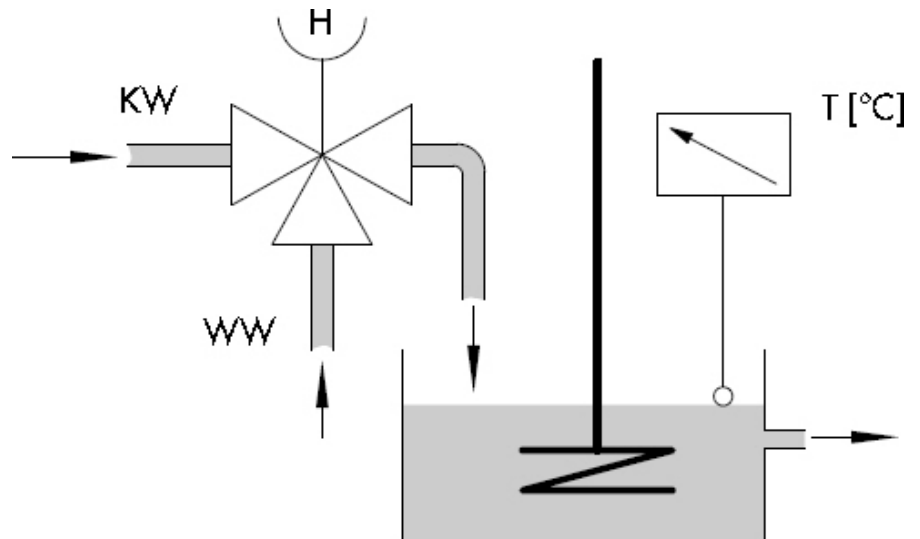
Das dynamische Verhalten einer Raumtemperaturregelung wird maßgeblich von der Brennerleistung, der Kessel-, Raum- und Heizkörpergröße bestimmt und ist nur in geringem Maß von der Wärmekapazität der Heizungsrohre abhängig. Strecken mit Energiespeichern unterscheidet man nach der Anzahl ihrer wirksamen Verzögerungen. So enthält eine Strecke 1. Ordnung einen zeitbestimmenden Energiespeicher, eine Strecke 2. Ordnung zwei Energiespeicher usw. Zeigt eine Strecke keine verzögernde Wirkung, so wird sie auch als Strecke nullter Ordnung bezeichnet (vgl. P-Strecke). Ein flüssigkeitsgefülltes Drucksystem, das keinerlei Ausgleichsgefäße enthält, kommt solch einem Verhalten nahe.



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

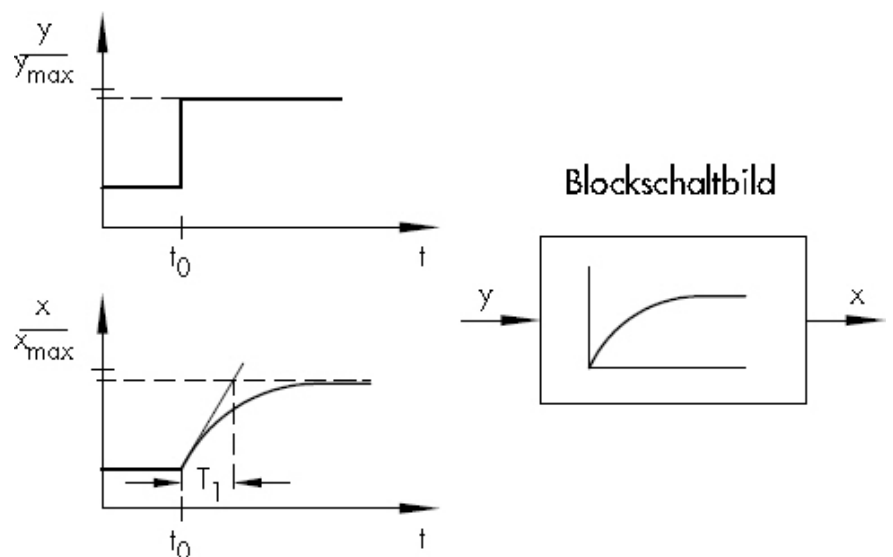
11.4.1 Verzögerung 1. Ordnung

Eine Strecke 1. Ordnung mit nur einem zeitbestimmenden Energiespeicher skizziert das folgende Bild:



Regelstrecke 1. Ordnung;
Regelgröße: Temperatur

Die Temperatur einer Flüssigkeit in einem Behälter mit Zufluss, Abfluss und Rührwerk wird über ein Mischventil eingestellt. Aufgrund des großen Behältervolumens ändert sich die Temperatur nach einer sprunghaften Ventilverstellung erst allmählich.

