

# Vorlesung Regelungstechnik

für BiotechnologInnen / VerfahrenstechnikerInnen  
 HS Furtwangen, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
 Prof. Dr. Stefan von Weber  
 Version Oktober 2008

<b>Regelungstechnik</b>	<b>Control Technique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>0. Einführung (Beispiel Destille)</li> <li>1. RI-Diagramme ( Kennbuchstaben, Symbole, Beispiele)</li> <li>2. Einführung in die Steuerung (Ablaufsteuerung, Graphen, Befehle)</li> <li>3. Einführung in die Regelung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1. Regelkreis (Blockschaltbild, Regelstrecke, Regler, Rückführung)</li> <li>3.2. 2-Punkt-Regler, Hysterese</li> <li>3.3. 3-Punkt-Regler, Toleranzbereich</li> <li>3.4. Regelschaltungen ( Einfachregelkreis, Aufschaltung, Kaskade, Mehrgrößenregelung)</li> <li>3.5. Regelaufgaben</li> </ul> </li> <li>4. Bauteile eines Regelkreises                             <ul style="list-style-type: none"> <li>4.1. Messwerterfassung ( Sensoren, Messumformer, Bus, Trennverstärker)</li> <li>4.2. Messwertaufzeichnung</li> <li>4.3. Signalverarbeitung ( Regler, <math>\mu</math>-Controller, SPS (speicherprogrammierte Steuerung), PC)</li> <li>4.4. Aktoren ( Ventil, Klappe, Motor, Pumpe, Verdichter, Stellungsregler, S- und K-Algorithmus)</li> <li>4.5. Regelstrecken ( 4 Grundtypen PT1, PTn, I, Itn)</li> </ul> </li> <li>5. Steuerung mit SPS                             <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1. Einführung (Aufbau, Programmverarbeitung)</li> <li>5.2. FUP-Programmierung (Logik, Flipflop, Timer, Taktkette, Melde-, Ausgabeteil, OB1)</li> <li>5.3. Impuls, Zähler, Betriebsartenteil</li> </ul> </li> <li>6. Übertragungsglieder (Laplace-Transformation, Übertragungsfunktion, Ortskurve, Bode-Diagramm)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>6.1. P-Glied (Verstärkung, Linearisierung)</li> <li>6.2. PT1-Glied (DGL, Antwort, Identifikation)                                      DT1-Glied (DGL, Antwort, Identifikation)                                      I-Glied (DGL, Antwort, Identifikation)</li> <li>6.3. Zusammengesetzte Übertragungsglieder                                      PTn-Glied (DGL, Antwort, Identifikation)                                      ITn-Glied (DGL, Antwort, Identifikation)</li> </ul> </li> <li>7. Kontinuierliche Regler                             <ul style="list-style-type: none"> <li>7.1. P-Regler(Regelabweichung, Proportionalbereich)</li> <li>7.2. PID-Regler, PIDT1-Regler (DGL, Parameter)</li> <li>7.3. Reglerauswahl, -einstellung (Ziegler-Nichols, Chien u.a.)</li> </ul> </li> </ul> <p>Anhang, Übungsblätter 1 + 2, Dictionary</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>0. Introduction</li> <li>1. RI-flow sheets ( call letters, symbols, examples)</li> <li>2. Introduction to forward control ( sequencing Control, graphs, instructions)</li> <li>3. Introduction to feedback control                             <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1. Closed control loop (block diagram, controlled member, controllers, feedback)</li> <li>3.2. Two-position controller, hysteresis</li> <li>3.3. Three-position controller, tolerance band</li> <li>3.4. Control circuits (Simple closed loop, feedforward Control, cascade, multivariable control)</li> <li>3.5. Control functions</li> </ul> </li> <li>4. Components of a closed control loop                             <ul style="list-style-type: none"> <li>4.1. Data acquisition (sensors, measuring transformers, bus, isolation-mode rejection)</li> <li>4.2. Data recording</li> <li>4.3. Signal processing (Controllers, <math>\mu</math>-controllers, SPC (store programable control), PC)</li> <li>4.4. Actuators (valve, flap, motor, pump, compressor, position controller, step controller, continuous c. )</li> <li>4.5. Controlled members (4 basic types PT1, PTn, ..)</li> </ul> </li> <li>5. Control with SPC                             <ul style="list-style-type: none"> <li>5.1. Introduction (construction, program flow)</li> <li>5.2. Function-diagram program. (Logic, Flipflop, timer, sequence cascade, two other modules) Impulse, Counters, run modes module)</li> </ul> </li> <li>6. Transfer elements (Laplace transformation, transfer function, Nyquist-diagram, Bode-diagram )                             <ul style="list-style-type: none"> <li>6.1. P-member ( gain coefficient, linearisation)</li> <li>6.2. PT1-member ( DE, response, identification)                                      DT1-member ( DE, response, identification)                                      I-member ( DE, response, identification)</li> <li>6.3. Composite transfer elements                                      PTn-member ( DE, response, identification)                                      ITn-member ( DE, response, identification)</li> </ul> </li> <li>7. Continuous controllers                             <ul style="list-style-type: none"> <li>7.1. P-controller (control deviation, proportional band)</li> <li>7.2. PID-controller ( DE, parameters)</li> <li>7.3. Selection of controllers, tuning rules ( Ziegler-Nichols, Chien et al.)</li> </ul> </li> </ul> <p>Appendix, exercises 1 +2, dictionary</p>

## Literatur

**M.Horn / N. Dourdoumas (2004): Regelungstechnik, Pearson Studium. München**

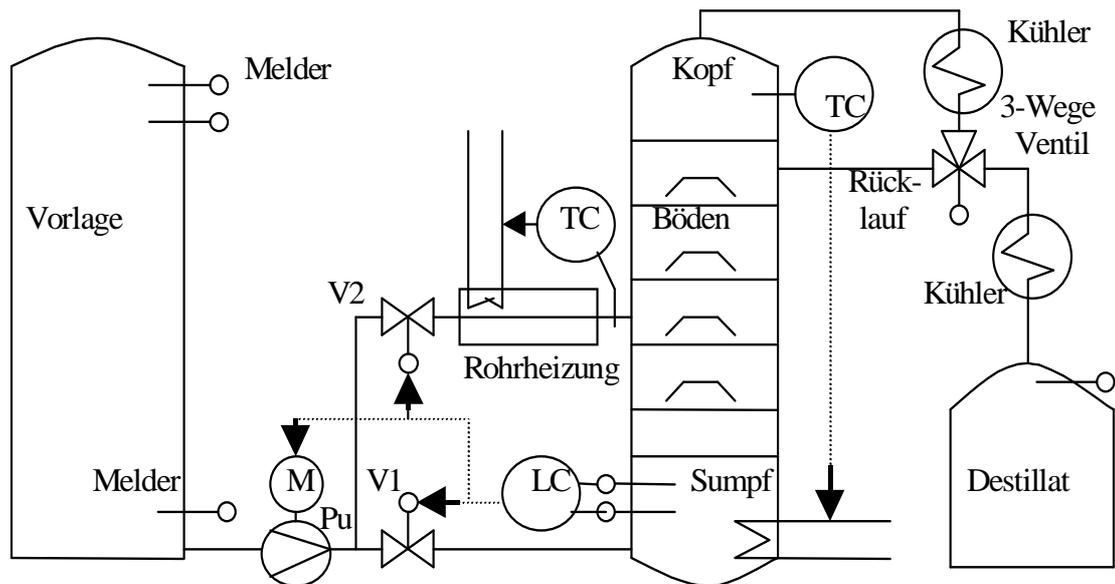
Wellenreuther, Zastrow : Steuerungstechnik mit SPS

Haug : Pneumatische Steuerungstechnik

Merz, Jaschek : Grundkurs der Regelungstechnik

Stromann : Messtechnik im Chemiebetrieb

## 0. Einführung: Beispiel Destille



Für den reinen Destillationsvorgang reicht der Vorlagentank, Pumpe Pu mit Motor M, die Destille mit den Böden, die Sumpfheizung, die beiden Kühler, das 3-Wege-Ventil und der Destillattank. Aber ohne Automatisierung müsste ein Destillenarbeiter ständig die Kopftemperatur mittels der Sumpfheizung nachregeln, die Tankfüllhöhen überwachen, den Sumpfpegel überwachen. Er wäre damit fast pausenlos beschäftigt.

Steuerungsaufgaben sind hier:

- Meldungen anzeigen (Füllstände, Betriebszustand, ...)
- Level-Control im Sumpf (über Pumpe, Ventile V1, V2)
- 3-Wege-Ventil für Vorlauf/Rücklauf schalten (wenn es keine eigene Zeitschaltung hat)
- Betriebszustände ein-/ausschalten (Anfahren, Dauerbetrieb, Abfahren)

Regelungsaufgaben sind hier:

- Temperature Control der Kopftemperatur mittels Sumpfheizung
- Temperature Control des Zulaufs mittels Rohrheizung

Der Gesamtpreis der Anlage setzt sich zu 50% aus den Apparatkosten und zu weiteren 50% aus den Kosten für die Automatisierung zusammen. Die Firma spart eine Arbeitskraft und erreicht eine wesentlich höhere Sicherheit (Automatisierungsgeräte rauchen nicht und machen keine Pausen)

# 1. RI-Diagramme

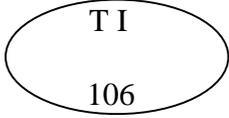
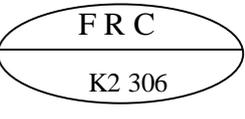
(Rohrleitungs- und Instrumentierungsfließbild nach DIN 19227)

Wir unterscheiden drei Fließbildstufen:

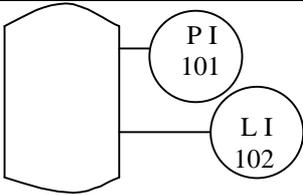
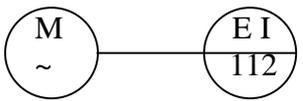
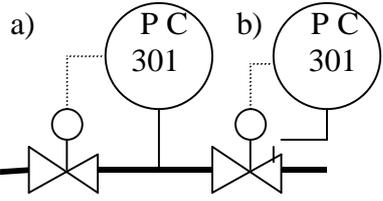
- Das Grundfließbild besteht aus Rechtecken (z.B. "Säuresynthese oder "Fermentation", die ganze Verfahren darstellen. Die Rechtecke sind durch Massen- und Energieströme verknüpft mit Wertangaben an den Verbindungslinien, z.B. "Prozessdampf 50 t/h" oder "elektrische Heizung 400 KW".
- Das Verfahrensließbild enthält symbolhaft Apparate und Armaturen in der Grundform, Rohrleitungen und wichtige MSR-Aufgaben. Das Fließbild zur "Destille" in der Einführung ist ein Beispiel.
- Das RI-Fließbild enthält Apparate in speziellen Ausführungen (z.B. unterschiedliche Symbole für Rohrbündel- oder Plattenwärmetauscher), alle MSR-Aufgaben, Angaben zu Material, Isolierung, Nennweiten usw.

## 1.1 MSR-Stellenkreis (Messen-Steuern-Regeln Kreis)

Die MSR-Stellenkreise vertreten symbolisch die Mess-, Steuer- und Regelaufgaben. Man bringt sie am Ort der Messung an. Bei Steuerung und Regelung (Kennbuchstabe C) zieht man eine gestrichelte Linie zum Stellort, z.B. zum Ventil. Eine Zusammenstellung wichtiger Kennbuchstaben finden Sie im **Anhang**, ebenso unterschiedliche Einwirkungsformen am Stellort.

	Temperaturanzeige örtlich (T= Temperatur, I= Information, kein Querstrich zwischen TI und Messstellenummer bedeutet örtliche Anzeige, z.B. einfach ein Thermometer im Rohr)
	Durchfluss (F), Registration (R) und Control (C). Control kann Steuerung und/oder Regelung heißen. Das Signal wird zentral in der Messwarte verarbeitet. Die Messstellenkennzeichnung darf auch Buchstaben enthalten

## 1.2 Beispiele für die Darstellung von MSR-Stellenkreise in RI-Fließbildern

	Druckmessung in einem Tank mit örtlicher Anzeige, z.B. ein Zeigerinstrument (Manometer) an Messstelle 101  Niveaumessung (Level) mit örtlicher Anzeige, z.B. ein Standglas außen am Behälter, als Messstelle 102
	Messung einer elektrischen Größe, z.B. Stromstärke, an einem Wechselstrommotor. Anzeige in der Messwarte
	a) Örtliche Druckregelung (Messen und Ventil stellen). Für die Druckmessung ist ein extra Druckstutzen für den Drucksensor am Rohr angeschweißt b) Örtliche Druckregelung. Für die Druckmessung ist hier ein Druckstutzen für den Drucksensor am Ventil vorhanden

	<p>Elektrische Heizung mit Zweipunktregelung (Schalter oder Thyristor schaltet die Heizung ein bzw. aus.) Die Temperatur wird am Fluid in der Leitung gemessen. Die Anzeige der Regelgröße (Ist-Temperatur) und der Führungsgröße (Sollwert) erfolgt in der Messwarte.</p>
	<p>Handschaltung (HS) einer Pumpe. Örtlich kann ein- und ausgeschaltet werden. Von der Messwarte kann jedoch nur ausgeschaltet werden.</p>

## 2. Einführung in die Steuerung

Steuerung (engl. Forward Control) tritt meist als Mischform dieser Steuerungsformen auf:

- Zeitplansteuerung (z.B. Probennehmer, Analysenautomat, Schul Klingelautomat)
- Ablaufsteuerung (z.B. Waschmaschine, Kaffeeautomat)
- Wegplansteuerung (z.B. CNC-Werkzeugmaschine, automatische Transportwagen)

**Ablaufsteuerung** ist die wichtigste Grundform der Steuerung in der Verfahrenstechnik. Ein Batch-Prozess (zeitlich begrenzter Prozess im Gegensatz zum kontinuierlichen Prozess) besteht aus Prozessschritten, deren Abfolge sich durch einen Graphen (z.B. den Mealy-Graphen nach dem englischen Mathematiker Mealy) darstellen lässt. Unser Beispiel ist ein Prozess, bei dem aus Stoff A (Fruchtsirup) und Stoff B (Pektinlösung) Gelee gekocht wird.

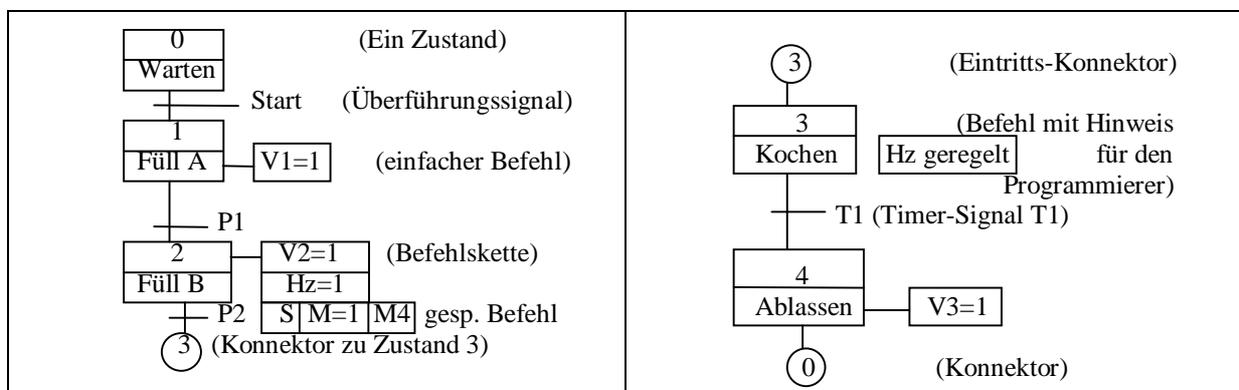
<p>Prozessabbild: Behälter, Ventile, Rührer mit Motor und Drehzahlsensor, Heizung, Temperatursensor T und 3 Pegelsensoren Po-P2</p>	<p>Schalttafel mit Starttaster und Anzeige-LEDs für den gerade aktiven Prozessschritt</p>	<p>Mealy-Graph mit den 5 Prozessschritten, den Übergangssignalen (Bo, Start, P1,...) und den Ausgabesignalen (V1, V2, M, ..)</p>
	<p> <input checked="" type="checkbox"/> Warten  <input checked="" type="checkbox"/> Stoff A  <input checked="" type="checkbox"/> Stoff B  <input checked="" type="checkbox"/> Kochen  <input checked="" type="checkbox"/> Ablassen </p>	

Im Mealy-Graph sind die Zustände (Knoten) die Prozessschritte. Die Übergänge (Kanten, Pfeile) werden durch Signale ausgelöst, z.B. durch den Richtimpuls Bo, die Starttaste,

Pegelmelder oder Timer, aber auch durch das Wegbleiben eines Signals (z.B.  $\bar{P}_0$  sprich P-0-nicht)

Jedem Zustand ist ein Merker zugeordnet (1-Bit-Speicher für die Information 0/1), z.B. Merker M0 dem Zustand Warten, Merker M1 dem Zustand Befüllen mit Stoff A, usw. Der Merker des **aktiven Zustands** hat den Wert 1, alle anderen Zustandsmerker sind 0. Der aktive Zustand kann **Befehle** aktivieren, z.B. V1 bzw. V1=1 heißt "Ventil V1 öffnen". Ist der Zustand nicht mehr aktiv, wird sein Zustandsmerker 0, und alle aktivierten *einfachen* Befehle erlöschen. Das Ventil geht automatisch zu, wenn der Befehl erlischt.

Für Dokumentationszwecke nimmt man nicht den Mealy-Graphen, sondern den **Funktionsgraphen** nach DIN 40719. Die folgende Zeichnung wurde absichtlich geteilt, um die Wirkungsweise von Konnektoren zu zeigen, falls man bei einem langen Graphen mit vielen Zuständen und Befehlen auf ein neues Blatt wechseln muss.

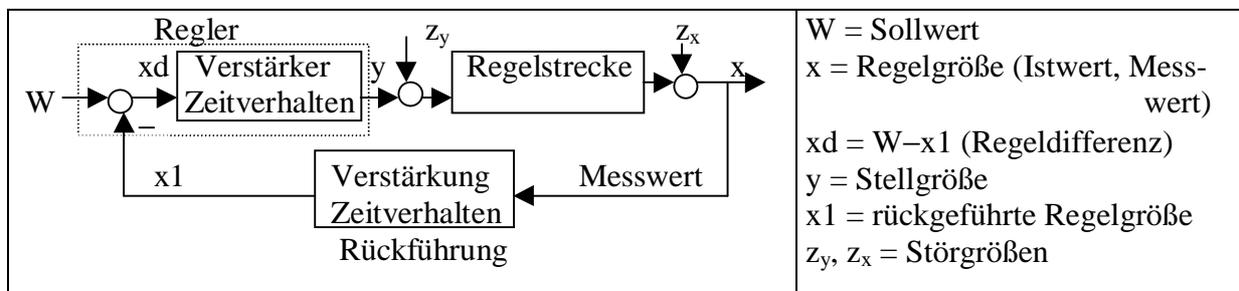


### 3. Einführung in die Regelung (Feedback Control)

Regeln heißt die Regelgröße ständig messen, mit dem Sollwert vergleichen und bei Abweichungen die Stellgröße so ändern, dass die Regelgröße sich wieder dem Sollwert annähert.

#### 3.1 Der Regelkreis

Die Abbildung zeigt das **Blockschaltbild** eines **Einfachregelkreises**.

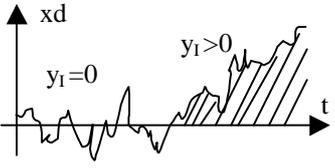
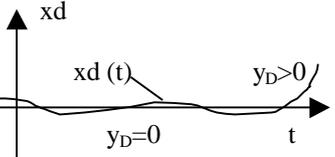


**Die Regelstrecke** muss immer aus der Sicht der Regelgröße gesehen werden, denn ein und derselbe Rührkessel kann sich in Hinsicht auf die Temperaturregelung ganz anders verhalten (z.B. viel langsamer auf die Heizung reagieren) als bezüglich des O<sub>2</sub>-Gehalts (indem die O<sub>2</sub>-Konzentration z.B. schnell auf eine Rührerdrehzahländerung reagiert).

Eine Temperaturregelstrecke ist z.B. das Temperaturverhalten eines Rührkessels als Antwort auf eine Hubänderung am Dampfventil der Heizung. Eine pH-Regelstrecke ist z.B. das Verhalten des pH-Wertes im selben Rührkessel als Antwort auf das Einschalten einer Dosierpumpe, die Natronlauge dosiert. Ein Apparat kann demnach mehrere Regelstrecken mit unterschiedlichen Eigenschaften aufweisen.

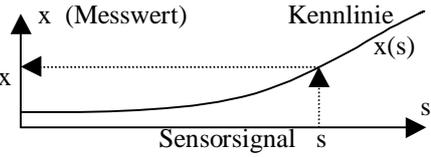
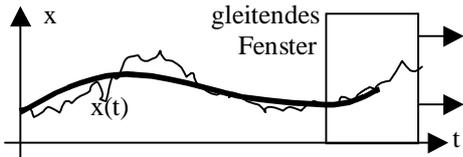
Als **erweiterte Regelstrecke** bezeichnet man den gesamten Regelkreis mit Ausnahme des Reglers, d.h. die Regelstrecke, den Aktor mit Stellantrieb, und den Messvorgang mit Messumformer (Rückführung).

**Regler** können analog arbeiten (elektronische Schaltung) oder digital (  $\mu$ -Prozessor). Ein Regler besteht aus den 4 Teilen: Vergleicher, Verstärker, Integration, Differenziation

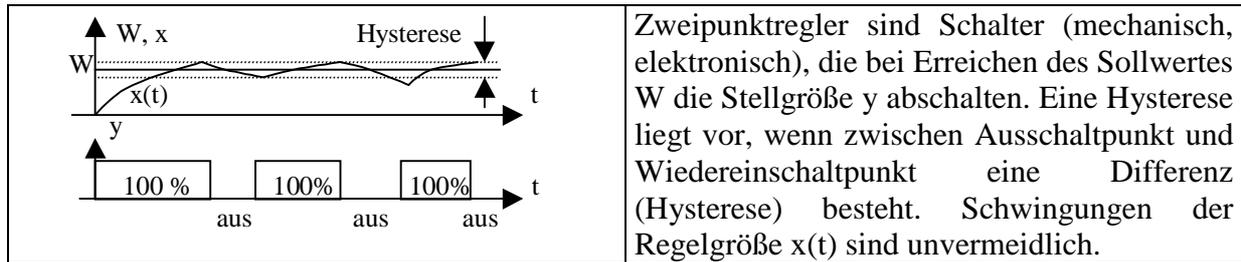
Vergleicher (Additions- bzw. Subtraktionsglied)	Bildet die Regeldifferenz $x_d$ aus Sollwert minus Istwert $x_1$	$x_d(t) = W(t) - x_1(t)$
Verstärker	Bildet P-Anteil der Stellgröße	$y_p(t) = K_p \cdot x_d(t)$
Integrierendes Zeitverhalten: Das Integral über die Regeldifferenz (Fläche unter der Kurve) multipliziert mit einer Konstanten $K_I$ ist der I-Anteil		$y_I(t) = K_I \cdot \int_0^t x_d(u) du$ Eine anwachsende Fläche deutet auf länger anhaltende Abweichungen $x_d$ hin
Differenzierendes Zeitverhalten: Der Anstieg (Steigung) der $x_d$ -Kurve, multipliziert mit einer Konstanten $K_D$ , liefert den D-Anteil des Reglers.		$y_D(t) = K_D \cdot \dot{x}_d(t)$ Ein starker $x_d$ -Anstieg deutet eine beginnende starke Abweichung an, bevor P- oder I-Anteil diese melden

**Die Rückführung** beinhaltet den Messvorgang und die anschließende Signalbearbeitung. Sensoren brauchen mehr oder weniger Zeit, bis sie den aktuellen Wert melden. Im Messumformer wird das Sensorsignal weiter verarbeitet, d.h. u.a.

