

VI Technologische Funktionen

20 Regelungen mit Automatisierungsgeräten

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Regelns mit Automatisierungsgeräten behandelt sowie der Entwurf und die Realisierung von einfachen Regelungsprogrammen unterschiedlicher Reglerarten gezeigt. Für die einzelnen Reglerfunktionen werden Funktionsbausteine bzw. Funktionen entwickelt, die in die eigene Programmbibliothek aufgenommen werden. Die allgemeinen regelungstechnischen Grundlagen werden vorab nur insoweit beschrieben, wie sie für das Verständnis der dargestellten Regelungsprogramme erforderlich sind.

20.1 Regelung und regelungstechnische Größen

Der Unterschied zwischen einer Steuerung und einer Regelung wurde bereits im Kapitel 1 erläutert. Eine Regelung hat die Aufgabe, die Ausgangsgröße einer Regelstrecke, die so genannte Regelgröße, auf einen von der Führungsgröße vorbestimmten Wert zu bringen und sie gegen den Einfluss von Störgrößen auf diesem Wert zu halten. Dazu muss der tatsächliche Istwert der Regelgröße fortlaufend erfasst und mit dem durch die Führungsgröße vorgegebenen Sollwert verglichen werden.

Das nachfolgende Bild zeigt das vereinfachte Schema einer geregelten Heizeinrichtung, an dem die bei einer Regelung auftretenden Grundbegriffe näher erläutert werden.

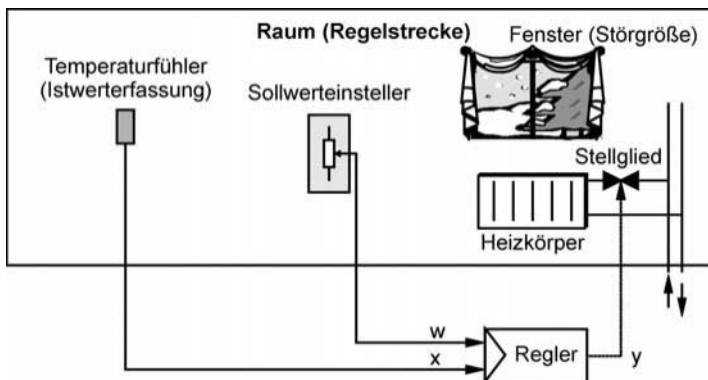


Bild 20.1:
Geregelte Raumheizung

Am Sollwertesteller wird die gewünschte Raumtemperatur, die aufgabenneutral als *Regelgröße* x bezeichnet wird, eingestellt. Die gewünschte Raumtemperatur ist der *Sollwert* x_{Soll} , welcher der Regelung als fest eingestellter Wert oder als *Führungsgröße* w vorgegeben wird. Der Temperaturfühler misst die Raumtemperatur. Ein Messwertumformer liefert dem *Regler* den *Istwert* x_{Ist} durch die so genannte *Rückführgröße* r . Der Regler ermittelt durch Subtraktion aus Führungsgröße w und Istwert x die *Regeldifferenz* $e = w - x$. Nach einem bestimmten Regelalgorithmus wird aus der Regeldifferenz e die *Stellgröße* y gebildet. Die Stellgröße y wirkt auf das Stellglied, das die Regelgröße x im Sinne einer Angleichung an die Führungs-

größe w verändert. Die Regelgröße (Temperatur) wird beispielsweise durch das Öffnen des Fensters beeinflusst. Eine solche unerwünschte Veränderung der Regelgröße wird als *Störgröße* z bezeichnet.

Insgesamt muss gewährleistet sein, dass der *Wirkungssinn* der Regelung so ist, dass bei positiver Regeldifferenz $e = w - x > 0$ die Regelgröße x vergrößert und bei negativer Regeldifferenz $e = w - x < 0$ die Regelgröße x verringert wird.

Bei einer Regelung bilden die Regelstrecken und der Regler einen geschlossenen Wirkungskreislauf, den so genannten *Regelkreis*.

20.1.1 Funktionsschema einer Regelung

Die in Bild 20.1 dargestellte Heizungsregelung kann in eine funktionale Darstellung übertragen werden, die geeignet ist, die meisten Regelkreisarten funktional zu beschreiben.