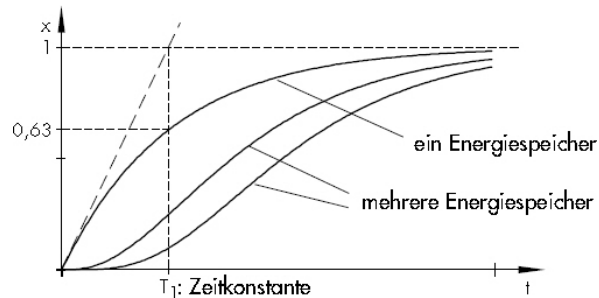


*Zeitverhalten einer Regelstrecke 1. Ordnung: PT1-Glied
(y: Ventilstellung, x: Temperatur der Behälterflüssigkeit)*



Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Das zeitliche Verhalten dieser Strecke 1. Ordnung zeigt das vorherige Bild. Als Maß für die Verzögerungswirkung dient die Zeitkonstante T_1 . Sie gibt an, wann die Regelgröße x nach einem Eingangssprung 63 % ihres späteren Endwertes erreicht.



Der zugehörige Funktionsverlauf ergibt sich aus:

$$x(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_1}}$$

Man bezeichnet ein solches verzögertes Proportionalverhalten erster Ordnung auch als PT1-Verhalten. Je größer die Zeitkonstante T_1 ist, umso langsamer ändert sich die Regelgröße und umso größer ist der Energiespeicher, der diese Verzögerung hervorruft.

Wenn das Zeitverhalten einer Strecke nur als Messkurve vorliegt, lässt sich T_1 mit Hilfe einer Tangente auf einfache Weise grafisch ermitteln.

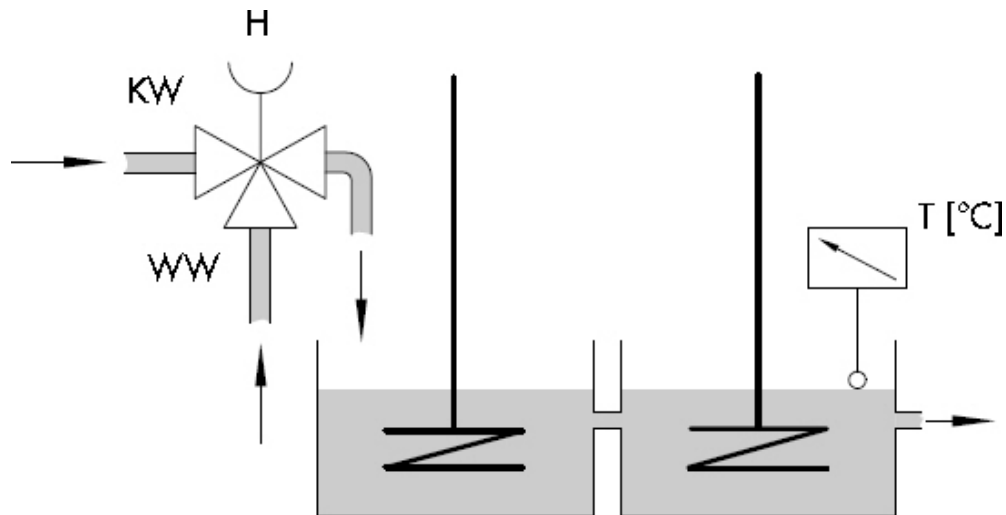
11.4.2 Verzögerungen 2. und höherer Ordnung

Liegen zwischen der Stellgröße und der Regelgröße zwei oder mehr Energiespeicher, spricht man von einer Regelstrecke 2. oder höherer Ordnung (auch PT2-, PT3-Strecke usw. genannt). Durch die Hintereinanderschaltung von zwei Strecken 1. Ordnung entsteht, wie im folgenden Bild dargestellt, eine Strecke 2. Ordnung.