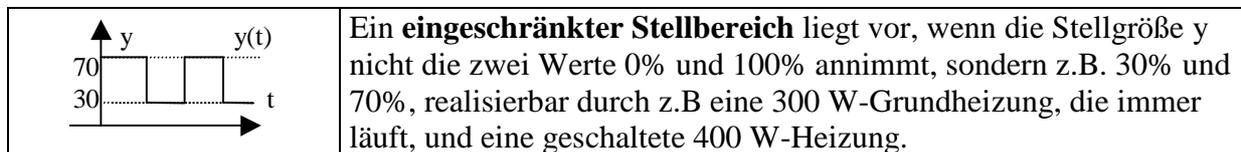
- das Signal verstärkt und so an den Messbereich, z.B. 20 - 60°C, angepasst
- der Nullpunkt fixiert und somit der Messbereichsbeginn, z.B. 20°C, eingestellt
- eine nichtlineare Sensorkennlinie berücksichtigt (Linearisierung der Skala)
- eventuell das Signal geglättet, wobei jedoch eine weitere Zeitverzögerung entsteht

Beispiel einer Linearisierung: Das gemessene Sensorsignal $s$ führt über die Kennlinie $x(s)$ zum linearisierten Messwert $x$	Beispiel einer Glättung mit gleitendem Mittel: Ein Fenster bewegt sich durch die Daten. Das Mittel wird im Fenster berechnet. Die geglättete Kurve ist flacher und endet früher.
	

### 3.2 2-Punktregler mit Hysterese



Eine Hysterese baut man ein, wenn die Schaltung des Aktors zu oft erfolgen würde (Schalt-schütze z.B. verschleiben schnell). Auch das Prallproblem wird durch die Hysterese entschärft. Von Prallen spricht man, wenn ein Signal mehrmals kurzzeitig mit kleinen Pausen erscheint, bevor es sich entschließt endgültig und gleichmäßig zu erscheinen.



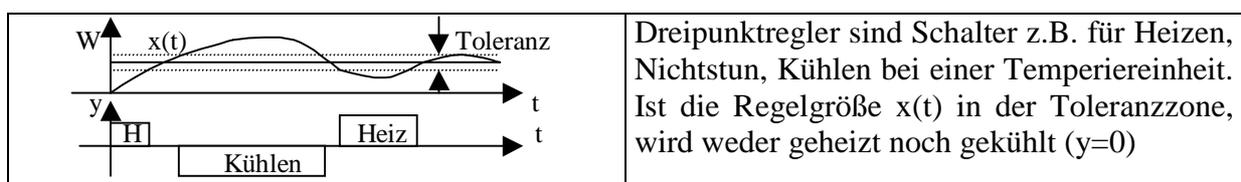
**Vorteile:** Die Welligkeit der Regelgröße  $x(t)$  wird deutlich geringer und es wird weniger Leistung geschaltet (hier 400 W statt 1000 W)

**Nachteil:** Die Reaktionsfähigkeit auf Störungen wird stark eingeschränkt (in kalten Wintern frieren die Fische im Aquarium bei nur 700 W max. Heizleistung, in sehr warmen Sommern sind 300 W Grundheizung zu viel.)

**Beispiel Temperaturrelais** mit 2 Grenzwerten liefert ein 0-10 V bzw. 0/4-20 mA Stellsignal. Als Messfühler sind PT100, PT1000 oder Thermo-elemente Typ B, E, J, K, L, N, R, S, T, KTY83 möglich. Regelgenauigkeit bis  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Anwendungen bei Heizung, Lüftung, Klima. Einsatz als 2-Punkt- oder 3-Punktregler.

**Beispiel Motorbelastungsrelais** kontrolliert die Einhaltung von  $\cos\phi$  (Verhältnis von Wirkleistung zu Blindleistung, eigentlich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung). Zwei Grenzwerte möglich. Schaltet Motor ab und macht Wiederanlauf. Verhindert die Stromabgabe bei Motoren und die Stromaufnahme bei Generatoren.

### 3.3 Dreipunktregler mit Toleranzbereich



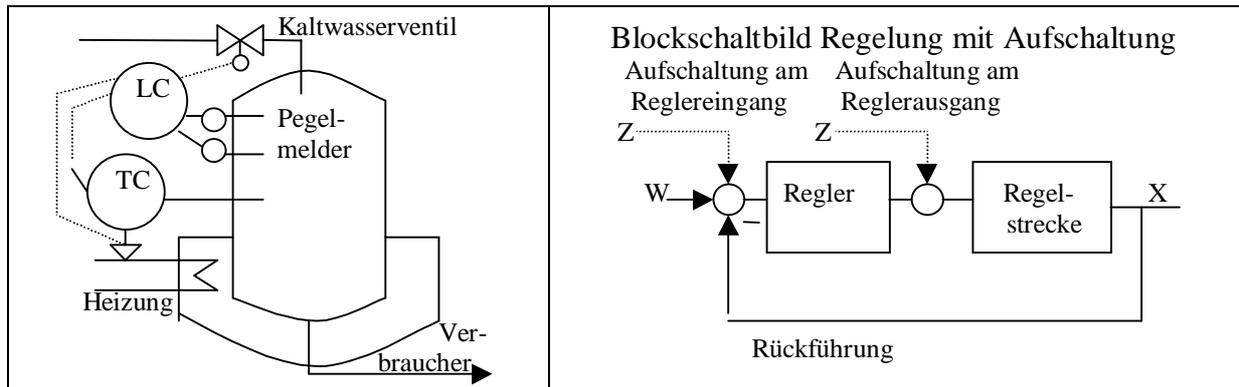
Eine kostenintensive Alternative zum Dreipunktregler in der Temperierung ist das geregelte Anheizen gegen einen konstanten Kühlwasserstrom im Fermenter.

### 3.4 Regelschaltungen

Von den vielen möglichen Regelschaltungen sind die folgenden 4 für uns interessant:

- Der Einfachregelkreis (siehe Kap. 3.1)
- Der Regelkreis mit Aufschaltung eines zweiten Messwertes (Hauptstörgröße)
- Die Kaskadenregelung
- Die Mehrgrößenregelung

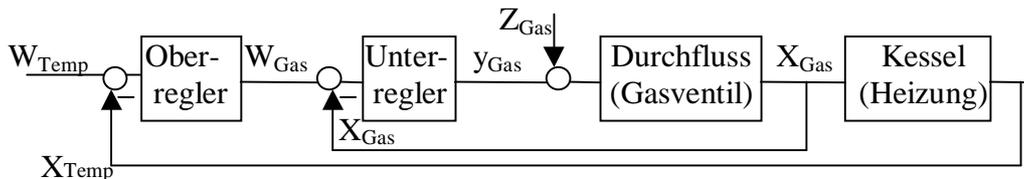
**Regelkreis mit Aufschaltung:** Eine messbare Hauptstörgröße  $z$  liefert ein Signal, das den



Aktor (z.B. das Ventil der Heizung) sofort ansteuert. Der Regler übernimmt dann nur noch das Nachregulieren. Der Vorteil ist der Zeitgewinn. Der einsetzenden Störung wird sofort begegnet, noch bevor ein normaler Regler reagieren könnte. Das Beispiel zeigt einen Warmwasserspeicher für  $W=85^\circ\text{C}$  Solltemperatur. Wenn die Niveauregelung LC das Kaltwasserventil öffnet, wird das Ventilsignal (20 mA) gleichzeitig an die Temperaturregelung gegeben.

- Aufschaltung am Reglereingang wirkt wie eine Sollwertänderung von  $W=85^\circ\text{C}$  auf das Ende des Messbereichs ( z.B. auf  $120^\circ\text{C}$ ).
- Aufschaltung am Reglerausgang wirkt wie das Signal "100 % Heizen".

**Kaskadenschaltung:** Ein Oberregelkreis liefert einem oder mehreren Unterregelkreisen den Sollwert. Auch mehr als 2 Stufen sind möglich. *Wichtig: Der Oberregelkreis muss langsam regeln, der unterste Regelkreis am schnellsten, sonst entstehen gefährliche Schwingungen.* Das Beispiel zeigt eine Temperaturregelung, bei der der Oberregelkreis den Sollthroughfluss  $W_{\text{Gas}}$  vorgibt, den der Unterregelkreis gegen Störungen aus dem Gasnetz halten soll. Solche Störungen können z.B. Druckschwankungen im Netz sein.



Es bedeuten:  $W_{\text{Temp}}, X_{\text{Temp}}$  sind Soll- und Ist-Temperatur  
 $W_{\text{Gas}}, X_{\text{Gas}}$  sind Soll- und Ist-Gasdurchfluss für den Brenner  
 $Z_{\text{Gas}}$  ist eine Störung im Gasnetz, z.B. eine Druckschwankung

**Mehrgrößenregelung:** Stören sich Regelkreise massiv, z.B. eine Temperaturerhöhung reduziert massiv die  $\text{O}_2$ -Konzentration im Rührkessel bzw. eine Erhöhung der Rührerdrehzahl trägt massiv Wärme ein, dann spricht man von *gekoppelten Regelkreisen* und benötigt eine Mehrgrößenregelung. Es gibt viele Lösungen, von denen zwei genannt werden sollen:

- Entkopplung der Regelkreise über Zusatzregler
- Fuzzy Control (Auswählen und Ausführen von Aktionen, die in einer Wissensbasis von Experten zusammengestellt wurden)

### 3.5 Regelaufgaben

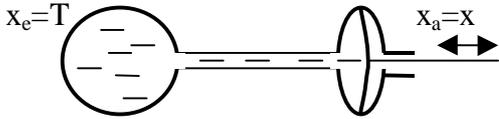
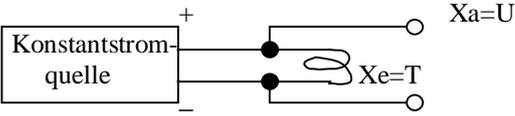
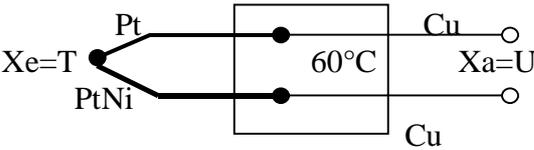
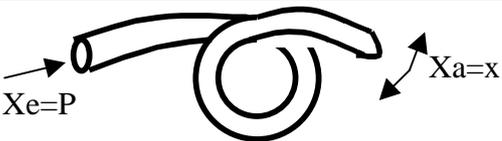
Von den vielen Regelaufgaben sind für BiotechnologInnen / VerfahrenstechnikerInnen die folgenden zwei Aufgaben wichtig:

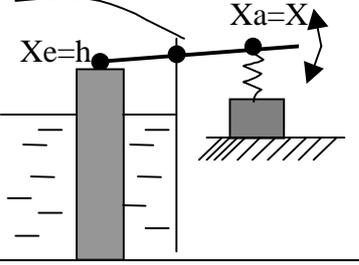
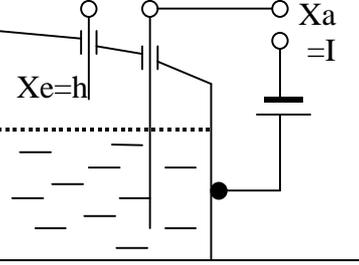
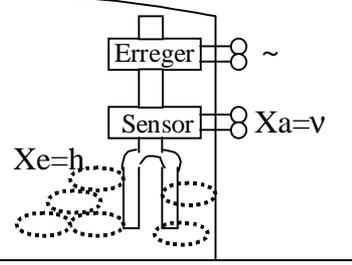
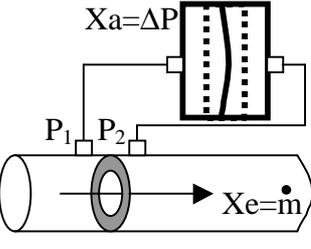
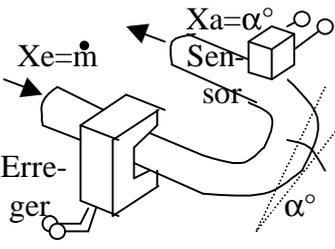
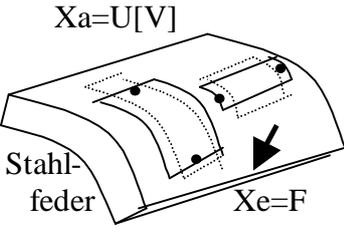
1. Konstantregelung: (Der Sollwert bleibt konstant)	Die Regelung soll Störungen von der Regelgröße fernhalten, z.B. eine konstante Temperatur einhalten, oder einen konstanten pH
2. Führungsregelung: (Der Sollwert ändert sich, entweder durch einen Oberregelkreis oder durch sich ändernde Prozessparameter)	Die Regelung hat hier die Aufgabe, den Istwert (die Regelgröße) möglichst schnell und sauber dem Sollwert nachzuführen.

## 4. Bauteile (eine Auswahl)

### 4.1 Messwerterfassung

**Sensoren** wandeln die physikalische Messgröße in ein elektrisches Signal. Die folgende Tabelle zeigt einige Sensoren, die in der Biotechnologie und Verfahrenstechnik eingesetzt werden:

	Das <i>Flüssigkeitsthermometer</i> besteht aus einer gefüllten temperaturfesten Kugel. Der Inhalt dehnt sich bei Erwärmung und verbiegt eine Membran. Die Auslenkung erzeugt das Signal
	<i>PT100</i> (Platinthermometer mit Widerstand 100 $\Omega$ ) wird von konstantem Strom (meist 1 mA) durchflossen. Der Widerstand ist temperaturabhängig und damit auch Spannung U.
	<i>Thermoelement</i> : Zwei unterschiedliche Metalllegierungen erzeugen an der Lötstelle eine temperaturabhängige Thermospannung U. Die Lötstellen zum Kupferdraht müssen konstante Temperatur haben (40, 50, 60°C üblich)
	<i>Bourdonrohr (Rohrfeder)</i> zum Messen sehr hoher Drücke. Das Rohr aus massivem Stahl "streckt" sich bei Druckbeaufschlagung. Die Auslenkung X ist dem Druck proportional.

<p>Pegelsensor: Ein Auftriebskörper (Keramik) ändert mit der Füllhöhe sein Gewicht und die Federauslenkung</p>	<p>Pegelmelder: Drahtsonden tauchen in die (leitende) Flüssigkeit. Stromkontakt meldet den Pegelstand der Sonde</p>	<p>Pegelmelder für lockeres Schüttgut: Die Dämpfung <math>D</math> der Stimmgabel und damit die Frequenz <math>\nu</math> hängt von <math>h</math> ab</p>
		
<p>Durchflusssensor Lochblende: Massendurchfluss <math>\dot{m}</math> hängt funktional vom Differenzdruck <math>\Delta P</math> vor und nach der Lochblende im Dampfrohr ab</p>	<p>Coriolisensor: Massendurchfluss <math>\dot{m}</math> hängt proportional vom Winkel <math>\alpha^\circ</math> der Schwingungsebene des schwingenden Rohrbogens ab</p>	<p>Kraftsensor: Kraft <math>F</math> ist proportional der Spannung <math>U</math>, die aus den Widerstandsänderungen der Dehnungsmessstreifen resultiert (Wheatstone-Brücke)</p>
		

**Messumformer** sind elektronische Bauteile, zumeist sensornah angeordnet und zumeist mit einem  $\mu$ -Prozessor bestückt. Messumformer haben folgende Aufgaben:

- Verstärkung des Messsignals (Sensoren liefern oft Spannungen im  $\mu\text{V}$ -Bereich.) Die Verstärkung legt auch die Ausdehnung des Messbereichs 0 bis 100% (z.B. 20-80°C) fest.
- Nullpunkteinstellung, z.B. 0% --> 20°C
- Digitalisierung des analogen Messsignals mittels AD-Wandler
- Linearisierung, wenn die Sensorkennlinie nichtlinear ist. Die Umrechnung wird über eine Tabelle von Eichpunkten mittels linearer oder nichtlinearer Interpolation durchgeführt.
- Filterung (entfernen von Spannungsspitzen), Glätten (Reduktion von Rauschen)
- Betrieb der Datenleitung zur Leitwarte (Bustreiber für den Feldbus)
- Alarmkontakte schalten (Überschreitung, Unterschreitung von gesetzten Grenzwerten)
- Galvanische Trennung von Prozess und Leitwarte (Schutz vor Überspannungen)
- Anzeige vor Ort mittels Display oder Zeigerinstrument
- Stromversorgung des Sensors

**Trennverstärker** sind die billige Variante zum Messumformer: Sie verstärken das Messsignal und machen eine galvanische Trennung. Man hat meist 10 oder 20 nebeneinander.

**Ein Bus** ist eine Datenleitung (analog oder digital) mit *Bustreibern* an beiden Enden, die sich über *Protokolle* (festgelegte Signalfolgen) miteinander verständigen.

## 4.2 Messwertaufzeichnung

**Drucker** nimmt man für Daten, Protokolle des Operatordialogs, Ergebnisse von Analysen. Druckerlisten sind dokumentenecht, da man Radierstellen gut erkennt.

**Schreiber** nimmt man für Daten, meist 5-10 Farbstifte, dokumentenecht

**Datenlogger** oder sonstige elektronische Speichermedien (Festplatte, Speicherkarte, CD) nimmt man zur Aufzeichnung von Daten für spätere Analysen (nicht dokumentenecht)

## 4.3 Signalverarbeitung

Gemessene Signale müssen weiterverarbeitet werden zu Messwerten, aus denen dann Aktorsignale folgen (Ventile stellen, Pumpen bzw. Heizungen ein- oder ausschalten bzw. regeln)

**Relais:** Elektromechanisches Bauteil aus einer Magnetspule und 1 bis 10 Kontakten, die gleichzeitig öffnen und/oder schließen bis zu Stromstärken von etwa 1 Ampere und Spannungen von etwa 500 Volt. Ein **Schütz** (Schaltschütz) arbeitet wie ein Relais, ist aber für höhere Stromstärken und/oder Spannungen ausgelegt.

**Logikbaustein:** Ein preiswerter Chip mit 100 bis etwa 10.000 UND- und ODER-Schaltungen. Man benutzt sie für einfache Steuerungen. Es gibt zwei Herstellungsvarianten:

- Der Schaltungsentwurf erfolgt genau nach Kundenwunsch
- Vollschaltungen werden heruntergebrannt (überflüssige UNDs und ODERs entfernt)

**Regler analog:** elektronische aus Operationsverstärkern, Widerständen, Kondensatoren (veraltet) pneumatische arbeiten mit Luftdruck, pneum. Verstärkern, Luftdrosseln hydraulische mit Öldruck, Zahnpumpen Drosselventilen, Zylindern

**Regler digital:** Bestehen aus einem  $\mu$ -Controller mit AD-Wandler, Display, Tastatur, Bustreiber, DA-Wandler. Die Stellgröße  $y$  wird numerisch nach einer Formel (DIN-Algorithmus) aus Sollwert und Istwert berechnet und sowohl digital als auch analog zur Verfügung gestellt.

**$\mu$ -Controller** sind 1-Chip-Rechner mit CPU (Central Processing Unit), Memory, AD- und DA-Wandler und werden in Geräten mittlerer Preisklasse für anspruchsvolle Steuer- und Regelaufgaben eingesetzt.

**SPS** (Speicherprogrammierte Steuerung, engl. SPC) ist die besonders robuste Variante eines  $\mu$ -Controllers. Die SPS hat als Eingangs- und Ausgangsspannung 24 Volt. Intern arbeitet sie wie alle Rechner mit 2 bis 5 Volt, d.h. sie hat extra Eingabe- und Ausgabebaugruppen. Die Ausgabeströme können bis 1 A betragen (im Gegensatz zu 1 mA beim  $\mu$ -Controller), d.h. die SPS hat ein leistungsfähiges Netzteil.

**PC:** Als Industrie-PC sehr robust (und teuer). Im PC läuft eine aufwendig konfigurierte Software (Leitsystem). Die Verbindung vom PC zum Prozess erfolgt über:

- eine Buskarte, d.h. eine Datenleitung zu einer SPS oder zu busfähigen Reglern, Sensoren und Aktoren
- eine Prozess-I/O-Karte (Input-Output Board) und eine sogenannte Black Box außerhalb des PCs. Die Black Box enthält u.a. Verstärker, Relais und eine Stromversorgung

## 4.4 Aktoren

Aktoren beeinflussen Massen- und Energieströme in einem Prozess. Es gibt eine Vielzahl von Aktoren: Ventile Klappen, Schieber, Hähne, Motore, Pumpen, Verdichter, Arbeitszylinder usw.

**Ventile:** Wir unterscheiden Absperrventile (stoppen Durchfluss), Regelventile (machen Durchfluss regelbar), Sicherheitsventile (öffnen bei Überdruck), Rückschlagventile (schließen bei Unterdruck), Reduzierventile (an Gasflaschen), Nadelventile (für kleine und kleinste Durchflüsse), Membranventile (völlig dicht nach außen, sterilisierbar).

**Klappen** verwendet man alternativ zu Ventilen bei nicht zu hohen Drücken.

**Schieber** verwendet man bei großen Rohrdurchmessern

**Hähne** verwendet man alternativ zu bestimmten Ventilformen, z.B. zu Absperrventilen

<p>Regelventil: Hilfsenergie für den Stellantrieb ist 380 V Drehstrom oder Druckluft 6-8 bar. Das Stellsignal hat 4-20 mA</p>	<p>Klappe wird oft statt Ventil verwendet Schieber bei großen Rohrdurchmessern Hähne bei Glasapparaturen, als Absperrhähne</p>

**Motore** dienen zum Antrieb von Apparaten, Förderbändern, Pumpen, Verdichtern usw.

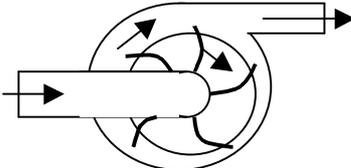
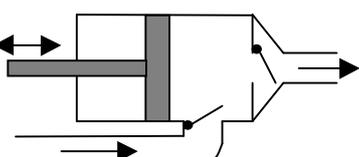
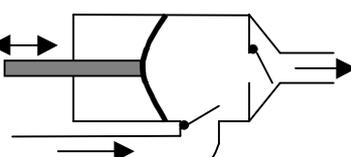
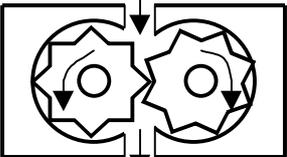
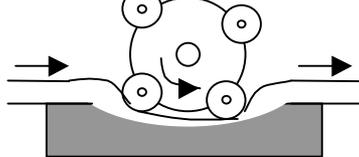
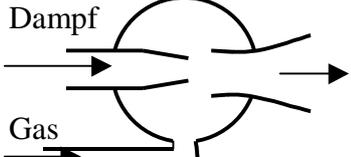
- Drehstrom- und Gleichstrommotore arbeiten asynchron zur Netzfrequenz von 50 Hz
- 1-Phasen-Wechselstrommotore mit Hilfsphase arbeiten meist synchron zur Netzfrequenz
- Schrittmotoren arbeiten synchron zu den eingespeisten Stromimpulsen der Steuerung
- Gasmotore arbeiten wie Benzin-/Dieselmotore und liefern Wärme und mech. Energie
- Druckluftmotore arbeiten wie ein umgekehrter Kompressor (geringer Wirkungsgrad)

**Zylinder** werden als Linearantriebe benutzt z.B. für Ventile, Klappen, Pressen, zum Festklemmen von Werkstücken, zum Nieten, Hämmern usw.