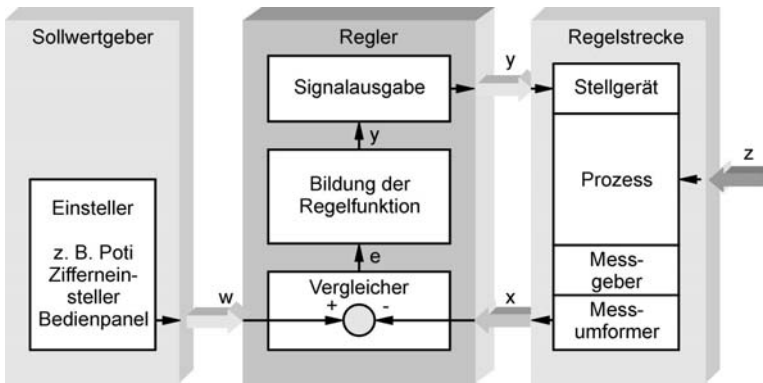


Bild 20.2:
Funktionsschema einer Regelung

Die in dem Funktionsschema verwendeten regelungstechnischen Begriffe sind nachfolgend (auch mit den englischen Begriffen) aufgelistet und erläutert. Sofern vorhanden, ist das zugehörige Kurzzeichen angegeben.

Regelgröße (process variable)	x (PV)	Ausgangsgröße der Regelstrecke, die im Sinn der Regelung beeinflusst werden soll.
Istwert (actual value)	x (PV_A)	Der Momentanwert der Regelgröße heißt Istwert.
Führungsgröße (setpoint)	w (SP)	Die Führungsgröße ist die unabhängige Größe im Regelkreis, die den gewünschten Wert bzw. Verlauf der interessierenden Prozessgröße vorgibt.
Sollwert (setpoint value)	w (SV)	Der Momentanwert der Führungsgröße wird mit Sollwert bezeichnet.
Regeldifferenz (error signal)	e (ER)	Die Regeldifferenz wird aus dem Sollwert und dem Istwert gebildet: $e = w - x$.
Stellgröße (manipulated variable)	y (LMN)	Die Stellgröße ist die Ausgangsgröße des Reglers bzw. Eingangsgröße der Strecke. Das Stellsignal kann eine binäre Größe bei unstetigen Reglern oder analoge Größe bei stetigen Reglern sein.
Störgröße (disturbance variable)	z (DISV)	Alle Einflussgrößen auf die Regelgröße – mit Ausnahme der Stellgröße – werden als Störgrößen bezeichnet.

Sollwertgeber (setpoint value unit)	Als Sollwertgeber wird das Gerät bezeichnet, mit dem die Führungsgröße gebildet wird.
Regler (closed-loop controller)	Der Regler ist die Einrichtung, die aus der Regeldifferenz e die Stellgröße y bildet.
Regelstrecke (process unit)	Die Regelstrecke ist der Anlagenteilbereich, indem die Regelgröße von der Stellgröße durch Änderung der Stellenergie oder des Massestroms beeinflusst wird.
Stellgerät (process control unit)	Als Stellgerät wird der Teil des Regelkreises bezeichnet, der zum Beeinflussen der Regelgröße des Prozesses dient. Das Stellgerät besteht oftmals aus Stellantrieb und Stellglied.
Messgeber (measuring sensor)	Gerät, das den Wert der Regelgröße misst.
Messumformer (measuring transducer)	Ein Messumformer wandelt eine physikalische Größe in ein elektrisches Signal um. Übliche Signalpegel dabei sind 4 ... 20 mA oder 0 ... 10 V.

20.1.2 Wirkungsplan einer Regelung

In der regelungstechnischen Norm DIN 19226 wird eine Regelung durch die sinnbildliche Darstellung der in einem Regelkreis unterscheidbaren Wirkungen in Form eines Wirkungsplans dargestellt. Der *Wirkungsplan* als abstrakte Darstellung einer Regelung besteht aus den Elementen Additionsstelle, Block, Wirkungslinie und Verzweigung.

- Die Additionsstelle wird mit einem Kreis gezeichnet. Bei ihr treffen zwei oder mehrere regelungstechnische Größen (Signale) pfeilgerichtet zusammen. Der Wirkungssinn der Größen wird durch ihr Vorzeichen angegeben. In der Darstellung von Regelkreisen dient die Additionsstelle meistens als Vergleichsstelle von Führungsgröße w und Regelgröße x (genauer: Rückführgröße r) zur Ermittlung der Regeldifferenz e . Additionsstellen können aber auch verwendet werden, um am Eingang der Regelstrecke die Stellgröße y mit der Störgröße z zusammenzuführen.
- Der Block wird als rechteckiger Kasten dargestellt und symbolisiert ein Regelkreisglied. Davon kann es mehrere geben, die in einer Reihen- oder Parallel- oder Kreisstruktur angeordnet sein können. Die Wirkung eines Regelkreisgliedes kann im Block symbolisch angegeben werden.
- Die Wirkungslinie stellt den Weg einer regelungstechnischen Größe dar, deren Richtung durch einen Pfeil angegeben wird.
- Die Verzweigung wird durch einen Punkt dargestellt. Damit kann ein und dieselbe Größe mehreren Blöcken oder Additionsstellen zugeführt werden.