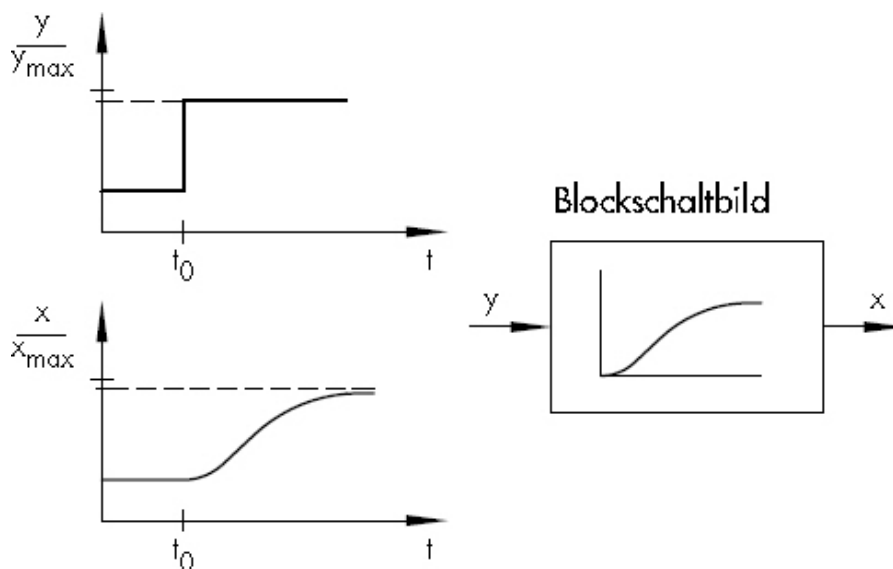


Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

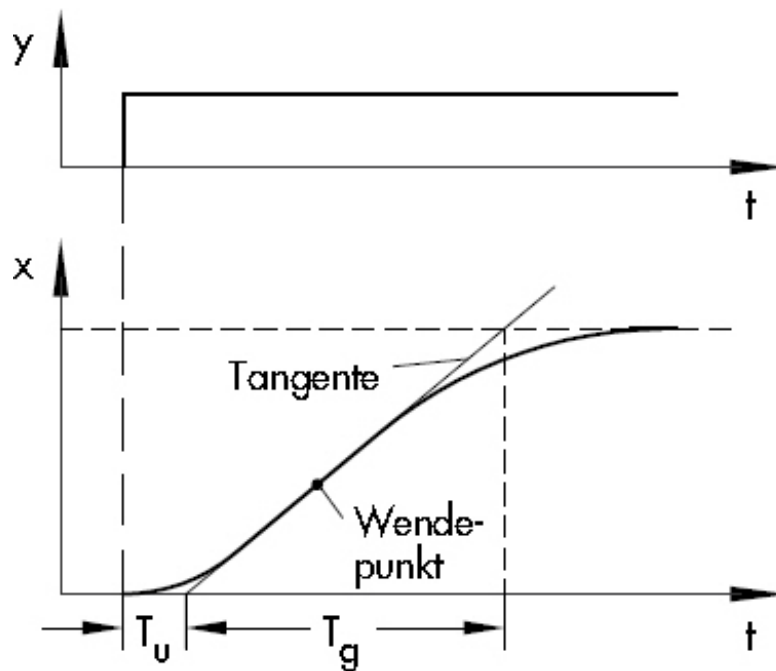
Strecke n-ter Ordnung hat PTn-Verhalten



Regelstrecke 2. Ordnung; Regelgröße: Temperatur

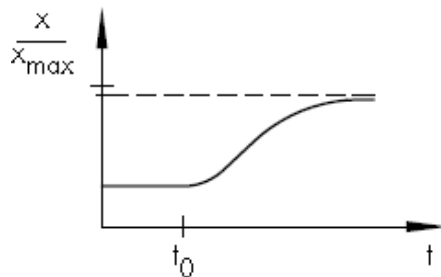


Zeitverhalten einer Regelstrecke 2. oder höherer Ordnung
(y: Ventilstellung, x: Temperatur des Mediums im zweiten Behälter)



Sprungantwort einer Regelstrecke höherer Ordnung mit den charakteristischen Werten T_u und T_g

Das Zeitverhalten einer solchen Regelstrecke geben die Kennlinien wieder.