<p>Ein Drehstrommotor ist belastbar und robust. Die 3 Spulen des Stators erzeugen ein magnetisches Drehfeld, das den Anker mitnimmt</p>	<p>Einfachzylinder benötigt Rückstellfeder und 1 Luftleitung. Der doppelt wirkende Zylinder benötigt 2 Luftleitungen</p>

**Pumpen** fördern Flüssigkeiten bzw. Gase durch Rohrleitungen. Bei Flüssigkeiten spielt die Viskosität eine Rolle bzw. Verschmutzungen oder Beimengungen (Schlämme, Sedimente, Sand), die die Ventile beeinträchtigen können. Fördermenge und erzeugter Pumpendruck sind weitere Auswahlkriterien.

**Verdichter** fördern und komprimieren Luft bzw. Gase. Radialverdichter arbeiten wie die Kreiselpumpe, Axialverdichter wie ein Propeller (mehrstufig als Turbine mit Schaufeln), Kolbenverdichter wie eine Kolbenpumpe, Membranverdichter wie die Membranpumpe, Schraubenverdichter wie eine Zahnradpumpe.

<p>Bei der Kreiselpumpe schleudern die Schaufeln das Wasser nach außen, wo es austritt. keine Ventile große Fördermenge niedriger bis mittlerer Druck kleine Viskosität erforderlich</p>	<p>Die Kolbenpumpe hat ein Ein- und ein Auslassventil. Der Kolben wird von einem Motor hin und her bewegt kleine - mittlere Fördermenge mittlerer - hoher Druck hohe Viskosität möglich</p>	<p>Die Membranpumpe arbeitet wie eine Kolbenpumpe, ist aber absolut dicht und sterilisierbar. Es sind nur kleine bis mittlere Drücke möglich, kleine bis mittlere Fördermengen, hohe Viskosität.</p>
		
<p>In der Zahnradpumpe nehmen die Zähne außen das Fluid mit nach unten. In der Mitte kann es nicht zurück. hoher Druck kleine Fördermenge hohe Viskosität möglich</p>	<p>Die Schlauchpumpe schiebt mit Quetschrollen das Fluid im Schlauch weiter. kleine Fördermenge niedriger Druck steril hohe Viskosität möglich</p>	<p>Die Dampfstrahlpumpe arbeitet als Vakuumpumpe. Der Dampfstrahl reißt das Gas mit und es entsteht ein Unterdruck im Gasrohr, der weiteres Gas nachzieht, bis ein Vakuum entstanden ist.</p>
		

**Stellungsregler** sind Bauteile u.a. an Regelventilen, Klappen oder Schiebern. Sie vergleichen die Sollstellung der Ventilschindel mit der Ist-Stellung. Bei einer Abweichung wird der Hub der Schindel korrigiert, bis Soll und Ist übereinstimmen.

**S-Regler** (Geschwindigkeits- bzw. Schrittalgorithmus): Der Regler gibt nicht die Stellgröße  $y$  aus, sondern nur deren Änderung  $\Delta y$  zwischen zwei Taktzeiten (z.B. als Geschwindigkeit und Drehrichtung des Stellmotors, der das Ventil stellt). Der Aktor hat keinen Stellungsregler, liefert aber meist eine Rückmeldung des aktuellen Hubs an die zentrale Steuereinheit (SPS).

**K-Regler** (kontinuierlicher Regler): Der Regler gibt die Stellgröße  $y$  aus. Der Aktor benötigt einen Stellungsregler. Eine Rückmeldung ist nicht notwendig.

## 4.5 Regelstrecken

Regelstrecken sind Prozesse, bei denen Prozessparameter (z.B. Temperatur, Druck, pH, Trübung, Konzentration, Durchfluss usw.) geregelt werden. Wichtig ist die Reaktion des zu regelnden Prozessparameters auf seine Stellgröße, z.B. wie stark und wie schnell reagiert die Temperatur auf eine definierte Hubänderung am Heizventil. Regelstrecken werden nach der **Sprungantwort** klassifiziert. Eine Sprungantwort ist der Verlauf der Regelgröße  $x$  nach einer sprungartigen Erhöhung der Stellgröße  $y$  um einen definierten Betrag  $\Delta y = U_0$ .

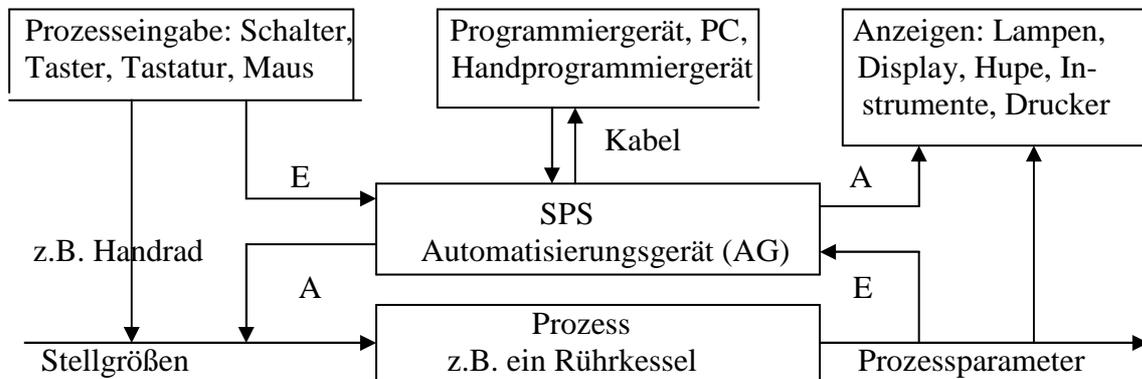
	<p>Die Graphik zeigt einen <b>Stellgrößensprung</b>, z.B. das Einschalten einer Zusatzheizung. Die Größe <math>U_0</math> muss keine Spannung sein, sondern ist die Änderung einer beliebigen Stellgröße (Heizleistung, Rührerdrehzahl, Stromstärke, ..)</p>
	<p><b>PT1-Sprungantwort (Ein-Speicher-Modell):</b> Die Regelgröße steigt sofort nach dem Stellgrößensprung vom alten Beharrungswert <math>x_0</math> und nähert sich asymptotisch als e-Kurve dem neuen Beharrungswert <math>x_B</math>. Beispiel: Temperatur im Rührkessel nach Heizsprung</p>
	<p><b>PTn-Sprungantwort (n-Speicher-Modell):</b> Die Regelgröße steigt erst nach einer Verzugszeit vom alten Beharrungswert <math>x_0</math> zum Wendepunkt und von da asymptotisch zum neuen Beharrungswert <math>x_B</math>. Beispiel: Temperatur am Duschkopf einer Dusche.</p>
	<p><b>I-Sprungantwort (einfache integrierende Strecke):</b> Die Regelgröße steigt sofort vom alten Stand <math>x_0</math> in Form einer Geraden ohne definierten Endpunkt. Beispiel: Pegel in einem Tank nach Start der Pumpe</p>
	<p><b>ITn-Sprungantwort (integrierende Strecke mit n Verzögerungsgliedern):</b> Die Kurve <math>x(t)</math> startet waagrecht und geht dann asymptotisch in eine Gerade (Asymptote) über. Beispiel: Pegelstand in einem Wasserbehälter mit vorgeschaltetem Sandfilter</p>

PT1- und PTn-Strecken heißen Strecken **mit Ausgleich**, da sie einem neuen Beharrungswert zustreben, wenn sich die Stellgröße ändert (engl. selfregulating members). I- und ITn-Strecken sind Strecken **ohne Ausgleich**, da sie keinem bestimmten Wert zustreben.

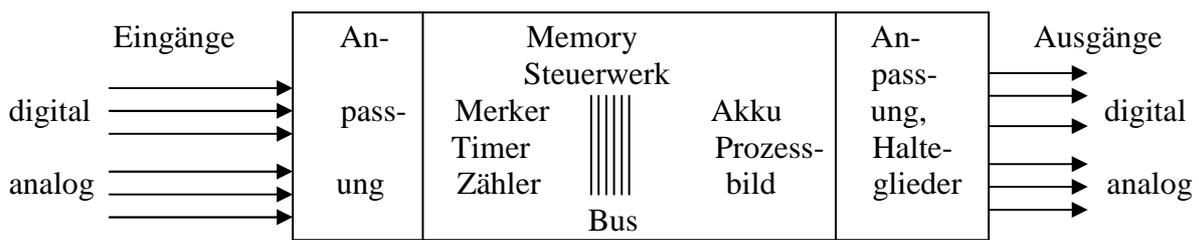
## 5. Steuerung mit SPS

### 5.1 Einführung SPS

#### Zusammenspiel Prozess mit SPS



#### Aufbau einer SPS



**Anpassung:** Bei der digitalen Eingabe (0/1-Werte) wird der externe 24-Volt-Pegel auf den internen 2-3 Volt-Pegel transformiert und eine galvanische Trennung realisiert. Bei Analog-Eingängen (-10 Volt bis +10 Volt) wird auf den 50 mV-Bereich des AD-Wandlers transformiert, bei analogen Stromeingängen (4-20 mA) ebenfalls. Bei der digitalen Ausgabe muss der Spannungspegel wieder auf 24 Volt erhöht werden, mit einem Halteglied eine Tastzeit lang gehalten werden, und notfalls Stromstärken bis zu 1 A geliefert werden. Die analoge Ausgabe arbeitet mit Pegel -10 bis +10 Volt bzw. Stromstärken von 4-20 mA.

**Memory:** Speicher für das Programm und für Datenblöcke

**Steuerwerk:** Macht die Befehlsverarbeitung, d.h. die logischen Operationen, Zahlenrechnungen und die Kommunikation (Drucker, Bildschirm, Internet)

**Akku** (Akkumulator): Speicher- und Rechenregister, bestehend aus zwei 16-Bit-Worten (Akku1 und Akku2)

**Merker:** Extra Datenspeicher zusätzlich zum Memory. Merker sind adressierbar als Worte (16 Bit), als Bytes (8 Bit) und als einzelnes Bit (1 Bit). Ein 1-Bit-Merker kann sich eine 0 oder eine 1 merken.

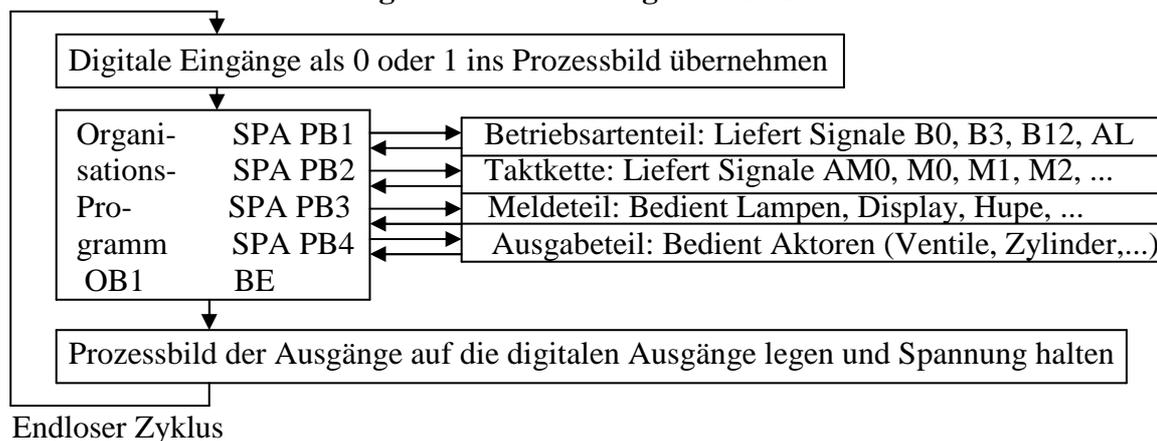
**Prozessbild:** Speicher mit je einem Bit für jeden digitalen Eingang bzw. Ausgang. Die Augenblickliche Spannungsführung (0 bzw. 24 Volt) wird hier abgebildet als 0 oder 1.

**Timer, Zähler:** Extra Speicherworte für Zeitdaten bzw. Zählerstände

**Bus:** SPS-interne Daten- und Steuerleitung

Als **Programmiergerät** wird heute fast ausschließlich ein PC (Laptop) genommen. Es gibt neben den Herstellerprogrammen auch eigenständige Softwarefirmen. Z.B. WinSPS-S7 gestattet nicht nur das Programmieren, sondern auch Trockentests ohne SPS und ermöglicht beim Zusammenspiel mit der SPS z.B. die Beobachtung von Speicherinhalten (wichtig bei Fehlersuche im Programm)

### Programmverarbeitung einer SPS



- SPA PB1*     Maschinenbefehl, bedeutet *Sprung absolut zum Anwenderprogramm PB1*
- BE*             Maschinenbefehl und heißt *Baustein-Ende* (der RETURN-Befehl)
- B0*             Richtimpuls, entsteht beim ersten Drücken der Starttaste
- B3*             Startimpuls, entsteht beim zweiten Drücken der Starttaste
- B12*            Stoppmerker (wird beim Start 0 gesetzt, mit der Stoptaste auf 1 gesetzt)
- AL*             Signal *Automatik läuft* (AL=1) als Dauersignal im Automatikbetrieb  
(Alternative ist der Handbetrieb mit AL=0)

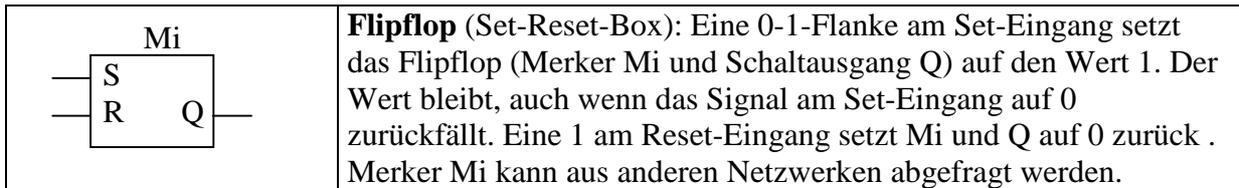
## 5.2 FUP-Programmierung (Funktionsplan)

Es gibt 3 Programmierarten, um ein SPS-Programm zu erstellen:

- AWL oder Anweisungsliste: Man schreibt Maschinenbefehle (Profis arbeiten so)
- FUP oder Funktionsplan: Man vernetzt Boxen (logische oder andere Operationen)
- KOP oder Kontaktplan: Sieht aus wie eine Stromschaltung mit Relais (in den USA üblich)

Ein **Programm** besteht aus **Bausteinen** (Teilprogrammen), diese aus **Netzwerken**, diese aus Linien und Boxen. Die Logik arbeitet mit 0/1.

	<b>UND-Box:</b> Der Ausgang wird nur 1, wenn <u>alle</u> Eingänge 1 sind
	<b>ODER-Box:</b> Der Ausgang wird nur 0, wenn <u>alle</u> Eingänge 0 sind
	<b>Negation:</b> Ist der Eingang 1, wird der Ausgang 0 Ist der Eingang 0, wird der Ausgang 1



**Timer** sind eine Art Kurzzeitwecker. Die Einschaltverzögerung z.B. meldet sich mit einem 1-Signal, wenn die eingestellte Zeit abgelaufen ist. Die Laufzeit wird bei der alten Serie S5 von Siemens-SPSen als Timerwort in Form einer Zeitkonstanten eingegeben.

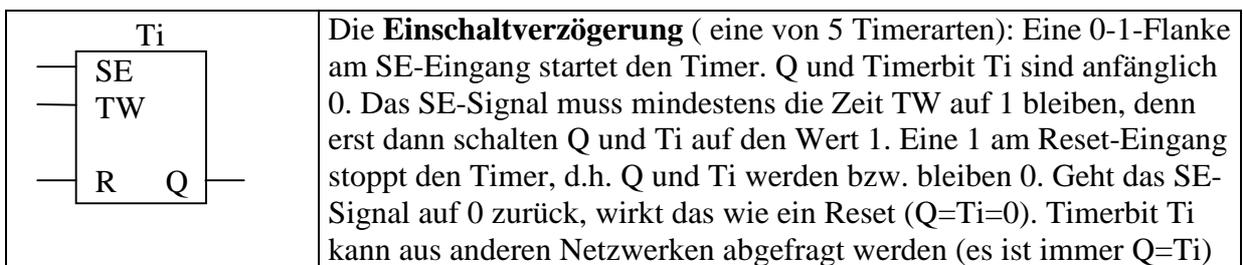
Beispiel: **KT 500.1** verschlüsselt die Zeit 50 Sekunden (500 mal 0,1 Sekunden)

**KT** steht für Konstante Timer

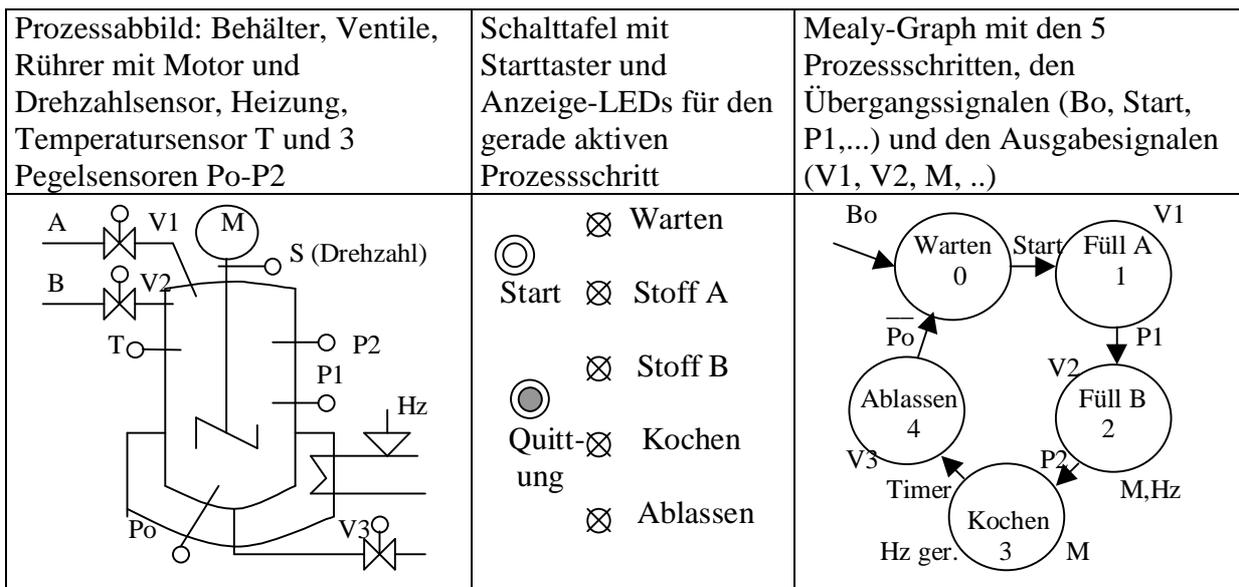
**500** ist der Zeitfaktor (Werte von 1–999 sind möglich)

**.1** ist das Zeitraster (**.0**=0,01 Sekunde **.1**=0,1 s **.2**=1 s **.3**=10 s)

Wichtig: Das Zeitraster möglichst klein wählen, damit die Zeit genau eingehalten wird (KT005.3 hätte zur Folge, daß jede Zeit zwischen 40–50 Sekunden auftreten kann)



**Unser Beispiel** war ein Prozess (siehe Kap. 2), bei dem aus Stoff A (Fruchtsirup) und Stoff B (Pektinlösung) Gelee gekocht wird. Prozessbild, Schalttafel und Zustandsgraph waren:

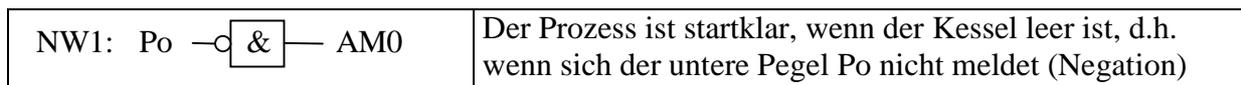


Ein typisches SPS-Steuerprogramm (der S5-Serie) besteht aus den 5 Programmbausteinen:

1. PB1 (**Betriebsartenteil**, erzeugt Signale wie Richtimpuls Bo, Startsignal B3, Stoppperker B12. Dieser Teil ist unveränderlich und wird unbesehen aus alten Programmen übernommen)
2. PB2 (**Taktkette**. Das erste Netzwerk, AM0 oder Starterlaubnis, gehört eigentlich in den Betriebsartenteil. Da aber prozessspezifische Signale ausgewertet werden, steht es immer in der Taktkette. Die weiteren Netzwerke setzen den Zustandsmerker M0, M1, M2, ... des geraden aktiven Zustandes, und schalten den Merker wieder auf den Wert 0 zurück, wenn der Prozessschritt abgelaufen ist.
3. PB3 (**Meldeteil**. Hier werden Lampen, Hupen, Warnleuchten, Drucker- und Bildschirmausgaben, Kommunikation mit einem Leitsystem usw. programmiert)
4. PB4 (**Ausgabeteil**. Alle Aktoren, wie Ventile, Motore, Stellzylinder, Heizungen usw. werden durch jeweils genau ein Netzwerk angesteuert)
5. OB1 (**Organisationsbaustein 1** enthält die Aufrufe der 4 Bausteine PB1 – PB4. OB1 selbst wird zyklisch vom Betriebssystem der SPS aufgerufen. Wie oft in der Sekunde, das hängt von der Programmlänge und der Leistungsfähigkeit der CPU ab)

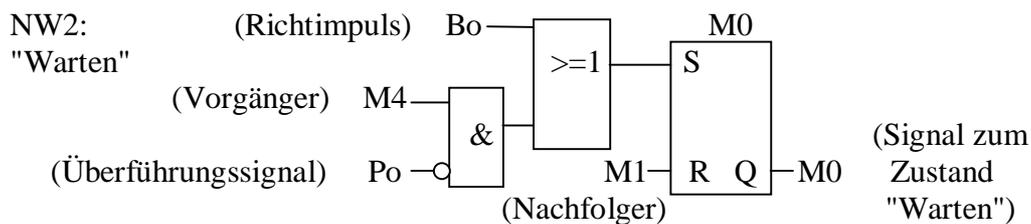
### 5.2.1 Programmbaustein PB2 (Taktkette)

Der Baustein liefert die Signale AM0, M0, M1, M2, ... Signal AM0=1 heißt, *der Prozess ist startklar*. Dabei wird z.B. gecheckt, ob der Deckel geschlossen ist, ob der Behälter leer ist, ob Druck anliegt usw. Ein einfaches Beispiel für Netzwerk 1, das AM0-Netzwerk, ist

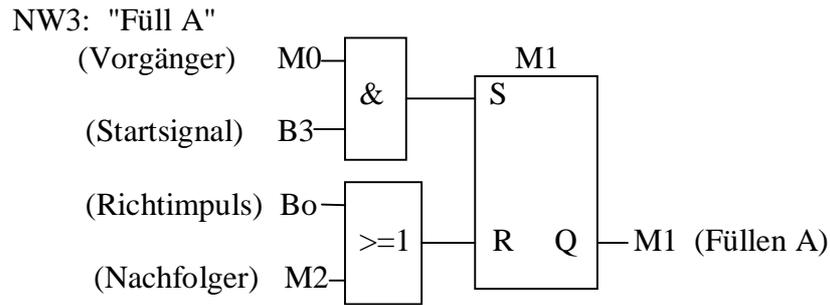


Die restlichen Netzwerke von PB2 realisieren die Taktkette (so etwas wie eine Schaltwalze, die einen Prozessschritt nach dem anderen aktiviert und wieder deaktiviert): Der aktive Zustand Mi liefert ein 1-Signal. Wird Zustand Mi (Prozessschritt Mi) beendet, dann reicht er die Stafette an seinen Nachfolger weiter. Dieser wird aktiv (und beendet das Aktivsignal seines

Vorgängers. (Alle im folgenden Text gezeigten Netzwerke sind nur für Automatikbetrieb. Die Kopplung Hand/Automatik ist etwas aufwendiger zu programmieren.)