Die Sprungantwort der Regelgröße zeigt einen für Strecken höherer Ordnung charakteristischen Wendepunkt. Die Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße nimmt bis zum Wendepunkt zunächst zu, um anschließend kontinuierlich abzunehmen (vergleiche das Verhalten der Strecke 1. Ordnung). Mathematisch wird das Übertragungsverhalten einer Strecke höherer Ordnung durch die Zeitkonstanten T_1 , T_2 usw. der Einzelsysteme beschrieben.



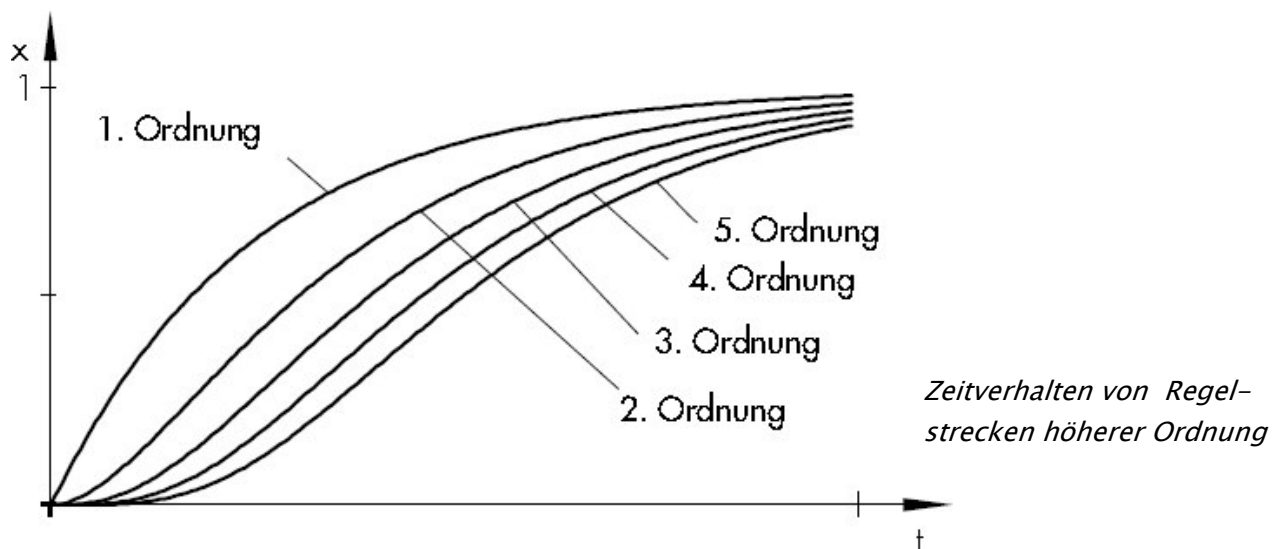
Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

Die Kennlinie für die Sprungantwort ergibt sich dann aus:

$$x(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$$

Mit jedem weiteren Energiespeicher erhöht sich die Ordnung einer Strecke. Die Sprungantworten zeigen deutlich, dass damit gleichzeitig die zeitverzögernde Wirkung der Strecke steigt. Zur vereinfachten Charakterisierung dieses Verhaltens definiert man mit Hilfe der Wendepunkt-Tangenten die Verzugszeit T_u und die Ausgleichszeit T_g .

Da die Verzugszeit wie eine Totzeit wirkt, lässt sich eine Strecke schlechter regeln, deren T_u in die Größenordnung der Ausgleichszeit T_g kommt. Die Regelbarkeit verbessert sich hingegen, wenn die Zeitkonstanten im Vergleich zur erforderlichen Einschwingzeit des Regelkreises möglichst klein sind. Auch stark unterschiedliche Zeitkonstanten (Faktor 10 oder größer) vereinfachen die Reglerabstimmung, da sich diese dann auf den größten, den zeitbestimmenden Wert konzentrieren kann. Bei der Auslegung der Regelkreise, möglichst schon beim Entwurf der Anlage, sollten diese Zusammenhänge berücksichtigt werden.





Ingenieurwesen II	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)	Dipl.-Ing. (FH) M. Trier
Prozesstechnik (BP II)	Regelungstechnik/ Grundlagen	30.08.2020

11.5 Regelbarkeit einer Strecke mit Ausgleich

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

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

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

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