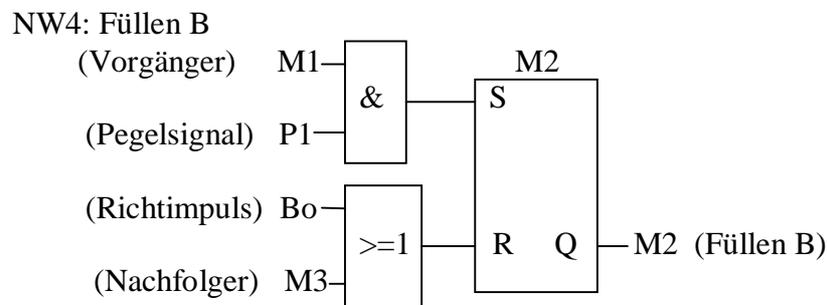


Zustand "Warten" (Merker M0) wird entweder durch den anfänglichen Richtimpuls Bo beim Start der SPS eingeschaltet oder aber, wenn sich im Zustand M4 (Prozessschritt Ablassen) der untere Pegel nicht mehr meldet, d.h. wenn der Kessel leergelaufen ist. Der Nachfolgezustand M1 (Befüllen mit Stoff A) schaltet den Wartenmerker M0 ab (M0=0).

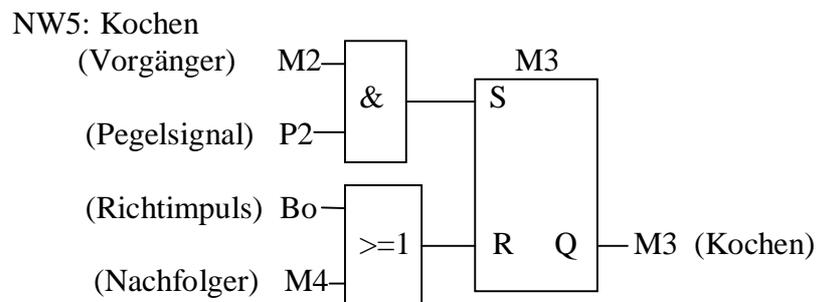


Wenn Zustand Warten aktiv ist ( $M0=1$ ) und die Starttaste gedrückt wird (Signal  $B3=1$ ), wird das Flipflop für Zustand 1 gesetzt (Merker  $M1=1$ ).  $M1$  wird Null gesetzt durch den anfänglichen Richtimpuls, oder aber durch den Nachfolgezustand  $M2$ .

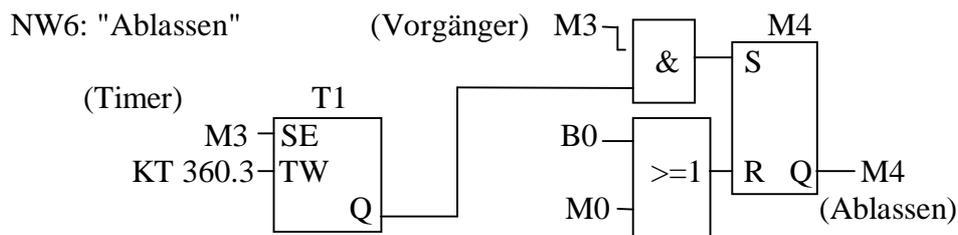
Das Netzwerk für den nächsten Takt ("Füllen B") sieht fast gleich aus: Wenn Zustand "Füllen Stoff A" aktiv ist ( $M1=1$ ) und sich Pegelmelder P1 meldet (Signal  $P1=1$ ), wird das Flipflop für Zustand 2 gesetzt (Merker  $M2=1$ ).  $M2$  wird Null gesetzt durch den anfänglichen Richtimpuls, oder aber durch den Nachfolgezustand  $M3$ .



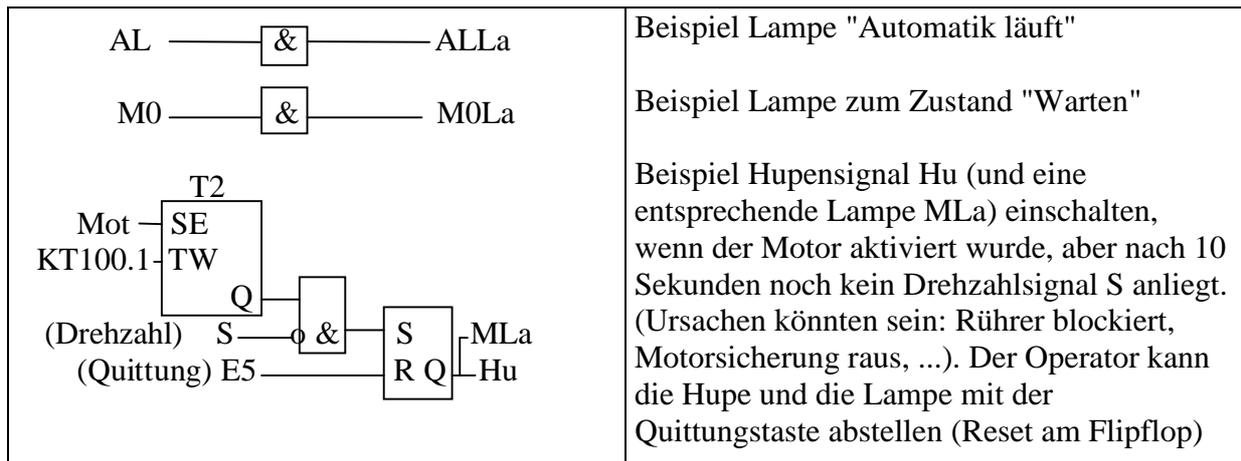
Zustand Kochen schaltet sich ein, wenn Pegelmelder P2 meldet, dass beide Stoffe befüllt sind.



Zustand Ablassen, der letzte Zustand der Taktkette, wird durch die abgelaufene Kochzeit T1 eingeschaltet. Die Timerkonstante  $KT360.3$  entspricht einer Stunde Timerlaufzeit. Vom Zustand Ablassen geht es zurück zum Warten (Zustand  $M0$ , siehe Netzwerk 2).

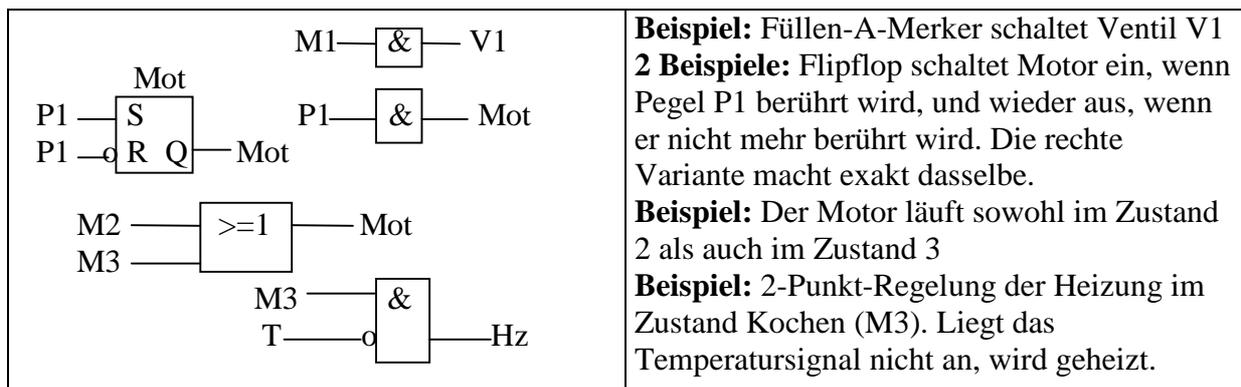


**5.2.2 Meldeteil PB 3:** Lampen, Hupe. Es wird Quittungstaste E5 verwendet (Schalttafel)



### 5.2.3 Ausgabeteil PB4: Ventile, Heizung, Rührermotor

Für jeden Aktor darf nur ein Ausgang programmiert werden (in der Regel ein Netzwerk für jeden Aktor). Oft gibt es mehrere Programmiermöglichkeiten, die gleichwertig sind.

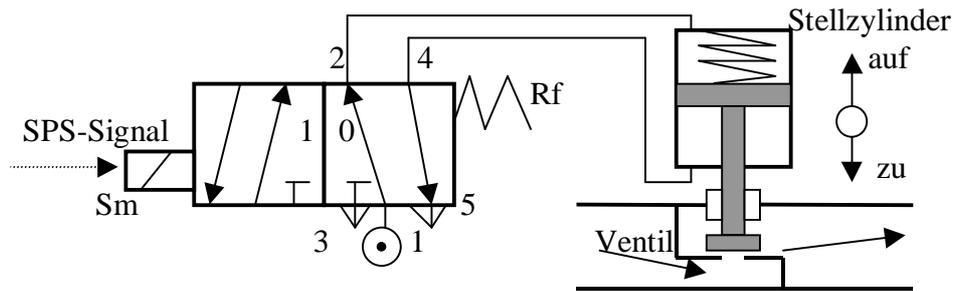


Das letzte Programm, der Organisationsbaustein OB1, ist oben unter *Programmverarbeitung einer SPS* erklärt worden. Er wird nicht als FUP, sondern in AWL programmiert.

### 5.2.4 Elektropneumatische Ventilsteuerung

Digital gesteuerte Ventile (Schließer- oder Öffnerventile) sperren eine Rohrleitung völlig ab oder aber öffnen sie zu 100%. Ist der Stellantrieb des Ventils ein pneumatischer Zylinder, dann verwendet man als Bindeglied zwischen SPS und Ventilantrieb gern elektropneumatische Steuerventile. Diese Steuerventile haben einen Magneten, der das Steuerventil stellt. Den Strom dafür liefert die SPS als 24-Volt-Signal.

Die Bezeichnung *5/2-elektropneumatisches Steuerventil* bedeutet 5 Luftanschlüsse am Ventilkörper und 2 Schaltzustände. Ein 3/2-Steuerventil hat demnach nur 3 Luftanschlüsse. Bei einem **doppelt wirkenden Stellzylinder** mit zwei Luftanschlüssen verwendet man gerne das **5/2-Ventil**.

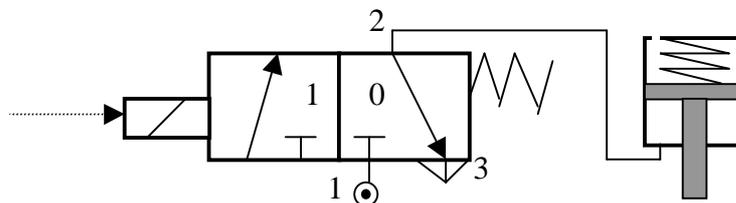


Sm ist der Stoßmagnet, der die Schaltkörper 0 und 1 mittels Rückholfeder Rf horizontal bewegt. Die Luftanschlüsse 1-5 behalten dabei ihre alte Position. Im Schaltzustand 0 ist die Druckluft (Anschluss 1) über Arbeitsleitung 2 mit dem oberen Einlass des Stellzylinders verbunden. Der Kolben geht in Richtung "zu" und schließt das Ventil. Die Luft unter dem Kolben kann über Arbeitsleitung 4 und Entlüftung 5 entweichen.

Kommt ein Signal von der SPS, dann wird Schaltkörper 1 vom Stoßmagneten zwischen die Luftanschlüsse geschoben. Jetzt strömt die Druckluft über Arbeitsleitung 4 in den unteren Teil des Stellzylinders und drückt den Kolben in Richtung "auf". Die Luft oberhalb des Kolbens entweicht über Arbeitsleitung 2 und Entlüftung 3. Die Feder im Stellzylinder sorgt bei Ausfall der Druckluft für eine sichere Ventilstellung (hier wird das Ventil geschlossen).

Endet das SPS-Signal, schiebt die Rückholfeder Rf den Schaltkörper 0 wieder zurück zwischen die Luftanschlüsse, und das Ventil fährt automatisch zu (Nullstellung).

Bei einem **einfach wirkenden Stellzylinder** mit nur einem Luftanschluss und Schließfeder verwendet man gerne das **3/2-Steuerventil**:

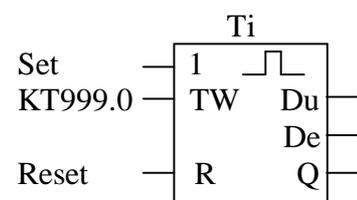


In Schaltstellung 0 drückt die Feder im Stellzylinder das Ventil zu. Die Luft unter dem Kolben entweicht über die Arbeitsleitung (2) und Entlüftung (3). In der Schaltstellung 1 geht die Druckluft (1) über die Arbeitsleitung (2) zum Zylinder und drückt ihn gegen die Federkraft nach oben. Die Luft über dem Kolben entweicht durch eine Bohrung.

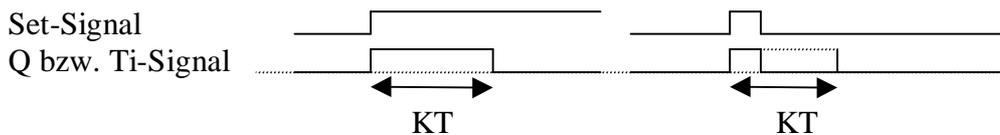
### 5.3 Impuls, Zähler, Betriebsartenteil (Vertiefung der SPS-Programmierung)

#### 5.3.1 Zeitfunktion Impuls

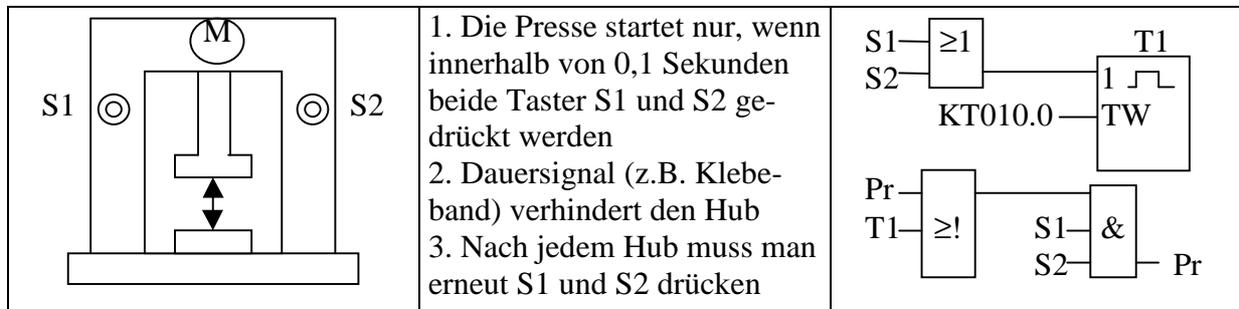
Ti ist die Nummer des Timers, Q ist der Schaltausgang ins lokale Netzwerk. Beide Signale sind synchron mit 0 oder 1 belegt. Du und De sind eine duale und eine dezimale Abfragemöglichkeit zur Restzeit. Der Timer hat einen Set- und einen Reset-Eingang. Die Timerlaufzeit wird durch das Timerwort TW bestimmt (Konstantentyp KT anschließen)



Die Zeitfunktion *Impuls* wird durch eine 0-1-Flanke am Set-Eingang gestartet. Auf Ti und Q erscheint sofort ein 1-Signal. Wenn das Signal am Set-Eingang andauert, erlischt das Ausgabesignal (Q und Ti) nach Ablauf der Zeit KT. Vorzeitig erlischt das Ausgabesignal bei Reset oder bei vorzeitiger 1-0-Flanke am Set-Eingang.



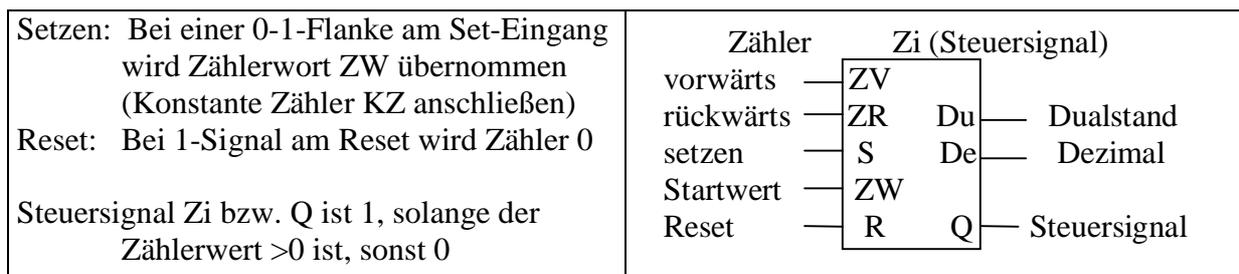
Beispiel Zweihandverriegelung einer Presse (aus Wellenreuther/Zastrow adaptiert)



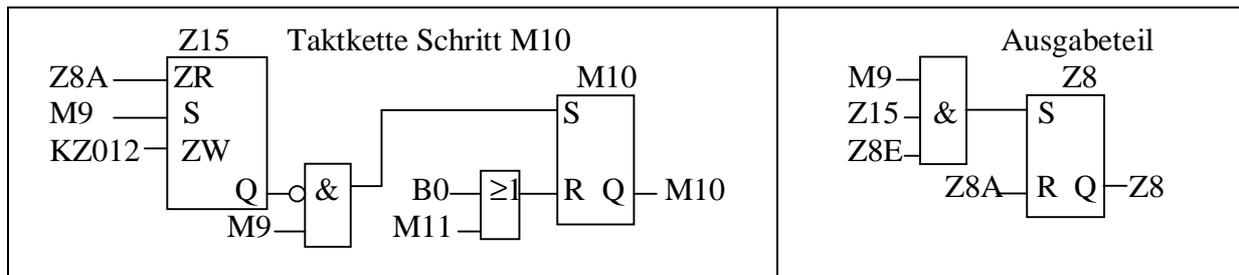
- Timer T1 kann nur mit einer 0-1-Flanke gestartet werden. Deshalb müssen beide Taster zuerst 0 sein (nicht gedrückt). Sobald der erste der beiden Taster S1 oder S2 Kontakt hat, startet der Timer.
- Der Pressenmotor M läuft an, wenn das Timersignal T1 und Taster S1 und Taster S2 gleichzeitig ein 1-Signal liefern (Signal Pr).
- Nach 0,1 Sekunden übernimmt das Pressensignal Pr den Part des Timersignals T1
- Sobald ein Taster S1 oder S2 losgelassen wird, erlischt das Pressensignal Pr und der Motor M bleibt stehen.

### 5.3.2 Langsame Zählerbausteine

Gezählt werden die 0-1-Flanken von Signalen, z.B. in einem Parkhaus das Signal "Schranke Einfahrt öffnen" zählt vorwärts, das Signal "Schranke Ausfahrt öffnen" zählt rückwärts.



**Beispiel:** Im Prozessschritt M9 soll ein Drahtkorb mit chirurgischen Instrumenten 12 mal in kochende Zitronensäure getaucht werden, bevor er weitergefahren wird (Prozessschritt M10). Der Tauchvorgang wird von einem Pneumatikzylinder Z8 ausgeführt. Dieser fährt luftgedrosselt bis Endschalter Z8A aus, dann luftgedrosselt zurück bis Endschalter Z8E. Einen Ausschnitt aus der Taktkette und die Ansteuerung von Zylinder Z8 im Ausgabeteil (nur für Automatikbetrieb) zeigen die beiden folgenden FUP-Netzwerke.



Prozessschritt M9 startet den Zähler. Die Zahl 12 wird in den Zähler übernommen. Bei jedem Tauchvorgang berührt der Zylinder Z8 seinen Endschalter Z8A. Dieses Signal zählt den Zähler Z15 jeweils um 1 zurück. Ist Zählerstand 0 erreicht, wird Signal Q im Zähler Z15 ebenfalls 0. Dieses Signal negiert startet zusammen mit dem M9-Signal den Prozessschritt M10, welcher das Signal M9 löscht.

Im Ausgabeteil wird das Flipflop des Zylinders Z8 auf 1 gesetzt, wenn M9 aktiv ist und der Zähler Z15 noch ein 1-Signal sendet und der Zylinder eingefahren ist, d.h. seinen Endschalter Z8E berührt. Das Ausfahren endet, wenn Endschalter Z8A berührt wird. Das Signal Z8 erlischt und der Zylinder fährt automatisch in seine Grundstellung zurück. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis der Zähler Z15 auf 0 heruntergezählt ist.

Diese Art Zählerbausteine sind nicht für schnelle Zählvorgänge geeignet und auch nur für Zahlen bis 999. Für schnelles Zählen oder große Stückzahlen kauft man spezielle externe Zählerbaugruppen.

### 5.3.3 Die Signale des Betriebsartenteils PB1

Automatikbetrieb: Der Prozess läuft weitgehend ohne Eingriff des Operators ab. Ist ein Prozessschritt abgeschlossen (alle Signale liegen vor), dann wird automatisch zum nächsten Prozessschritt gegangen.

Handbetrieb: Der Prozess wird per Hand gesteuert. Ein neuer Prozessschritt erfolgt auf Knopfdruck, ohne Überführungssignale abzufragen ( Vorsicht: Sie kommen z.B. in den Zustand Kochen, auch wenn kein Wasser im Rührkessel ist.) Die Arbeit der Aktoren, z.B. das Einschalten einer Heizung, muss jedoch per Freigabetaste freigegeben werden.

Einrichtbetrieb wird seltener angewendet. Er funktioniert wie der Handbetrieb. Zusätzlich kann man jedoch jeden Aktor einzeln freigeben, nicht einfach alle zusammen.

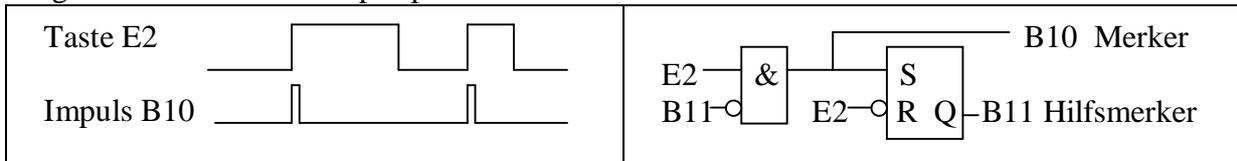
Ein Schalter und drei Taster steuern das Geschehen:

1. Schalter E1 heißt Hand/Automatikschalter (Hand=0, Automatik=1)
2. Taster E2 heißt Übernahmetaster. Im Automatikbetrieb löst er den Richtimpuls und das Startsignal aus. Im Handbetrieb löst er das Signal B2 aus (nächster Prozessschritt)
3. Taster E3 heißt Freigabe. Im Handbetrieb gibt er die angesteuerten Aktoren frei.
4. Taster E4 heißt Stopptaster. Im Automatikbetrieb wird der Stoppperker gesetzt

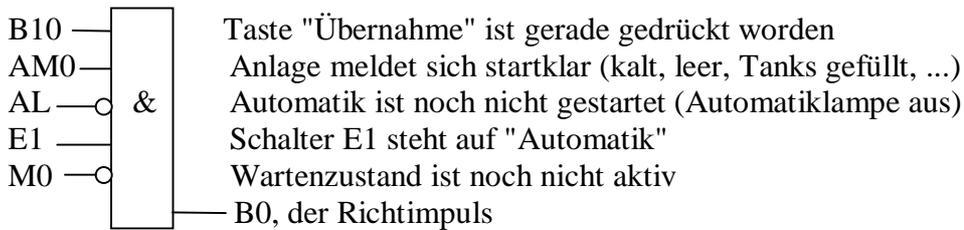
Die Signale und Netzwerke des Betriebsartenteils sind:

Signal **B10** (NW1): Eine *Flankenwischerschaltung* für Taster E2 liefert diesen Impuls (B10 ist nur ein Hilfssignal). Es gibt Flankenwischer, die bei einer 0-1-Flanke eines Signals einen Impuls liefern, und solche, die bei einer 1-0-Flanke einen Impuls liefern. Hilfsmerker B11 (siehe Schaltung unten) sei 0. Dann ist die Negation 1. Wenn jetzt Taster E2 gedrückt wird, wird Signal B10 auf 1 gesetzt und setzt das Flipflop für Hilfsmerker B11 auf 1. Die Negation

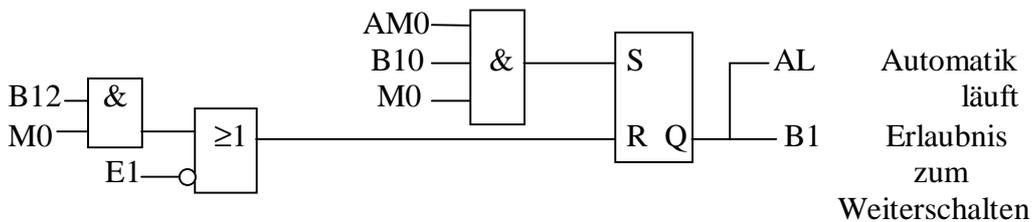
von B11 ist jetzt 0 und Signal B10 erlischt. Wird Taste E2 losgelassen, wird ihr Signal 0. Die Negation setzt das B11-Flipflop auf 0 zurück.



Richtimpuls **B0** (NW2): Der Richtimpuls schaltet den Zustand "M0=Warten" der Taktkette aktiv und alle anderen Zustände M1, M2, M3, ..., inaktiv (Grundstellung der Taktkette).

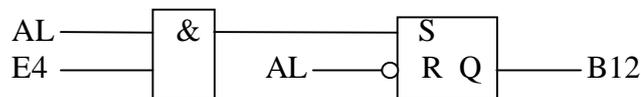


Signale **B1=AL** (NW3): B1=Erlaubnis zum automatischen Weiterschalten der Taktkette im Automatikbetrieb. AL=Signal für die Automatiklampe (ist an bei Automatikbetrieb).

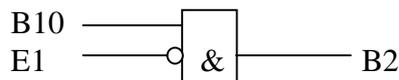


Die Automatik schaltet sich ein, wenn die drei Signale AM0, B10 und M0 anliegen. (Anlage startklar, Übernahmetaste gedrückt, Warten aktiv). Die Automatik wird abgeschaltet, wenn im Wartenzustand der Stoppperker gesetzt ist bzw. gesetzt wird, oder der Schalter Hand/Automatik auf Hand gedreht wird.

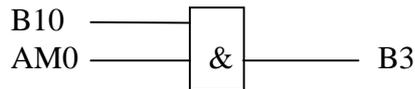
Stoppperker **B12** (NW4): Wird irgendwann im Verlauf der Prozessverarbeitung die Stopptaste E4 gedrückt, dann wird der Stoppperker B12 gesetzt. Eine Vorprogrammierte Auswirkung hat er nur im Wartenzustand, wo dann in Handbetrieb umgeschaltet wird. Im Handbetrieb wird der Stoppperker gelöscht. Ein Abbruch des Programms an bestimmten Punkten, z.B. wenn ein Fass gefüllt ist bei einer Abfüllanlage, muss gezielt einprogrammiert werden.



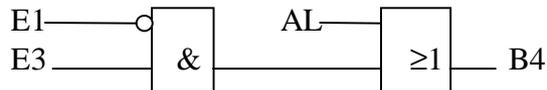
Signal **B2** (NW5): veranlasst im Handbetrieb den Übergang zum nächsten Prozessschritt. Dazu muss man die Übernahmetaste E2 drücken, die den Flankenimpuls B10 auslöst. Schalter E1 muss auf "Hand" stehen (E1=0).



Startsignal **B3** (NW6): Der zweite Tastendruck auf die Übernahmetaste löst den Startimpuls aus. Wirkt nur im Automatikbetrieb und nur im Zustand "Warten". (Zur Erinnerung: Erster Tastendruck löste den Richtimpuls aus). Das Signal AM0 muss 1 sein (Startbereitschaft des Prozesses).



Befehlsfreigabe **B4** (NW7): Das Signal dauert im Handbetrieb ( $E1=0$ ) so lange an, wie die Freigabetaste E3 gedrückt wird. Im Automatikbetrieb ( $AL=1$ ) ist es ein Dauersignal. Das Signal B4 bewirkt die Freigabe der angesteuerten Aktoren in einem Prozessschritt, d.h. das Aktorsignal wird von der SPS nur rausgelassen, wenn es freigegeben ist.

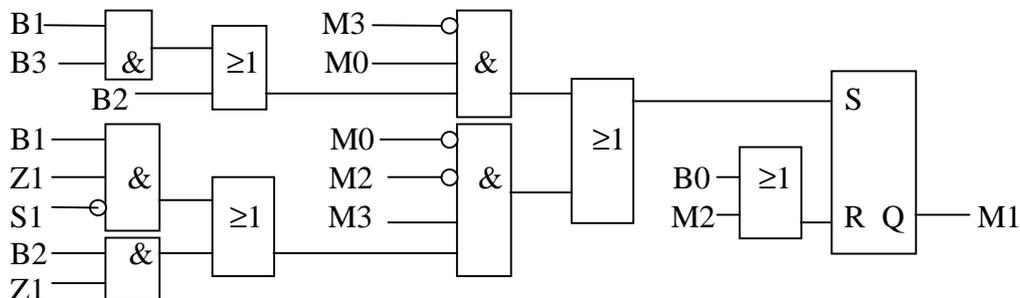


### Beispiel eines Netzwerkes aus einer Taktkette für Hand und Automatik

Der Zustand "M1=Befüllen" kann auf zwei Wegen gesetzt werden:

1. Vom Zustand "M0=Warten" bei Automatik ( $B1=1$ ) mit Startsignal B3, oder im Handbetrieb durch Signal B2 (Übernahmetaste). Möglicher Vorvorgängerzustand "M3=Ablassen" muss bereits abgeschaltet sein.
2. Vom Zustand "M3=Ablassen" im Automatikbetrieb ( $B1=1$ ), wenn Zähler Z1 noch nicht auf 0 heruntergezählt ist ( $Z1=1$ ), und unterer Pegelsensor sich nicht mehr meldet ( $S1=0$ ), oder aber im Handbetrieb mit der Übernahmetaste (Signal  $B2=1$ ) und der Zähler noch nicht auf 0 heruntergezählt ist. Mögliche Vorgänger müssen bereits abgeschaltet sein ( $M0=0, M2=0$ ).

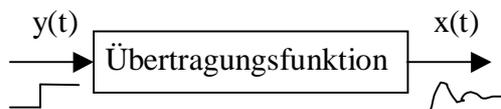
Zustand M1 kann beendet werden durch den Nachfolger M2, oder aber durch den Richtimpuls B0 einmalig beim Start der SPS.



## 6. Übertragungsglieder der Regelungstechnik

Regelungstechnik ist Signalverarbeitung. Diese wird gern als **Blockschaltbild** dargestellt. Das Blockschaltbild besteht aus **Boxen, Linien** und **Additionspunkten**. Boxen sind Symbole für Übertragungsglieder. Übertragungsglieder stehen für Verhaltensmodelle realer Prozesse. Der reale Prozess wird durch ein **mathematisches Modell** approximiert.

Ein Übertragungsglied hat einen Signaleingang  $y(t)$  und einen Signalausgang  $x(t)$ . Der Quotient  $x(t)/y(t)$  heißt **Übertragungsfunktion**. Ist  $y(t)$  die normierte Sprungfunktion  $1(t)$ , dann ist  $x(t)$  identisch mit der Übertragungsfunktion (da Division durch 1 nichts verändert).



Man unterscheidet die beiden Klassen **statische** und **dynamische** Übertragungsglieder:

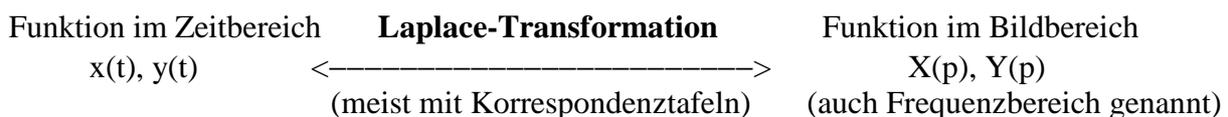
- *Statische Glieder* haben eine funktionelle Abhängigkeit  $x=f(y)$ , in der die Zeit nicht auftritt, d.h. der Ausgang  $x$  hängt nur über eine Kennlinie vom Eingang  $y$  ab, unabhängig von der Zeit  $t$ .
- *Dynamische Glieder* haben einen Zeitverlauf  $x(t)$  am Ausgang, d.h., dass wir das Verhalten durch Differentialgleichungen beschreiben müssen mit zeitabhängigen Lösungen  $x(t)$ . Aus historischen Gründen versucht man, möglichst Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten zu verwenden, z.B.  $a_2 \ddot{x}(t) + a_1 \dot{x}(t) + a_0 x(t) = b_0 y(t)$ . Jedes Modell (beschrieben durch seine DGL) hat seine charakteristische Sprungantwort, d.h. eine charakteristische Kurvenform der Lösungskurve.

Wie findet man die Lösung einer DGL mit konstanten Koeffizienten? Es gibt u.a. die zwei Standardverfahren:

1. **e-Ansatz** für die homogene Lösung, funktionsähnlicher Ansatz für die inhomogene Lösung, Koeffizientenvergleich
2. **Laplace-Transformation** der DGL, Rücktransformation mit Tabellen unter Anwendung der Partialbruchzerlegung und Koeffizientenvergleich

Kurze Rückerinnerung an die Laplace-Transformation: Diese fußt auf der Fourieranalyse, d.h. der Zerlegung einer beliebigen Funktion in unendlich viele Frequenzanteile, d.h. Sinus- und Kosinusschwingungen. Um z.B. den Anteil einer bestimmten Sinusschwingung mit Frequenz  $\omega$  in einer Funktion  $f(t)$  zu bestimmen, muss das Integral  $\int_0^\infty f(t) \sin(\omega t) dt$  gelöst werden.

Nun gibt es leider viele Funktionen  $f(t)$ , die sich so nicht integrieren lassen. Dazu gehört schon die simple Funktion  $f(t)=1$ . Da der Wert  $\infty$  der oberen Integralgrenze nicht definiert ist, gibt es auch keinen definierten Integralwert. Das hat Laplace erkannt und den Trick mit der Dämpfung der Funktion eingeführt. Lässt man  $f(t)$  für  $t \rightarrow \infty$  gegen Null gehen, dann ist das Integral plötzlich lösbar, d.h. wir berechnen das Integral  $\int_0^\infty f(t) \sin(\omega t) e^{-\delta t} dt$  mit einer Dämpfungskonstanten  $\delta$ .



Die Formel der Hintransformation (vom Zeitbereich in den Frequenzbereich) ist

$$F(p) = \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt$$

mit  $p=\delta+j\omega$ , wobei  $\delta$ =beliebige dimensionslose Dämpfung der Funktion für  $t \rightarrow \infty$  ist und  $\omega$ =eine Kreisfrequenz zwischen 0 und  $\infty$  ist. Der Bestandteil  $e^{j\omega t}$  im Term  $e^{-pt}$  erzeugt uns die Sinus- und Kosinuswellen der Fourieranalyse.  $j$  ist die imaginäre Einheit.

Die Rücktransformation vom Frequenzbereich in den Zeitbereich ist mathematisch sehr anspruchsvoll (Funktionentheorie) und wird fast immer mit den Korrespondenztafeln gemacht. Die folgende Tafel zeigt die **Korrespondenzen** für einige wenige ausgewählte Funktionen.

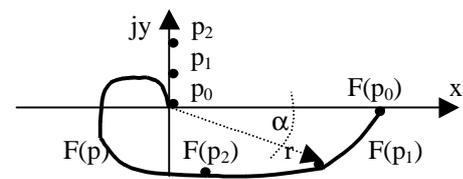
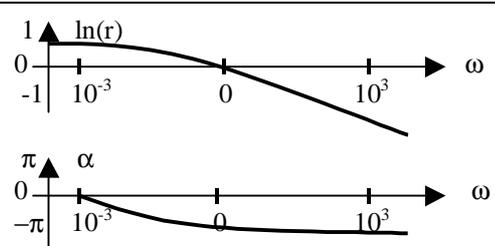
Modellbezeichnung	Modellgleichung im Zeitbereich	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich
P	$x=K_p y$	$F(p)=K_p$

PT <sub>1</sub>	$T\dot{x} + x = K_p y$	$F(p) = \frac{K_p}{1 + Tp}$
PT <sub>n</sub>	$a_n x^{(n)} + \dots + a_0 x = b_0 y$	$F(p) = K_p \frac{1}{(1 + Tp)^n}$
I	$x(t) = x_0 + K_I \int_0^t y(u) du$	$F(p) = \frac{K_I}{p}$
IT <sub>n</sub>	$a_0 x^{(n)} + \dots + a_0 x = x_0 + K_I \int_0^t y(u) du$	$F(p) = \frac{K_I}{p} \frac{1}{(1 + Tp)^n}$
PID	$x = K_p \left[ y + \frac{1}{T_n} \int y(t) dt + T_v \dot{y} \right]$	$F(p) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_n p} + T_v p \right]$

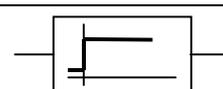
Links steht die Gleichung bzw. DGL des Übertragungsverhaltens von y nach x im Zeitbereich, rechts daneben die Laplacetransformierte F(p) der Übertragungsfunktion f(t)=x(t)/y(t).

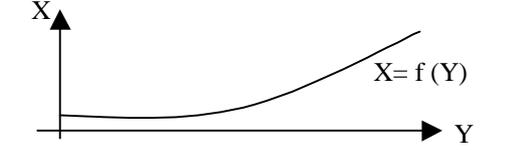
T sind Zeitkonstanten, K<sub>p</sub> bzw. K<sub>I</sub> konstante Verstärkungen, a<sub>i</sub> konstante Koeffizienten, x<sub>0</sub> ein Anfangswert, x<sup>(n)</sup> die n-te Ableitung von x(t). T<sub>n</sub> und T<sub>v</sub> sind PID-Parameter.

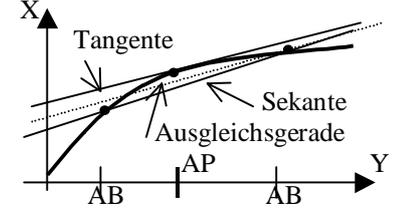
Für die komplexe Übertragungsfunktion gibt es zwei übliche graphische Darstellungen:

Die <b>Ortskurve</b> (auch Nyquistdiagramm genannt) stellt F(p)=x+jy als Kurvenzug in der komplexen Zahlenebene für die komplexen p-Werte p <sub>0</sub> , p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , ... mit p=0+jω dar, wobei ω Werte von 0 gegen ∞ durchläuft.	
Das <b>Bodediagramm</b> nutzt die Eulerform der komplexen Zahlen aus, d.h. F(p) = r e <sup>jα</sup> . Hier ist r der Abstand des komplexen Punktes vom Ursprung, α der Winkel von r zur x-Achse (siehe Graphik der Ortskurve). Im Bodediagramm wird sowohl der Verlauf von ln(r(p)) als auch der von α(p) über ln(ω) in zwei getrennten Graphiken aufgetragen (p=0+jω).	

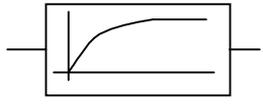
## 6.1 Einfache Übertragungsglieder

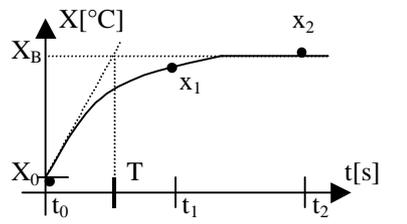
Das <b>P- oder Proportionalglied</b> modelliert statische Glieder mit Kennlinie, wie z.B. Ventile, Pumpen, Verstärker usw. Das Boxensymbol zeigt die Sprungantwort, die wieder eine Sprungfunktion ist. Das Modell hat nur einen Parameter, die Verstärkung K <sub>p</sub> .	
--	---

<p>Kennlinien können Gerade durch den Ursprung sein, wie z.B. <math>x = K_P y</math> oder beliebige Gerade, wie z.B. <math>x = x_0 + K_P y</math>. Die Übertragungsfunktion ist dann <math>F(p)=K_P</math>.</p>	
<p>In den meisten Fällen sind Kennlinien jedoch nichtlineare Funktionen, bei denen das Ausgangssignal <math>x</math> über einen funktionalen Zusammenhang <math>x=f(y)</math> vom Eingangssignal <math>y</math> abhängt.</p>	

<p>Aus Gründen, die mehr historisch sind und der Vereinfachung der mathematischen Behandlung komplexer Schaltungen dienen, werden nichtlineare Kennlinien gern linearisiert. Drei übliche Methoden sind:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tangente im Arbeitspunkt AP</li> <li>2. Sekante über dem Arbeitsbereich AB</li> <li>3. Ausgleichsgerade über dem Arbeitsbereich AB</li> </ol>	
--	--

In allen drei Fällen der Linearisierung entsteht die allgemeine Gerade  $x = x_0 + K_P y$  mit der sehr einfachen Übertragungsfunktion  $F(p)=K_P$ .

<p>Das <b>PT1-Glied</b> (auch 1-Speicher-Modell genannt) modelliert Prozesse wie zum Beispiel das Aufheizen oder Abkühlen eines Rührkessels. Das Symbol rechts zeigt die Sprungantwort - eine e-Kurve, die gegen einen Beharrungswert strebt. Das Modell hat 2 Parameter, <b>K<sub>P</sub></b> und <b>T</b>.</p>	
--	--

<p>Die Sprungantwort auf einen Eingangssprung der Höhe <math>\Delta y=U_0</math> (z.B. das Einschalten einer Heizung mit 200 W) zeigt die Graphik rechts. Die Temperatur steigt anfänglich stark. Durch die mit steigender Temperatur proportional steigende Wärmeabgabe verlangsamt sich der Anstieg und endet, wenn Wärmeeintrag und Wärmeabtrag im Gleichgewicht sind.</p>	
---	--

T= Zeitkonstante       $x_0$ =alter Beharrungswert       $x_B$ = neuer Beharrungswert  
 $t_i$ = Zeitpunkte       $x_i$ = Messwerte       $K_P$ = Streckenverstärkung

DGL:  $T\dot{x}(t) + x(t) = K_P y(t)$

Große Zeitkonstante T bedeutet einen großen Speicher (braucht lange zum Hochheizen bzw. zum Abkühlen). Eine Faustformel sagt: *nach 5 Zeitkonstanten ist der neue Beharrungswert erreicht (zu 99%)*. Die *Streckenverstärkung*  $K_P$  gibt an, wie stark die Strecke auf eine Eingangsänderung  $U_0$  reagiert:

$$K_P = \frac{x_B - x_0}{U_0} \left[ \frac{\text{dim } x}{\text{dim } y} \right] \quad \text{z.B.} \quad \left[ \frac{K}{W} \right]$$

Bei sehr großen Zeitkonstanten T kann es vorkommen, dass die Messung abgebrochen wird, bevor sich der neue Beharrungswert  $x_B$  eingestellt hat. Ist in der Sprungantwort eine deutliche

Krümmung der Kurve zu bemerken, dann kann man mit der folgenden Formel das  $x_B$  schätzen:

$$x_B = \frac{x_1^2 - x_0 x_2}{2x_1 - x_0 - x_2}$$

Wichtig ist, dass  $t_0$ ,  $t_1$ , und  $t_2$  gleichen Abstand voneinander haben. Am besten nimmt man den Messanfang, die Messmitte und das Messende.

Die Zeitkonstante  $T$  kann man graphisch und rechnerisch bestimmen:

- Zur graphischen Bestimmung zeichnet man im Punkt  $x_0$  die Tangente an die Antwortkurve (siehe Graphik oben). Der Zeitwert des Schnittpunkts der Tangente mit der  $x_B$ -Linie ist die Zeitkonstante  $T$ .

- Die rechnerische Lösung erfolgt nach der Formel 
$$T = \frac{t_1}{\ln\left(\frac{x_B - x_0}{x_B - x_1}\right)}$$

Es gibt zwei mathematisch gleichwertige Formeln der Sprungantwort auf einen Einheitssprung  $y(t)=1(t)$  mit Sprunghöhe  $U_0=1$ :

$$(1) \quad x(t) = x_B + (x_0 - x_B) e^{-t/T}$$

$$(2) \quad x(t) = x_0 + (x_B - x_0) (1 - e^{-t/T})$$

Hat man den alten Beharrungswert  $x_0$ , die Streckenverstärkung  $K_P$  und die Sprunghöhe  $U_0$  des Eingangssprunges, dann kann man die Lösungsfunktion nach folgender Formel berechnen:

$$(3) \quad x(t) = x_0 + K_P U_0 (1 - e^{-t/T})$$

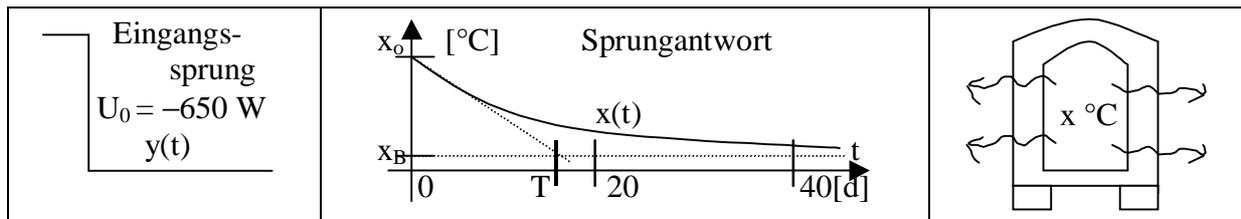
Für den neuen Beharrungswert gilt dann  $x_B = x_0 + K_P U_0$

Die komplexe Übertragungsfunktion der  $PT_1$ -Strecke im Bildbereich ist 
$$F(p) = \frac{K_P}{1 + Tp}$$

Die **Identifikation einer Strecke** erfordert zwei Anstrengungen:

1. Man muss das zutreffende Modell (den Streckentyp) erkennen, z.B., ob eine  $PT_1$ - oder eine  $PT_n$ - oder eine  $I$ -Strecke oder sonst ein Typ vorliegt. Dazu vergleicht man die Sprungantwort der Strecke mit den Sprungantworten verschiedener Modelle und sucht sich das passende Modell für die Strecke heraus.
  2. Man bestimmt die Modellparameter des ausgewählten Modells, z.B. die zwei Parameter  $K_P$  und  $T$  im Falle des  $PT_1$ -Modells.
- Die Kenntnis des Streckentyps ist wichtig für die Reglerauswahl.
  - Die Kenntnis der Modellparameter ist wichtig für Simulationsrechnungen.

<p><b>Beispiel für eine <math>PT_1</math>-Strecke:</b> Ein Solarwärmespeicher kühlt sich ab, weil die durchschnittliche Sonneneinstrahlung über den Tag gemittelt um 650 W sinkt, d.h. <math>U_0 = -650</math> W</p>	<p>Die 3 wichtigen Messdaten aus 40 Tagen Messdauer sind:</p> <table border="1"> <tr> <td>t [ d ]</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>x [ °C ]</td> <td>94,2</td> <td>42,2</td> <td>27,7</td> </tr> </table>	t [ d ]	0	20	40	x [ °C ]	94,2	42,2	27,7
t [ d ]	0	20	40						
x [ °C ]	94,2	42,2	27,7						



$$x_B = \frac{42,2^2 - 94,2 \cdot 27,7}{2 \cdot 42,2 - 94,2 - 27,7} = 22,1 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{Beharrungswert geschätzt}$$

$$T = \frac{20}{\ln\left(\frac{22,1 - 94,2}{22,1 - 42,2}\right)} = 15,7 \text{ [d]} \quad \text{Zeitkonstante berechnet}$$

$$K_p = \frac{22,1 - 94,2}{-650} = 0,111 \text{ [K/W]} \quad \text{Streckenverstärkung berechnet}$$

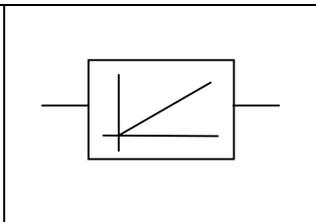
Die Streckenverstärkung  $K_p$  und die Zeitkonstante  $T$  sind konstante Größen, die nur vom Aufbau des Solarspeichers abhängen (Größe, Volumen, Isolierung, Material usw.). Würde die Heizleistung der Sonne nur um 300 W sinken, wäre der neue Beharrungswert

$$x_B = x_0 + K_p U_0 = 94,2 + 0,111 \cdot (-300) = 60,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ausgehend von einer Starttemperatur  $x_0=94,2 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $U_0 = -300 \text{ W}$  würde unser Modell zur Zeit  $t=10 \text{ [d]}$  folgende Temperatur liefern:

$$x(t) = x_0 + K_p U_0 (1 - e^{-t/T}) = 94,2 + 0,111 \cdot (-300) \cdot (1 - e^{-10/15,7}) = 78,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Das **I-Glied** (Integrator) nimmt man z.B. zum Modellieren von Tankfüllständen in Abhängigkeit von Zufluss und Abfluss, aber auch bei Positionen in Abhängigkeit von der Drehzahl eines Positioniersystems, bei Salzkonzentrationen in Abhängigkeit von der Dosierpumpe. Das Symbol zeigt die Sprungantwort des Integrators, eine Gerade.

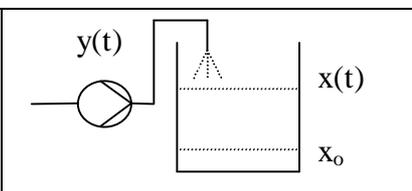
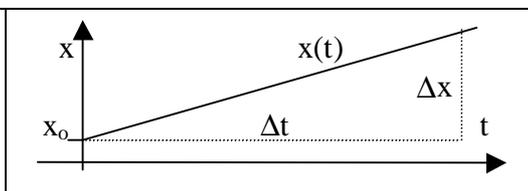


Das Modell hat nur einen Parameter, die Integrierkonstante  $K_I$ .

DGL:  $\dot{x}(t) = K_I y(t)$

als Integralgleichung:  $x(t) = x_0 + K_I \int_0^t y(u) du$

Sprungantwort  $x(t)$  auf einen Leistungssprung  $\Delta y = U_0$  z.B. einer Pumpe.



Wird die Pumpe eingeschaltet, dann steigt der Pegel  $x$  im Behälter kontinuierlich an (vorausgesetzt ein konstanter Querschnitt des Behälters). Die Identifikation erfordert nur die Berechnung der Integrierkonstanten  $K_I$ .

Integrierkonstante: 
$$K_I = \frac{\Delta x}{U_0 \Delta t} \left[ \frac{\text{dim } x}{\text{dim } y \cdot \text{Zeit}} \right] \quad \text{(siehe Graphik)}$$

Sprungantwort auf Sprung der Höhe  $U_0$ : 
$$x(t) = x_0 + K_I U_0 t \quad \text{(Geradengleichung)}$$

Komplexe Übertragungsfunktion:  $F(p) = \frac{K_I}{p}$

**Beispiel Tankpegelstand:** Pegel [m] 3,05 7,32  $\Delta x = 4,27$  [m]  
 $U_0=1,0$  [KW] Zeit [h:min] 16:32 18:39  $\Delta t = 127$  [min] = 2,117 [h]

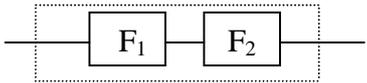
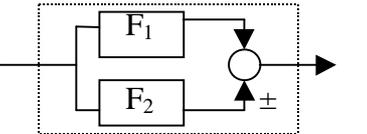
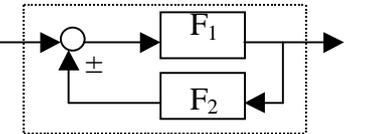
$$K_I = \frac{4,27}{1,0 \cdot 2,117} = 2,017 \left[ \frac{m}{KW \cdot h} \right]$$

Pumpt die Pumpe mit der halben Leistung 0,5 KW weitere 4 Stunden, dann berechnet sich der Pegelstand x zu:

$$x(t) = x_0 + K_I U_0 t = 7,32 + 2,017 \cdot 0,5 \cdot 4 = 11,35 \text{ [m].}$$

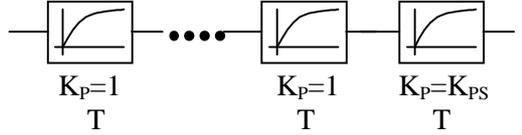
## 6.2 Zusammengesetzte Übertragungsglieder

Mit P-, PT<sub>1</sub>-, DT<sub>1</sub>- und I-Gliedern lassen sich komplexere Übertragungsverhalten modellieren. (Das DT<sub>1</sub>-Modell wurde hier nicht behandelt. Es tritt fast nur als Bestandteil von Reglern auf und wird im AT-Skript erklärt.). Die 3 wichtigsten Schaltungen sind:

<b>Reihenschaltung</b> (am Beispiel von 2 Gliedern)		$F(p) = F_1(p) \cdot F_2(p)$
<b>Parallelschaltung</b> (am Beispiel von 2 Gliedern)		$F(p) = F_1(p) \pm F_2(p)$
<b>Kreisschaltung:</b> Wellengenerator hat das "+" Regelkreis hat das "-" $F_2$ heißt Rückführung		$F(p) = \frac{F_1(p)}{1 \mp F_1(p) \cdot F_2(p)}$ (Regelkreis hat das "+")

### 6.2.1 Das PTn-Glied oder n-Speicher-Modell

Man modelliert damit größere Verzögerungen, z.B. die Temperatur am Duschkopf, wenn das heiße Wasser den weiten Weg aus einer Heizanlage im Keller nimmt, oder eine Kraftwerkskesselheizung mit einem vorgeschalteten Förderband (hier gilt eigentlich das sehr ähnliche **PT<sub>1</sub>T<sub>t</sub>-Modell**, das aber mathematisch schwerer zu behandeln ist, als das PTn-Modell).

Das PTn-Modell ist eine Reihenschaltung von <b>n</b> PT <sub>1</sub> -Gliedern. Man nimmt meist die gleiche Zeitkonstante <b>T</b> für alle Glieder. Die Gesamtverstärkung <b>K<sub>PS</sub></b> ist das Produkt aller Einzel-K <sub>P</sub> .	
--	--

Das PTn-Modell hat 3 Parameter: **K<sub>PS</sub>**, **n**, **T** (Verstärkung, Speicherzahl, Zeitkonstante eines einzelnen Speichers).

Die DGL des nicht schwingenden PT<sub>2</sub>-Gliedes als Beispiel eines PTn-Gliedes ist

$$T^2 \ddot{x}(t) + 2T\dot{x}(t) + x(t) = K_{PS} y(t)$$

Die komplexe Übertragungsfunktion ist  $F(p) = K_{PS} \frac{1}{(1 + Tp)^n}$

Die Sprungantwort auf einen Eingangssprung der Höhe $\Delta y = U_0$ ist	$x(t) = x_0 + K_{PS} \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-t/T})^n$
--	--

Die zwei konkurrierenden Modelle  $PT_n$  und  $PT_1T_t$  unterscheiden sich nur minimal in der Sprungantwort:

Eingangssprung $\Delta y$	Sprungantwort $PT_n$ -Modell	Sprungantwort $PT_1T_t$ -Modell

Auf Grund der Ähnlichkeit der beiden Modelle behandelt man das  $PT_1T_t$ -Modell wie ein  $PT_n$ -Modell, wobei die **Totzeit  $T_t$**  gleich **Verzugszeit  $T_u$**  gesetzt wird, und die Zeitkonstante  $T_1$  des einzigen Speichers des  $PT_1T_t$ -Modells gleich der **Ausgleichszeit  $T_g$**  des  $PT_n$ -Modells gesetzt wird, d.h.  **$T_t = T_u$  und  $T_1 = T_g$**

Die Identifikation des  $PT_n$ -Modells erfordert die Bestimmung von  $K_{PS}$ ,  $n$  und  $T$ . Ist am Messende der Beharrungswert  $x_B$  noch nicht erreicht, dann kann dieser nach derselben Formel geschätzt werden, wie sie beim  $PT_1$ -Modell verwendet wird. Der Unterschied liegt jedoch in der Wahl der Messpunkte. Die 3 Messpunkte  $x_0^*$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  müssen rechts vom Wendepunkt WP gewählt werden (Der Messwert  $x_0^*$  darf jedoch mit WP zusammenfallen). Die 3 Messpunkte müssen wie beim  $PT_1$ -Modell im gleichen Zeitabstand der Messkurve entnommen werden, d.h. es muss gelten  $t_1 - t_0^* = t_2 - t_1$ . Beachte, dass  $x_0$  und  $x_0^*$  unterschiedliche Werte sind.  $x_0$  ist der Startwert der Sprungantwort bei  $t=0$ ,  $x_0^*$  ist ein Messwert mitten aus der Sprungantwort.

Die Verzugszeit  $T_u$  bestimmt man aus dem Schnittpunkt der Wendepunkt tangente mit der Geraden  $x_0$ . Die Zeitsumme  $T_u + T_g$  bestimmt man aus dem Schnittpunkt der Wendepunkt tangente mit der Geraden  $x_B$ . Dann ist die Ausgleichszeit  **$T_g = (T_u + T_g) - T_u$** .

Gesamtverstärkung der Strecke 
$$K_{PS} = \frac{x_B - x_0}{U_0} \left[ \frac{\dim x}{\dim y} \right]$$

Schwierigkeitsgrad der Strecke 
$$S = T_u / T_g$$
  
(ab  $S=0,3$  heißt eine Strecke *schwierig*)

Speicherzahl des Modells 
$$n = [10 \cdot S + 1]_{\text{runden}}$$
  
(auf nächstliegende ganze Zahl runden)

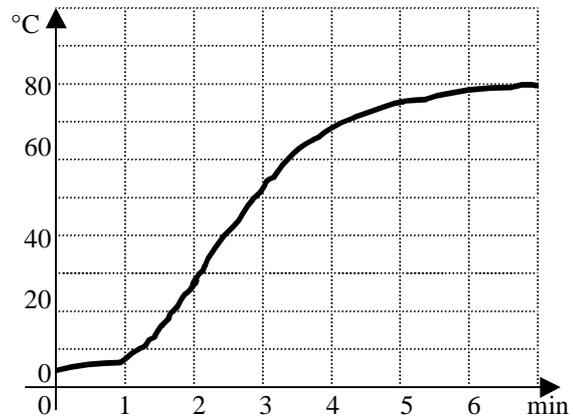
Für die Bestimmung der Zeitkonstantensumme  $\Sigma T_i$  benutzt man die Tatsache, dass alle Sprungantworten der Modelle  $PT_1$ ,  $PT_2$ ,  $PT_3$ , ...,  $PT_n$  im Zeitpunkt  $t = \Sigma T_i$  fast identische Werte haben. Der Mittelwert der Höhen liegt bei 57,5% des Abstands  $x_B - x_0$ . Deshalb berechnet man die Höhe  $x_{57}$  und findet so den Zeitpunkt  $t = \Sigma T_i$ .

$$x_{57} = x_0 + (x_B - x_0) \cdot 0,575$$

Den Wert  $t = \Sigma Ti$  findet man am Schnittpunkt der Geraden  $x_{57}$  mit der Kurve  $x(t)$ .

### Zahlenbeispiel

**Identifizieren** Sie die rechts stehende Antwortkurve auf einen Stellgrößensprung der Höhe  $U_0=5$  KW Heizleistung (Typ und alle Parameter der Strecke):



1. Der Typ ist PTn
2. Wir zeichnen Wendepunkt WP ein
3. Wir legen  $t_0^*$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  und  $x_0^*$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  fest
4. Wir schätzen den Beharrungswert  $x_B$
5. Wir berechnen Gesamtverstärkung  $K_{PS}$
6. Wir zeichnen die Tangente und bestimmen  $T_u$ ,  $T_u+T_g$  und damit  $T_g$

7. Wir berechnen Schwierigkeitsgrad  $S$  und daraus Speicherzahl  $n$  des Modells
8. Wir berechnen die Hilfsgröße  $x_{57}$  und bestimmen damit die Zeitkonstantensumme  $\Sigma Ti$ .
9. Wir bestimmen  $T$  nach der Formel  $T = \Sigma Ti / n$ .

$$x_0^*=52, \quad x_1=76, \quad x_2=80$$

$$x_B = \frac{x_1^2 - x_0^* \cdot x_2}{2x_1 - x_0^* - x_2} = \frac{76^2 - 52 \cdot 80}{2 \cdot 76 - 52 - 80} = 80,8$$

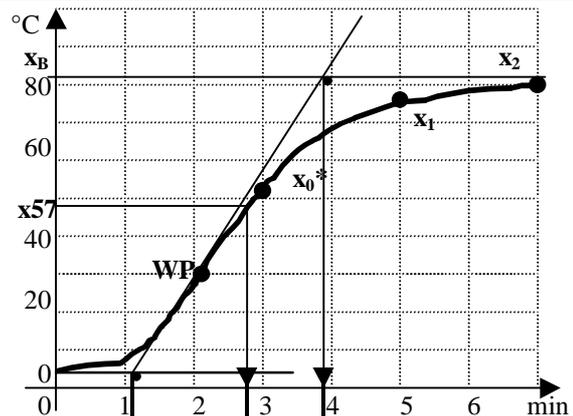
$$K_{PS} = \frac{x_B - x_0}{U_0} = \frac{80,8 - 5}{5} = 15,16 \left[ \frac{^\circ K}{KW} \right]$$

$$T_u = 1,1 \text{ [min]} \quad \text{aus der Graphik}$$

$$T_u + T_g = 3,9 \text{ [min]} \quad \text{aus der Graphik}$$

$$T_g = (T_u + T_g) - T_u = 3,9 - 1,1 = 2,8 \text{ [min]}$$

$$S = T_u / T_g = 1,1 / 2,8 = 0,39$$



$$n = [10 \cdot S + 1]_{\text{runden}} = [4,9]_{\text{runden}} = 5 \quad (\text{unser Streckenmodell sollte 5 Speicher haben})$$

$$x_{57} = x_0 + (x_B - x_0) \cdot 0,575 = 5 + (80,8 - 5) \cdot 0,575 = 48,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Wir finden mit dem Schnittpunkt  $x_{57}$  und Kurve  $x(t)$  den Wert  $\Sigma Ti = 2,8$  [min] für die Zeitkonstantensumme. Daraus berechnen wir die Zeitkonstante eines einzelnen Speichers:

$$T = \Sigma Ti / n = 2,8 / 5 = 0,56 \text{ [min]}.$$

Wir wollen einen einzelnen Wert einer Sprungantwort dieser Strecke berechnen für eine Eingangssprunghöhe  $U_0=3$  [KW], Starttemperatur  $x_0=16$  [°C] und für Zeitpunkt  $t=2$  [min]:

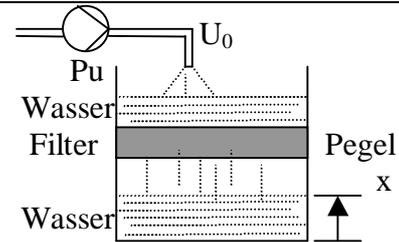
$$x(t) = x_0 + K_{PS} \cdot U_0 \cdot (1 - e^{-t/T})^n = 16 + 3 \cdot 15,16 \cdot (1 - e^{-2/0,56})^5 = 55,436 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 6.2.2 Das ITn-Glied oder n-Speicher-Modell mit Integrator

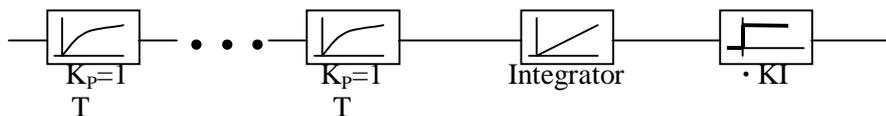
Das Modell besteht aus einer Reihenschaltung eines PTn-Gliedes mit einem Integrator (I-Glied). Das PTn-Glied ist verantwortlich für eine Verzögerung des Prozesses.

Das Modell hat 3 Parameter: Integrierkonstante  $K_I$ , Speicherzahl  $n$ , Zeitkonstante  $T$  eines einzelnen Speichers

Ein Beispiel für ein ITn-Glied ist eine Pumpe mit Sandfilter und Wassertank. Beginnt die Pumpe zu arbeiten, dann kommt die ersten Sekunden kein Wasser aus dem Filter. Dann tröpfelt es und erst nach einer gewissen Zeit, wenn sich über dem Sandfilter genug Wasser angesammelt hat, das Druck erzeugt, dann ist Zufluss gleich Abfluss im Sandfilter, und der Pegel  $x$  steigt linear.



Das Blockschaltbild (Symbol) zeigt die Reihenschaltung. (Manche Programmierer von Simulationsaufgaben lassen die letzte Box mit der Multiplikation mit  $K_I$  weg, und setzen dafür eine der Verstärkungen  $K_P$  der  $n$  Verzögerungsglieder gleich  $K_I$ , zumeist das letzte  $K_P$ .)



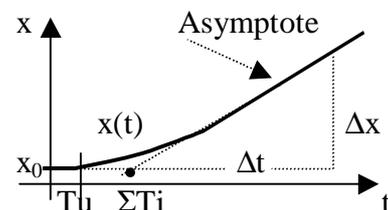
Die DGL ist am Beispiel eines nicht schwingenden  $PT_2$ -Gliedes mit einem Integrator gekoppelt, d.h. für ein IT2-Glied, dargestellt:

$$T^2 \cdot \ddot{x}(t) + 2T \cdot \dot{x}(t) + x(t) = K_I \cdot y(t)$$

Die Übertragungsfunktion ist

$$F(p) = \frac{K_I}{p} \frac{1}{(1+Tp)^n} \quad \text{bei } n \text{ Verzögerungsgliedern.}$$

Die **Sprungantwort** des ITn-Gliedes auf einen Eingangssprung der Höhe  $\Delta y=U_0$  zeigt die Graphik rechts. Nach der anfänglichen Verzugszeit  $T_u$  schwenkt die Kurve  $x(t)$  in die Asymptote ein. Der Schnittpunkt der Asymptote mit der Geraden  $x_0$  liefert die Zeitkonstantensumme  $\Sigma Ti$ . Der Anstieg  $\Delta x/\Delta t$  der Asymptoten geht in die Berechnung der Integrierkonstanten  $K_I$  ein.



**Identifikation des ITn-Gliedes** heißt Bestimmung der 3 Parameter  $K_I$ ,  $n$ ,  $T$

Integrierkonstante 
$$K_I = \frac{\Delta x}{U_0 \cdot \Delta t} \left[ \frac{\dim x}{\dim y \cdot \text{Zeit}} \right]$$

Verzugszeit  $T_u$  und Zeitkonstantensumme  $\Sigma Ti$  werden aus der Graphik abgelesen (siehe oben).

Wir berechnen die Hilfsgröße  $H = T_u / \Sigma Ti$

In Abhängigkeit von Hilfsgröße  $H$  bestimmen wir die Ausgleichszeit  $T_g$

Ausgleichszeit ist 
$$T_g = \begin{cases} \Sigma Ti, & \text{wenn } H < 0,43 \\ (\Sigma Ti - T_u) / 0,57, & \text{wenn } H \geq 0,43 \end{cases}$$

Schwierigkeitsgrad 
$$S = T_u / T_g$$

Speicherzahl

$$n = [10 \cdot S + 1]_{\text{runden}}$$

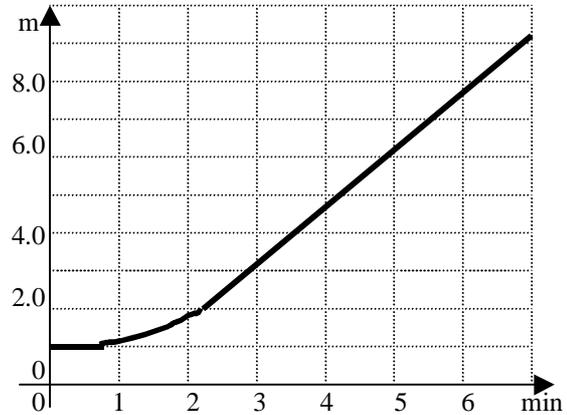
Zeitkonstante eines Speichers

$$T = \Sigma T_i / n$$

Zahlenbeispiel:

**Identifizieren** Sie die rechts stehende Antwortkurve auf einen Stellgrößensprung der Höhe  $U_0=4$  KW Pumpenleistung (Typ und alle Parameter).

1. Steigungsdreieck  $\Delta x$ ,  $\Delta t$  zeichnen und  $\Delta x$  und  $\Delta t$  bestimmen
2. Integrierkonstante  $K_I$  berechnen
3. Verzugszeit  $T_u$  ist die Zeit für das horizontale Startstück der  $x(t)$ -Kurve
4. Zeitkonstantensumme  $\Sigma T_i$  wird durch den Schnittpunkt der Asymptoten mit der Geraden  $x_0$  gefunden.



5. Hilfsgröße  $H$ , Ausgleichszeit  $T_g$  berechnen

6. Schwierigkeitsgrad  $S$ , Speicherzahl  $n$ , und Zeitkonstante  $T$  eines Speichers berechnen.

$\Delta x = 8$  [m],  $\Delta t = 5,5$  [min] (aus Graphik)

$$K_I = \frac{\Delta x}{U_0 \cdot \Delta t} = \frac{8}{4 \cdot 5,5} = 0,364 \left[ \frac{m}{KW \cdot min} \right]$$

$T_u = 0,7$  [min] (aus Graphik)

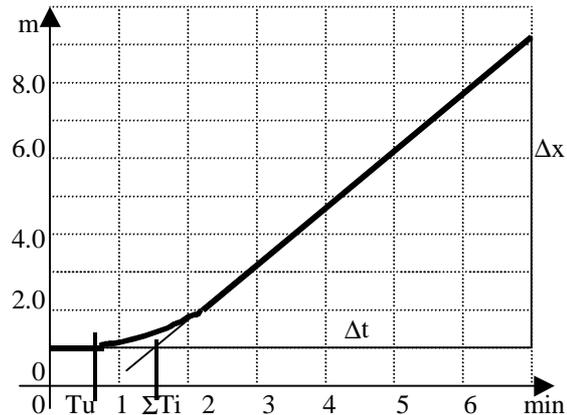
$\Sigma T_i = 1,5$  [min] (aus Graphik)

$$H = T_u / \Sigma T_i = 0,7 / 1,5 = 0,47$$

da  $H > 0,43$  ist, berechnen wir

$$T_g = (\Sigma T_i - T_u) / 0,57 = (1,5 - 0,7) / 0,57$$

$$T_g = 1,4$$
 [min]



$$S = T_u / T_g = 0,7 / 1,4 = 0,5$$

$$n = [10 \cdot S + 1]_{\text{runden}} = [10 \cdot 0,5 + 1]_{\text{runden}} = 6$$

$$T = \Sigma T_i / n = 1,5 / 6 = 0,25$$
 [min]

Die Sprungantwort auf einen Eingangssprung  $U_0=1,5$  [KW] bei Startpegel 0,75 [m] nach Zeit  $t=5$  [min] ist

$$x(t) = x_0 + K_I \cdot U_0 \cdot \int_0^t (1 - e^{-u/T})^n = 0,75 + 0,364 \cdot 1,5 \cdot \int_0^5 (1 - e^{-u/0,25})^6 du$$

Der Wert lässt sich durch numerische Integration mit dem Taschenrechner berechnen.

## 7. Kontinuierliche Regler

Kontinuierliche Regler arbeiten entweder analog oder digital. Die Taktzeit  $\tau$  eines digitalen kontinuierlichen Reglers muss klein sein gegenüber der Zeitkonstantensumme  $\Sigma T_i$  der Regelstrecke ( $\tau \leq 0,1 \cdot \Sigma T_i$ ). Allen hier behandelten Reglern gemeinsam ist die Reglerverstärkung  $K_{PR}$ . Sie ist dimensionsbehaftet.

Im Zähler steht die Dimension der Stellgröße  $y$ , im Nenner die der Regelgröße  $x$ . Beide Größen können mit absoluten Dimensionen auftreten ( $\text{dim}y$ ,  $\text{dim}x$ ) oder mit relativen ( $\%x$ ,  $\%y$ ).

Die 4 möglichen Dimensionspaarungen sind:

$$K_{PR} \left[ \frac{\text{dim } y}{\text{dim } x} \right] \text{ oder } K_{PR} \left[ \frac{\% y}{\% x} \right] \text{ oder } K_{PR} \left[ \frac{\text{dim } y}{\% x} \right] \text{ oder } K_{PR} \left[ \frac{\% y}{\text{dim } x} \right].$$

Prozentzahlen bei der Stellgröße beziehen sich auf den Stellbereich des Aktors, bei der Regelgröße auf den eingestellten Messbereich des Messumformers. Die Dimension der Reglerverstärkung  $K_{PR}$  ist immer invers zur Streckenverstärkung  $K_{PS}$ . Das Produkt heißt **dimensionslose Kreisverstärkung  $V_0$** .

$$V_0 = K_{PR} \cdot K_{PS}$$

## 7.1 P-Regler

Der P-Regler ist ein einfacher Verstärker. Als Analogregler ist er ein Operationsverstärker oder ein Transistor. Digital ist er eine einfache Multiplikation. Der P-Regler ist billig, robust, aber in manchen Anwendungen ungenau. Die Stellgröße  $y$  berechnet sich nach der Geradengleichung:

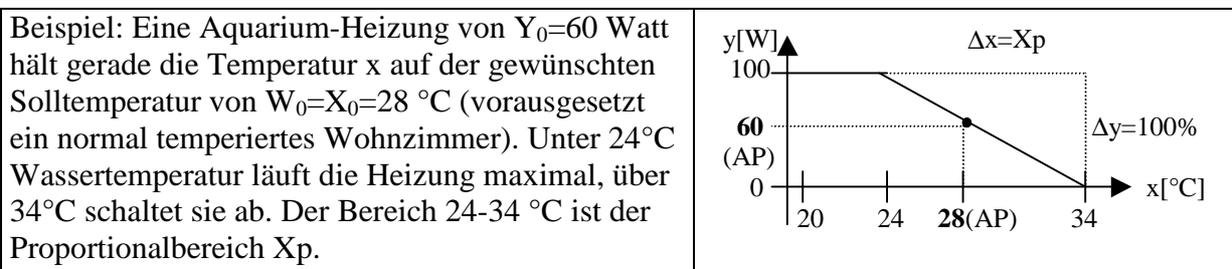
$$y = Y_0 + K_{PR} \cdot xd = Y_0 + K_{PR} (W - x) = Y_0 + \Delta y$$

$y$	Stellgröße am Reglerausgang, die den Aktor ansteuert, z.B. ein Ventil
$Y_0$	Arbeitspunkt der Stellgröße. Der P-Regler addiert bzw. subtrahiert lediglich ein proportional von $xd$ abhängiges $\Delta y$ zum bzw. vom Arbeitspunkt $Y_0$
$xd=W-x$	Regeldifferenz zwischen Soll- und Istwert der Regelgröße
$W$	Sollwert, der von der Regelgröße eingehalten werden soll
$x$	gemessener Istwert der Regelgröße
$\Delta y$	Änderung der Stellgröße, Abweichung vom Arbeitspunkt

$F(p)=K_{PR}$  Komplexe Übertragungsfunktion des P-Reglers ist eine Konstante

$X_p$  Proportionalbereich: Der Abschnitt der  $x$ -Achse, in dem eine Änderung  $\Delta x$  der Regelgröße  $x$  zu einer proportionalen Änderung  $\Delta y$  der Stellgröße  $y$  führt

AP Arbeitspunkt des P-Reglers mit den Werten  $W_0=X_0$  und  $Y_0$ . Man sucht die Stellgröße  $Y_0$ , die bei ungestörtem Betrieb die Regelgröße  $x$  genau auf dem Arbeitspunktsollwert  $W_0$  hält ( $W_0=X_0$ ).



Der Zusammenhang zwischen Verstärkung  $K_{PR}$  und Proportionalbereich  $X_p$  ist aus der obigen Graphik ablesbar, wenn man ausschließlich relative Dimensionsangaben benutzt:

$$K_{PR} \left[ \frac{\% y}{\% x} \right] = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{100[\% y]}{X_p[\% x]}$$

Der im Messumformer vorgegebene Messbereich der Temperatur sei 20–40°C. Dann sind die 10 Grad von 24 bis 34 Grad gerade 50% des Messbereichs, d.h.  $X_p=50[\%x]$ , und  $K_{PR}=100[\%y]/50[\%x]=2 [y / \%x]$ . Wünscht man die absoluten Einheiten der Reglerverstärkung, dann erhält man  $K_{PR}= 100 [W] / 10 [K] = 10 [W/K]$ .

P-Regler sind nur im Arbeitspunkt genau. Sie arbeiten jedoch unterschiedlich gut mit unterschiedlichen Typen von Regelstrecken zusammen. **Die Kombination P-Regler mit I-Strecken ist ein gutes Gespann.** Die Kombination P-Regler mit P-Strecken ist nur zu empfehlen, wenn der P-Regler aus Preisgründen genommen werden muss (Billigregler)

Wir stellen uns einen P-Regler im Arbeitspunkt vor ( $W=W_0$  und  $y=Y_0$ ). Liegen keine Störungen vor, dann stellt sich  $x=X_0=W_0$  ein, d.h. der Regler arbeitet genau. Es gilt  $xd=W-x=0$  im Arbeitspunkt bei fehlenden Störungen. Bei einer Störung  $z$  (angegeben in der Dimension von  $y$ ) oder einer gewünschten Sollwertänderung  $\Delta W$  (Abweichung vom Arbeitspunktsollwert  $W_0$ ) ergeben sich folgende **ständige Regelabweichungen  $xd$  des P-Reglers**:

P-Regler mit I-Strecke bzw. ITn-Strecke	$xd = z / K_{PR}$	Abweichungen treten nur bei Störung $z$ auf
P-Regler mit PTn- oder PT <sub>1</sub> Tt-Strecke	$xd = \frac{1}{1+V_0} \Delta W + \frac{K_{PS}}{1+V_0} z$	Abweichungen bei Störung $z$ und bei Sollwertänderung $\Delta W$

## 7.2 PID-Regler (Proportional + Integrierend + Differenzierend)

Der PID-Regler ist der Standardregler der Industrie, aus dem sich leicht auch PI- oder PD-Regler konfigurieren lassen, indem man einen Part weglässt, d.h. ausschaltet. Die Stellgröße setzt sich aus 3 Anteilen zusammen, die addiert werden - der P-, der I- und der D-Anteil. Man unterscheidet zwei Typen von PID-Reglern, den *idealen PID-Regler* und den *realen PID-Regler* (auch PIDT<sub>1</sub>-Regler genannt).

Der reale PID-Regler baut den differenzierenden Anteil der Stellgröße  $y$  e-kurvenförmig ab, gesteuert durch die Zeitkonstante  $T_1$ . Seine DGL ist:

$$T_1 \dot{y}(t) + y(t) = K_{PR} \left[ xd(t) + \frac{1}{T_N} \int_0^t xd(u) du + T_V \dot{xd}(t) \right]$$

$T_1$	Reglerparameter, Zeitkonstante des D-Anteils, der sich mit $e^{-t/T_1}$ abbaut
$y$	berechnete Stellgröße, d.h. das Ausgangssignal des Reglers
$K_{PR}$	Verstärkung, Reglerparameter, steuert den P-Anteil, aber auch I- und D-Anteil
$T_N$	<b>Nachstellzeit</b> , Reglerparameter, steuert den I-Anteil,
$T_V$	<b>Vorhaltezeit</b> , Reglerparameter, steuert den D-Anteil,
$xd=W-x$	Regeldifferenz zwischen Soll- und Istwert
$t$	die ablaufende Zeit

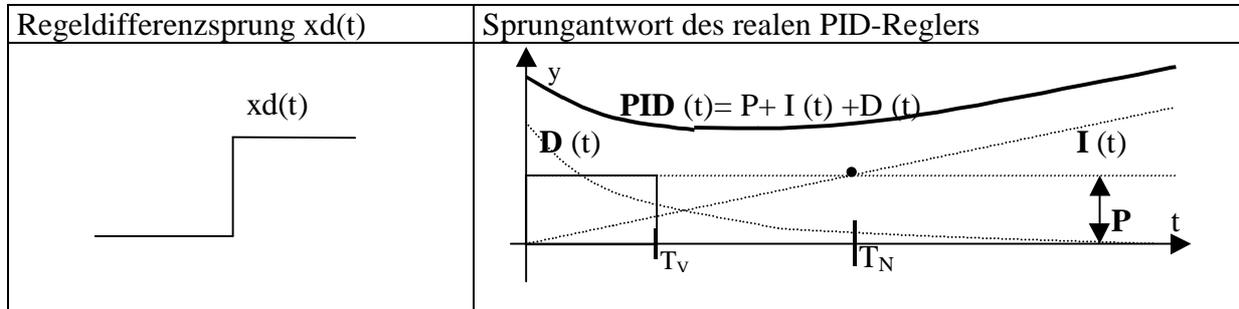
( Bei manchen Reglerherstellern wird nicht  $T_1$  als Reglerparameter des realen PID-Reglers benutzt, sondern die **Vorhalteverstärkung**  $VV = T_V / T_1$  . )

Der DIN-Algorithmus des idealen PID-Reglers ist eine in der Regelung häufig benutzte digitale Berechnungsformel für die Stellgröße  $y$ . Der neue Wert der Stellgröße,  $y_{i+1}$ , berechnet sich aus dem alten Wert  $y_i$  durch Addition eines Inkrements  $\Delta y$ :

$$y_{i+1} = y_i + K_{PR} \left[ (xd_{i+1} - xd_i) + \left( \frac{T_A}{T_N} xd_i \right) + \frac{T_V}{T_A} (xd_{i+1} - 2xd_i + xd_{i-1}) \right]$$

i ist eine fiktive Tastzeitnummerierung  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$

$T_A$  Tastzeit, d.h. die Zeit von einer Messung bis zur nächsten Messung der Regelgröße



Der I-Anteil benötigt die **Nachstellzeit**  $T_N$ , um auf denselben Wert anzuwachsen, den der P-Anteil sofort und konstant liefert (siehe Graphik). Die *Wirkung* des D-Anteils insgesamt von  $t=0$  bis  $t \rightarrow \infty$  ist gleich der Wirkung des P-Anteils über die **Vorhaltezeit**  $T_V$ . Unter Wirkung (action) versteht man hier das Integral. Die Fläche unter der  $D(t)$ -Kurve ist gleich der Fläche des Rechtecks mit Höhe  $P$  und Breite  $T_V$  (siehe links unten in der Graphik).

P-Anteil des PID-Reglers	$P = K_{PR} \cdot xd$	konstant, wenn $xd$ konstant
I-Anteil des PID-Reglers	$I(t) = \frac{K_{PR} \cdot xd}{T_N} \cdot t$	Gerade, wenn $xd$ konstant
D-Anteil des realen PID-Reglers	$D(t) = \frac{K_{PR} \cdot T_V}{T_1} e^{-t/T_1}$	$DT_1$ -Kurve, d.h. zuerst ein Sprung und danach ein exponentielles Absinken

Die komplexe Übertragungsfunktion des PID-Reglers ist  $F(p) = K_{PR} \left( 1 + \frac{1}{T_N p} + T_V p \right)$

## 7.3 Reglerauswahl und Reglereinstellung

### 7.3.1 Reglerauswahl

Strecken mit I-Anteil bzw. ohne I-Anteil verlangen unterschiedliche Regler (**I** beißt sich mit **I**). Bei rauen Messwerten der Regelgröße (z.B. Rauschen oder häufige Störungen) verzichtet man besser auf den differenzierenden Anteil. Nimm deshalb

- den PD-Regler für I- oder ITn-Strecken bei glattem Messwertverlauf
- den P-Regler für I- oder ITn-Strecken bei rauem Messwertverlauf
- den PID-Regler für P-, PTn- oder PT<sub>1</sub>Tt-Strecken bei glattem Messwertverlauf
- den PI-Regler für P-, PTn- oder PT<sub>1</sub>Tt-Strecken bei rauem Messwertverlauf

### 7.3.2 Reglereinstellung nach Ziegler-Nichols

Bei P-, PTn-, PT<sub>1</sub>Tt- und ITn-Strecken, d.h. bei so ziemlich allen Regelstrecken, ist dieses Verfahren anwendbar. Man setzt einen P-Regler in den Regelkreis ein. Dann gibt man eine Störung auf, um den Regelkreis in Schwingung zu versetzen. Die Schwingung sollte um den Arbeitspunkt oder im Arbeitsbereich erfolgen. Eine Störung kann sein:

- eine plötzliche sprungartige Sollwertänderung
- oder eine von außen angreifende sprungartige Störung, z.B. das Öffnen eines Ventils.

<p>Man verstärkt nach und nach die Reglerverstärkung <math>K_{PR}</math> des eingebauten P-Reglers, bis eine Störantwort <math>x(t)</math> 3 bis 4 deutliche Schwingungen zeigt. Die Verstärkung <math>K_{PR}</math>, bei der das eintritt, wird kritische Verstärkung <math>K_{PR\ kr}</math> genannt, die zugehörige Schwingungsperiode <math>\tau_{kr}</math>.</p>	
---	--

Ziegler-Nichols geben folgende Tabelle zur Berechnung der Reglerparameter an:

Reglerart	$K_{PR}$	$T_N$	$T_V$	für den Streckentyp
P	$K_{PR\ kr} / 2,0$	$\infty$	0	I- oder ITn-Strecken
PI	$K_{PR\ kr} / 2,2$	$\tau_{kr} \cdot 0,85$	0	P-, PTn-, PT <sub>1</sub> Tt-Strecken
PID	$K_{PR\ kr} / 1,7$	$\tau_{kr} \cdot 0,50$	$\tau_{kr} \cdot 0,125$	P-, PTn-, PT <sub>1</sub> Tt-Strecken
PD	$K_{PR\ kr} \cdot 0,788$	$\infty$	$\tau_{kr} \cdot 0,068$	I- oder ITn-Strecken

Beispiel:  $K_{PR\ kr} = 11,8$  [W/K],  $\tau_{kr} = 27$  [s]. Wir wollen einen PID-Regler konfigurieren.

$$K_{PR} = K_{PR\ kr} / 1,7 = 11,8 / 1,7 = 6,94 \text{ [W/K]}$$

$$T_N = \tau_{kr} \cdot 0,50 = 27 \cdot 0,5 = 13,5 \text{ [s]}$$

$$T_V = \tau_{kr} \cdot 0,125 = 27 \cdot 0,125 = 3,3 \text{ [s]}$$

Wir wollen einen PD-Regler konfigurieren.

$$K_{PR} = K_{PR\ kr} \cdot 0,788 = 11,8 \cdot 0,788 = 9,30 \text{ [W/K]}$$

$$T_N = \infty \quad (\text{Unendlich ist bei Industrieregeln meist } T_N = 10000 \text{ Sekunden})$$

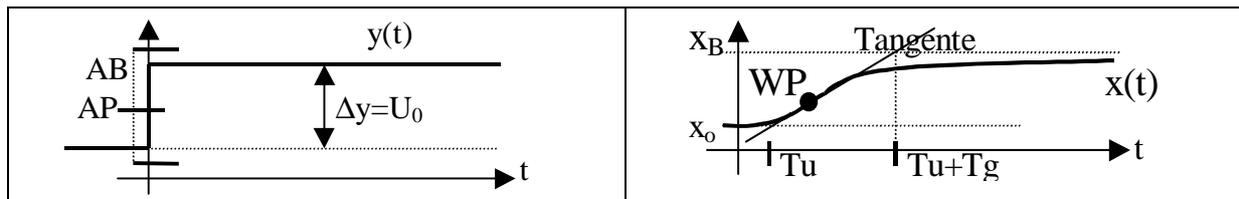
$$T_V = \tau_{kr} \cdot 0,068 = 27 \cdot 0,068 = 1,8 \text{ [s]}$$

<p>Alle nach Ziegler-Nichols eingestellten Regler schwingen etwa 20% über (bezogen auf die Höhe <math>\Delta W</math> eines auslösenden Sollwertsprungs, den wir gleich 100% setzen). Das entspricht der</p>		
--	--	--

gerade noch zulässigen dimensionslosen Dämpfung  $D=0,45$  (kleinere Dämpfungen sind nicht erwünscht). Durch Verkleinern des  $K_{PR}$  des Reglers (z.B. auf die Hälfte) kann die Höhe des Überschwingens stark vermindert werden, aber auf Kosten der Dynamik. Der Regler arbeitet jetzt etwas langsamer.

### 7.3.3 Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick

Diese Art der Reglereinstellung funktioniert nur bei Strecken mit Ausgleich (P-, PTn-, PT<sub>1</sub>Tt-Strecken), und zusätzlich muss der Ausgleich im Arbeitsbereich bzw. in der Nähe des Arbeitspunktes erfolgen. Man nimmt die Regelstrecke aus dem Regelkreis heraus, d.h. man betreibt sie ohne Regler. Man gibt einen Stellgrößensprung  $\Delta y=U_0$  auf, der den Arbeitspunkt AP bzw. Arbeitsbereich AB abdeckt, und nimmt die Sprungantwort als Messkurve  $x(t)$  auf.



$U_0$  ist der Stellgrößenprung, z.B. Erhöhung der Heizleistung um  $U_0=500$  [W]  
 $x_0$  ist der alte Beharrungswert, z.B.  $43$  [°C] bei der alten Heizleistung  
 $x_B$  ist der neue Beharrungswert, z.B.  $84$  [°C] bei der neuen Heizleistung  
 WP ist der Wendepunkt der  $x(t)$ -Kurve mit der eingezeichneten Tangente  
 $T_u$  ist die Verzugszeit, z.B.  $11$  [s] am Schnittpunkt Tangente und  $x_0$   
 $T_u+T_g$  ist die Zeit am Schnittpunkt Tangente und  $x_B$   
 $T_g$  ist die Ausgleichszeit, z.B.  $89$  [s]. Es gilt  $T_g = (T_u+T_g) - T_u$

$$K_{PS} = \frac{x_B - x_0}{U_0} = \frac{84 - 43}{500} = 0,082 \left[ \frac{K}{W} \right] \quad \text{ist die Streckenverstärkung}$$

$$V_0 = K_{PS} \cdot K_{PR} = 0,082 \left[ \frac{K}{W} \right] \cdot K_{PR} \left[ \frac{W}{K} \right] \quad \text{ist die dimensionslose Kreisverstärkung}$$

Chien, Hrones und Reswick geben eine Tabelle vor, in der für einen P-, PI- oder PID-Regler Werte für die Größen " $V_0 T_u / T_g$ ", " $T_N$ " und " $T_V$ " vorgegeben werden. " $T_N$ " und " $T_V$ " sind bereits Reglerparameter. Den dritten Reglerparameter, die Reglerverstärkung  $K_{PR}$ , berechnet man dann aus dem Tabellenwert von " $V_0 T_u / T_g$ ".

Weiterhin unterscheiden die Autoren die Regleranwendung und die Überschwingweite:

- **Führungsregelung** heißt, dass hauptsächlich einem sich ändernden Sollwert nachgefahren werden soll
- **Konstantregelung** heißt, dass bei vorwiegend konstantem Sollwert Störungen ausgeglet werden sollen.
- **0% Überschwingen** bedeutet einen langsamen Regler ohne Überschwingen (hohe Dämpfung von etwa  $D=0,8$ )
- **20% Überschwingen** bedeutet einen schnellen Regler mit etwa 20% Überschwingen, bezogen auf die Höhe einer sprunghaften Sollwertänderung (niedrige Dämpfung von etwa  $D=0,45$ )

**Tabelle von Chien, Hrones und Reswick zur Reglereinstellung**

Regler		0% Überschwingen		20% Überschwingen	
Typ	Parameter	Konstantreg.	Führungsreg.	Konstantreg.	Führungsreg.
P	$V_0 T_u / T_g$	0,3	0,3	0,7	0,7
PI	$V_0 T_u / T_g$	0,6	0,35	0,7	0,6
	$T_N$	$4 \cdot T_u$	$1,2 \cdot T_g$	$2,3 \cdot T_u$	$1,0 \cdot T_g$
PID	$V_0 T_u / T_g$	0,95	0,6	1,2	0,95
	$T_N$	$2,4 \cdot T_u$	$1,0 \cdot T_g$	$2,0 \cdot T_u$	$1,35 \cdot T_g$
	$T_V$	$0,42 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$	$0,42 \cdot T_u$	$0,47 \cdot T_u$

Beispiel: Wir wollen einen PID-Regler für Führungsregelung und ohne Überschwingen konfigurieren (parametrieren). Die Werte für  $K_{PS}$ ,  $T_g$  und  $T_u$  siehe weiter oben:

$$K_{PR} = \frac{(V_0 T_u / T_g) \cdot T_g}{K_{PS} \cdot T_u} = \frac{0,6 \cdot 89}{0,082 \cdot 11} = 59,2 \left[ \frac{W}{K} \right] \quad \text{Reglerverstärkung (Wert 0,6 aus Tabelle)}$$

$$T_N = 1,0 \cdot T_g = 89 \text{ [s]} \quad \text{Nachstellzeit (Wert 1,0 aus Tabelle)}$$

$$T_V = 0,5 \cdot T_u = 0,5 \cdot 11 = 5,5 \text{ [s]} \quad \text{Vorhaltezeit (Wert 0,5 aus Tabelle)}$$

**Sonderfall:** Eine PT<sub>1</sub>-ähnliche Regelstrecke hat entweder eine Verzugszeit  $T_u=0$  oder zumindest eine sehr kleine Verzugszeit  $T_u$ . Das würde nach obiger Formel für  $K_{PR}$  zu einer unsinnig hohen Reglerverstärkung führen, die die Regelung instabil macht. Es ist deshalb angebracht, die Reglerverstärkung nach oben zu begrenzen.

Ist $T_u < 0,1 \cdot T_g$ , dann liegt dieser Sonderfall vor, und wir berechnen $K_{PR}$ nach der rechts stehenden Formel	$K_{PR} = \frac{(V_0 T_u / T_g) \cdot 10}{K_{PS}}$
---	--

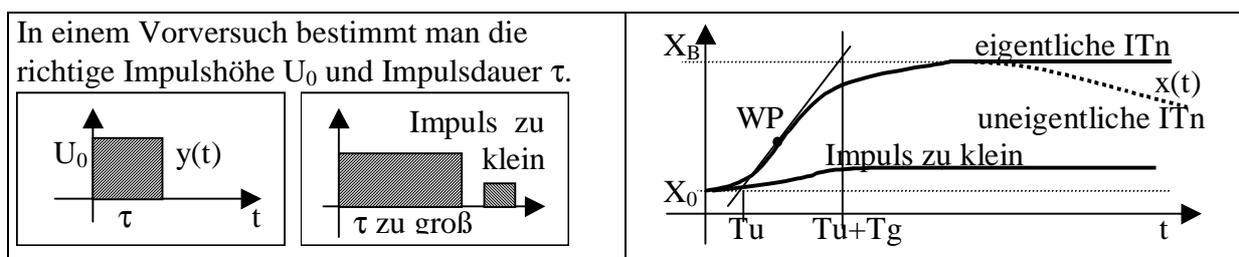
Beispiel zum Sonderfall:  $T_u=6$  [s],  $T_g=89$  [s],  $K_{PS}=0,082$  [K/W]. Wir wollen den gleichen PID-Regler wie oben parametrieren:

$$K_{PR} = \frac{0,6 \cdot 10}{0,082} = 73,7 \left[ \frac{W}{K} \right] \quad , \quad T_N = 1,0 \cdot T_g = 89 \text{ [s]} \quad , \quad T_V = 0,5 \cdot T_u = 0,5 \cdot 6 = 3 \text{ [s]} .$$

### 7.3.4 Reglereinstellung nach Impulsantwort

I-Strecken regelt man bei glattem Messwertverlauf am besten mit einem PD-Regler. Die Impulsantwort einer echten IT<sub>n</sub>-Strecke ähnelt der Sprungantwort einer PT<sub>n</sub>-Strecke. Es gibt auch unechte IT<sub>n</sub>-Strecken (eigentlich PT<sub>n</sub>-Strecken mit zu stark wirkenden Aktoren, so dass sich im Messbereich kein Beharrungswert einstellen kann). Auch diese regelt man wie echte IT<sub>n</sub>-Strecken.

Das Aufnehmen der Impulsantwort erfolgt bei abgekoppelter Regelstrecke. Die Impulsantwort sollte im Arbeitsbereich liegen bzw. der Arbeitspunkt etwa auf halber Höhe der Impulsantwort. Man gibt einen Stellgrößenimpuls auf und registriert die Antwortkurve der Regelstrecke, z.B. schaltet man 1,5 Sekunden lang ( $\tau=1,5$  s) eine Pumpe mit der Leistung 250 W ein ( $U_0=250$  W) und misst die Pegelerhöhung im Tank. Die Impulsdauer darf maximal 1/20 der Zeitkonstantensumme betragen. Eine gute Näherung ist  $\tau \leq (T_u+T_g)/20$ . Da man die Summe aus Verzugszeit und Ausgleichzeit  $T_u+T_g$  erst kennen muss, bedarf es einiger Vorversuche, bis man die richtige Impulshöhe und Impulsdauer gefunden hat.



Hat man den richtigen Impuls ermittelt, dann registriert man die Impulsantwort und bestimmt aus der Graphik  $x_0$ ,  $x_B$ ,  $T_u$ ,  $T_g$ . Dabei ist:

$U_0$  die Impulshöhe, z.B. 250 W Pumpenleistung

t die Impulsdauer, z.B. 1,5 Sekunden  
 $U_0 \cdot t$  die Impulsfläche (in der Graphik oben links schraffiert), im Beispiel 375 Ws  
 $x_0, x_B$  alter und neuer Beharrungswert (bzw. Maximum bei einer uneigentlichen ITn), z.B.  $x_0=15,0$  cm,  $x_B=18,3$  cm  
 $T_u$  Verzugszeit, z.B. 2,6 Sekunden (Schnittpunkt Wendepunkt tangente mit  $x_0$ )  
 $T_g$  Ausgleichszeit, z.B. 32,5 s (aus Schnittpunkt Wendepunkt tangente mit  $x_B$  gewinnt man  $T_u+T_g$ , dann minus  $T_u$  liefert  $T_g$ )

Berechne  $K_I = \frac{x_B - x_0}{U_0} = \frac{18,3 - 15,0}{375} = 0,0088 \left[ \frac{cm}{Ws} \right]$  Integrierkonstante

Die Tabelle von Hall und v.Weber liefert für PD-Regler die beiden Reglerparameter  $K_{PR}$  und  $T_V$  einmal ohne Überschwingen (0%) und einmal mit 20% Überschwingen.

	0 % Überschwingen	20 % Überschwingen
$K_{PR}$	$\frac{1,17 (1 - (T_u / T_g)^2) 0,347}{K_I (T_u + T_g)}$	$\frac{1,3 + (T_g / T_u^*)^2 0,006}{K_I (T_u + T_g)}$
$T_V$	$(T_u + T_g)(1 - 0,132 (T_u / T_g))(0,4 + (T_g / T_u^*)^2 0,00096)$	$(T_u + T_g) 0,228$

$T_u^* = \begin{cases} T_u, & \text{falls } T_u \geq 0,05 T_g \\ 0,05 T_g & \text{sonst} \end{cases}$  ist für den Sonderfall eines zu kleinen  $T_u$ -wertes zu nehmen

Beispiel: Ein PD-Regler mit 0% Überschwingen soll für die obigen Beispielzahlen parametrisiert werden.

$K_{PR} = \frac{1,17 (1 - (2,6 / 32,5)^2) 0,347}{0,0088 \cdot 35,1} = 3,78 \left[ \frac{W}{cm} \right]$  Reglerverstärkung

$T_V = 35,1 (1 - 0,132 (2,6 / 32,5))(0,4 + (32,5 / 2,6)^2 0,00096) = 19,08 [s]$  Vorhaltezeit

Mit dem so parametrisierten PD-Regler können Sie den Pegelstand im Tank auf seinem Sollwert halten

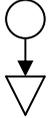
### Einige Kennbuchstaben für MSR-Technik

	Erstbuchstabe	Ergänzungsbuchstabe	Folgebuchstabe		Erstbuchstabe	Ergänzungsbuchstabe	Folgebuchstabe
<b>A</b>	Spätere Normung		Grenzwertmeldung, Alarm	<b>P</b>	Druck		
<b>B</b>	Spätere Normung			<b>Q</b>	Qualitätsgrößen (Analysen)	Integral Summe	Nicht erlaubt
<b>C</b>	Spätere Normung		Regelung Steuerung	<b>R</b>	Strahlungsgrößen		Registrierung Speicherung
<b>D</b>	Dichte	Differenz	Nicht erlaubt	<b>S</b>	Geschwindigkeit Drehzahl Frequenz		Schaltung (nicht fortlaufende Steuerung)
<b>E</b>	Elektrische Größe			<b>T</b>	Temperatur		Meßumformung (Transmitting)
<b>F</b>	Durchfluss	Verhältnis	Nicht erlaubt	<b>U</b>	Zusammengesetzte Größen		

<b>G</b>	Abstand, Länge, Stellung			<b>V</b>	Viskosität		
<b>H</b>	Handeingabe, Handeingriff			<b>W</b>	Gewichtskraft Masse		
<b>I</b>	Spätere Normung			<b>X</b>	Sonstige Größe		
<b>J</b>	Spätere Normung	Abfragen	Nicht erlaubt	<b>Y</b>	Frei verfügbar, falls X belegt ist		
<b>K</b>	Zeit			<b>Z</b>	Spätere Normung		
<b>L</b>	Stand (auch von Trennschicht)			+			
<b>M</b>	Feuchte			/			Oberer Grenzwert (*)
<b>N</b>	Frei verfügbar, falls X belegt ist			-			Zwischenwert (*)
<b>O</b>	Frei verfügbar, falls X belegt ist		Sichtzeichen Ja-Nein-Aussage				Unterer Grenzwert (*)

(\*) Den Buchstaben O, S, Z, A nachgestellt. \* und – auch zur Kennzeichnung „offen“ und „zu“ bzw. für „ein“ und „aus“ (In ISO dafür H und L vorgesehen (High, Low).)

### Einwirkung auf die Strecke

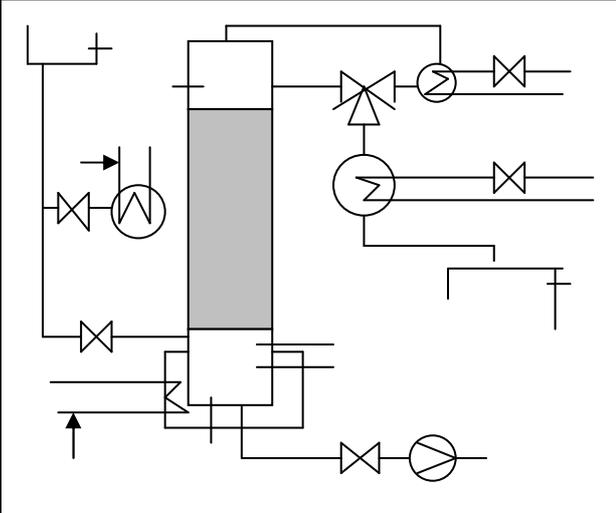
Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
	Stellort, Stellglied (auch vereinfachte Darstellung für Stellgeräte)		Stellgerät bleibt bei Ausfall der Hilfsenergie in der vorgegebenen Stellung
	Stellgerät (mit Hilfsenergie oder selbsttätig)		Stellgerät bleibt bei Ausfall der Hilfsenergie zunächst in vorgegebener Stellung. Pfeil gibt die zulässige Driftrichtung an
	Bei Ausfall der Hilfsenergie nimmt das Stellgerät die Stellung für maximalen Massenstrom oder Durchfluss an		Bei Ausfall der Hilfsenergie nimmt das Stellgerät die Stellung für minimalen Massenstrom oder Durchfluss an

### Übung 1 Regelungstechnik Prof.Dr.S.v.Weber, HS Furtwangen, FB Maschinenbau und Umwelt

1. Zeichnen Sie einen Rührkessel mit Zulauf, Ablauf, ventilsteuerter Dampfheizung und Druckkontrolle über Inertgaszuführung und ventilsteuertem Auslass mit allen RI-Symbolen.

2. Zeichnen Sie das Blockschaltbild eines Regelkreises mit Regler, Regelstrecke, Rückführung, y- und x-Störungen, sowie der Aufschaltung einer Hauptstörgröße am Reglereingang

**3.** Eine Destille soll Schmieröl aus Waschbenzin entfernen. In den beiden Anfahrzuständen soll befüllt und hochgeheizt werden. Im Dauerbetrieb soll bei Bedarf nachgefüllt werden. Die Temperatur ist zu regeln (2-Punkt). Das 2-Wege-Ventil V4 arbeitet selbsttätig im Verhältnis 1:10, wenn es angesteuert wird (V4=1). Wenn Tank A leer oder Tank B voll ist, soll abgefahren werden (leeren) und zurück zum Warten (Start/Stop). Pegelmelder melden Berührung mit 1. T=1, wenn Kopftemperatur  $\geq$  Solltemperatur. Pumpe, Ventile, Heizungen arbeiten bei 1.



- Zeichnen Sie den Mealy-Graphen und den DIN-Graphen
- Entwerfen Sie eine Bedientafel mit Tastern und Meldeleuchten
- Programmieren Sie die Taktkette (Warten, Füllen, Hochheizen, Betrieb, Abfahren)
- Programmieren Sie vom Meldeteil die Warten- und die Betriebslampe
- Programmieren Sie im Ausgabeteil Hz1 und Hz2
- Zeichnen Sie die elektropneumatische Ansteuerung des pneumatisch betriebenen Füllventils V1. Es wird von einem einfach wirkenden Pneumatikzylinder angetrieben. Benutzen Sie ein 3/2-Wegeventil.

**4.** Linearisieren Sie die Ventilkennlinie mittels Ausgleichgerade nach der Kleinste-Quadrate-Methode im Arbeitsbereich 20-80% Hub.

y Hub %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
x Kv m <sup>3</sup> /h	0	0,90	1,75	2,55	3,30	4,00	4,65	5,25	5,80	6,30	6,75

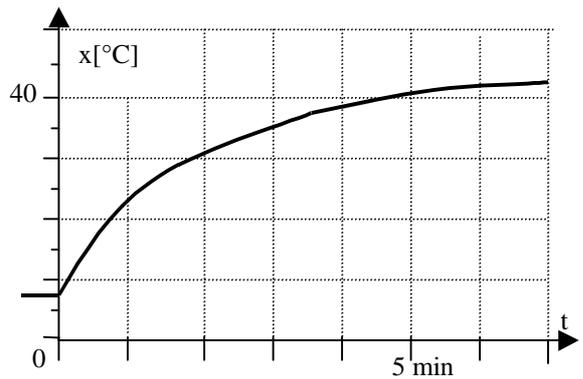
Die Formeln zur Berechnung der Koeffizienten  $K_p$  und  $X_0$  sind:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - n \cdot \bar{y} \cdot \bar{x}}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \cdot \bar{y}^2} \quad X_0 = \bar{x} - K_p \bar{y}$$

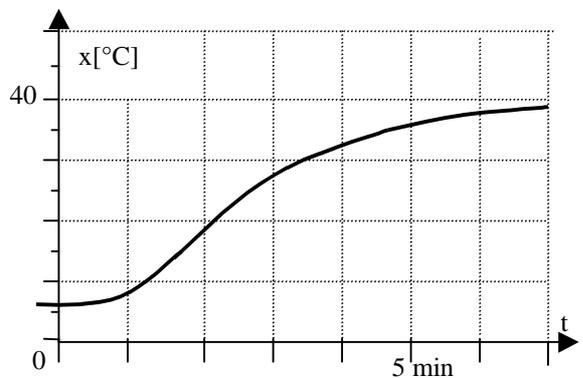
Machen Sie eine Skizze der Geraden  $x=X_0+K_p y$  sowie der gesamten Kennlinie. Zeichnen Sie zum Vergleich die Linearisierung im Arbeitspunkt AP=50% Hub mittels Tangente ein.

**5.** Entwerfen Sie eine Anlage zur Bereitstellung von 42°C warmer 10%-iger Sole in einer Reha-Klinik. Ca. 20 Bäder a 300 l pro Tag, bis zu 3 Wannen parallel. Machen Sie eine Skizze mit RI-Symbolen und Apparaturen und geben Sie einen Steuergraphen an.

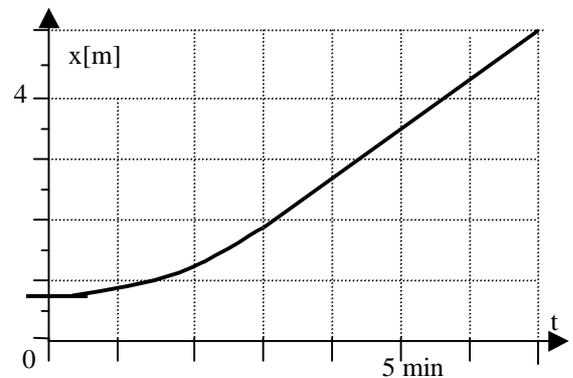
1. Identifizieren Sie die Regelstrecke nach der rechts abgebildeten Sprungantwort auf einen Sprung der Höhe  $U_o=4$  [KW].  
 Zeichnen und beschriften Sie das Blockschaltbild.  
 Geben Sie die DGL und die Übertragungsfunktion  $F(p)$  an. Berechnen Sie die Temperatur nach  $t=4$  min für Starttemperatur  $x_o=15$  °C und  $U_o=3$  [KW].  
 Parametrieren Sie einen PID-Regler nach Chien, Hrones, Reswick für Führung und ohne Überschwingen



2. Identifizieren Sie die Regelstrecke nach der rechts abgebildeten Sprungantwort auf einen Sprung der Höhe  $U_o=10$  [KW].  
 Zeichnen und beschriften Sie das Blockschaltbild.  
 Geben Sie die Übertragungsfunktion  $F(p)$  an. Berechnen Sie die Temperatur nach  $t=5$  min für Starttemperatur  $x_o=25$  °C und  $U_o=8$  [KW].  
 Parametrieren Sie einen PID-Regler nach Chien, Hrones, Reswick für Konstantregelung und 20% Überschwingen

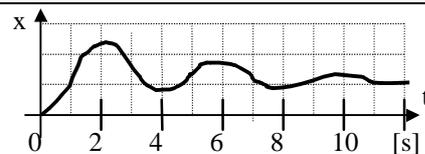


3. Identifizieren Sie die Regelstrecke nach der rechts abgebildeten Sprungantwort auf einen Sprung der Höhe  $U_o=40$  [%] Ventilhub.  
 Zeichnen und beschriften Sie das Blockschaltbild.  
 Geben Sie die Übertragungsfunktion  $F(p)$  an. Berechnen Sie die Pegelhöhe  $x$  zur Zeit  $t=14$  min durch Weiterführung der Asymptote.  
 Ein Schwingversuch nach Ziegler Nichols ergab 3 ausgeprägte Schwingungen bei  $K_{pr\ kr} = 127$  [%/m] mit Periode  $\tau=0.34$  [min]. Parametrieren Sie einen PD-Regler.



4. Geben Sie die Übertragungsfunktion  $F_{PT1}(p)$  eines  $PT_1$ -Reglers ( $K_{PR}=4.2$  [W/K],  $T_1=12$  [s]),  $F_{PTn}(p)$  einer  $PTn$ -Regelstrecke ( $K_{PS}=0.87$  [K/W],  $n=5$ ,  $T=4.4$  [s]) und  $F_{PT2}(p)$  einer  $PT_2$ -Rückführung ( $K_p=1$ ,  $T=1.2$  [s]) an. Setzen Sie die Namen  $F_{PT1}(p)$ ,  $F_{PTn}(p)$  und  $F_{PT2}(p)$  an den richtigen Stellen in die Übertragungsfunktion des Regelkreises ein.

5. Ein Dauerschwingversuch nach Ziegler und Nichols brachte bei der kritischen Verstärkung  $K_{PR\ kr} = 4,7$  [KW / (m<sup>3</sup>/h)] das Bild rechts. Bestimmen Sie  $K_{pr}$ ,  $T_n$  und  $T_v$  eines PID-Reglers



## Dictionary

Abwasserbehandlung	waste water treatment	Massenflussregelung	mass flow control
Aktor	actuator	Mehrgrößenregelung	multivariable control
Analogregler	analogue controller	Messumformer	measuring transformer
Antwortverhalten	response behaviour	Montageplanung	assembly planning
Arbeitspunkt	operating point	Nachstellzeit (PID-Reg)	reset time
Aufgabenstellung	problem definition	Niveauregelung	level control
Aufheizkurve	heating-up curve	<b>Ordnung</b>	order
Aufschaltung	feedforward control	pneumatisch	pneumatic
Auftragsabwicklung	order control	Projektentwicklung	project control
Ausfall	failure	Proportionalbeiwert	proportional act. factor
Ausgleich (Strecke mit)	self-regulating process	Proportionalbereich	proportional band
<b>Bauart</b>	construction	Prozessidentifikation	process identification
Beharrungswert	steady-state value	Pumpe	pump
Beiwert	action factor	PT1-Verhalten	PT1-response
Bestimmung	determination	<b>Rauschen</b>	noise
Bimetall	bimetal	Regelaufgabe	control function
Blockschaltbild	block diagram	Regelgröße (Ist-Größe)	controlled variable
Brückenschaltung	bridge circuit	Regelkreis	closed loop
Computerauswertung	evaluation by computer	Regelschaltung	control circuit
Dämpfungskonstante	damping coefficient	Regler	controller
Dekrement	decrement	Reglerverstärkung	gain coefficient
Differenzierbeiwert	differentiating act. fac.	Rührerdrehzahlreg.	stirrer speed control
Differenzierkonstante	derivative gain	rechnerisch	algebraic, arithmetical
Dauerschwingversuch	steady-state vibration test	Schaltbild	connection diagram
Durchsatz	throughput	schwingende	oscillating, oscillatory
dynamisch	dynamic	Sonde	probe
<b>Eichung, Kalibrierung</b>	calibration	Sprungantwort	Heaviside function res- ponse
Einfachregelkreis	simple closed loop	Stabilität	stability, robustness
Einstellregeln	tuning rules	stationär	stationary
Einteilung	classification	statisch	static
elektrisch	electrical	Stellbereich	operating range
Entkopplung	decoupling	Stellgröße	control signal
Fehlererkennung	fault detection	Stellungsregler	position controller
Fließbild	flow sheet	Störungen	disturbances
Fuzzy-Regelung	fuzzy logic control	Strecke, Regelstrecke	controlled member
<b>Gerätetechnik</b>	instrumentation	Testantwort	response
gerätetechnisch	hardware	Testfunktion	test function
Glied	functional element	Totzeit	delay time
Gütekriterium	effectiveness criterion	Übersicht	review, survey
<b>Halteglied</b>	holding member	Übertragungsfunktion	transfer function
Hysterese	hysteresis	Übertragungsglied	transfer element
Impulsantwort	pulse response	Überwachung	supervision
Inbetriebnahme	initial operation	<b>Ventil</b>	valve
Industrieofen	industrial furnace	Verfügbarkeit	reliability
Integrierbeiwert	integrating act. factor	Verstärker	amplifier
Integrierkonstante	integration gain	Vorhaltezeit (PID-Reg)	rate time
Ito-Verhalten	Ito-response	<b>Wasserspeicher</b>	water storage tank
<b>Kaskadenschaltung</b>	cascade control	Wechselwirkungen	inter-system exchanges
Kennlinie	characteristic line	<b>Zeitbereich</b>	time-domain
Kessel	vessel	Zeitkonstante	time constant
konstruktiv	konstruktive	Zeitverhalten	time response
Koppelmaß	coupling measure	Ziegler-Nichols-Methode	Ziegler-Nichols design
Kraftwerk	power plant	zusammengesetzt	composite
Lastenheft	specs, specifications	Zweipunktregler	two-position controller
Linearisierung	linearisation		
Lösung	result, answer		