Der Wirkungsplan findet in der Regelungstechnik eine vielseitige Verwendung. Er ist geeignet zur übersichtlichen Darstellung aller zu einem Regelkreis gehörenden Einrichtungen mit Eintrag der wichtigen Regelkreisgrößen aber auch für detailliert dargestellte Ersatzschaltungen bestimmter Regelstrecke, z. B. eines fremderregten Gleichstrommotors, mit Eintrag aller wichtigen physikalischen Größen wie z. B. Ankerstrom, induzierte Gegenspannung, Magnetfluss, elektrisches Moment, Trägheitsmoment, Lastmoment, Drehzahl usw. und dient als Hilfsmittel bei der mathematischen Analyse von Regelkreisen.

Im Bild 20.3 wird mit Hilfe des Wirkungsplans ein vollständiger Regelkreis mit den in der Norm angegebenen Elementen dargestellt. Der Wirkungsplan einer Regelung kann auch anders strukturiert werden. So werden in der DIN 19226 der Messumformer und der Messfühler zu einer Messeinrichtung außerhalb von Regeleinrichtung und Regelstrecke zusammengefasst. Auch kann die Störgröße z über eine weitere Additionsstelle zwischen Stellantrieb und Stellglied eingefügt werden, während sie hier als irgendwie auf die Regelstrecke einwirkend gezeigt wird. Auch entfällt die Unterscheidung zwischen einer Reglerausgangsgröße y_R und der Stellgröße y bei nicht vorhandenem Stellantrieb.

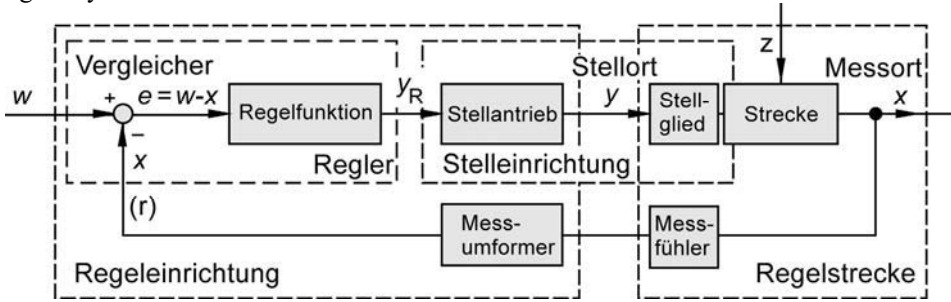


Bild 20.3: Wirkungsplan einer Regelung

20.2 Regelstrecke

20.2.1 Begriff der Regelstrecke

Die Regelstrecke ist der aufgabengemäß zu beeinflussende Teil einer Anlage, sie beginnt am Stellort, d. h. dort, wo die Stellgröße y eingreift und endet am Messort, wo sich der Messfühler zur Aufnahme der Regelgröße x befindet. Im nachfolgenden Technologieschema einer Temperaturregelung ist zu erkennen, dass die Regelstrecke das Mischventil, die Umwälzpumpe, den Heizkörper, die Heizrohre und den Raum einschließlich Messfühler umfasst.

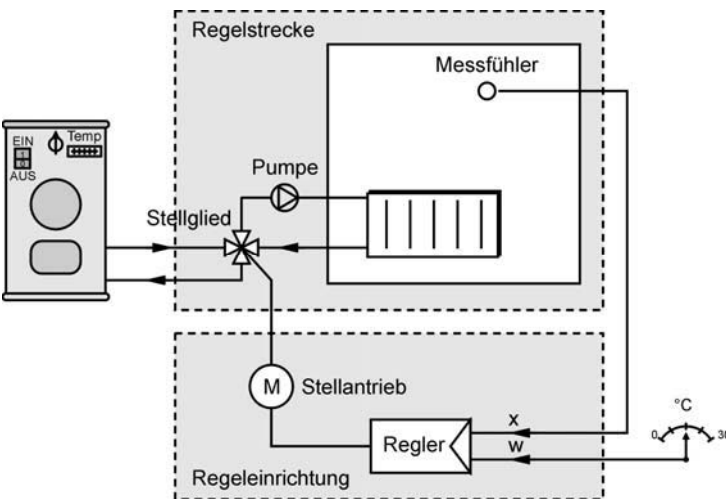
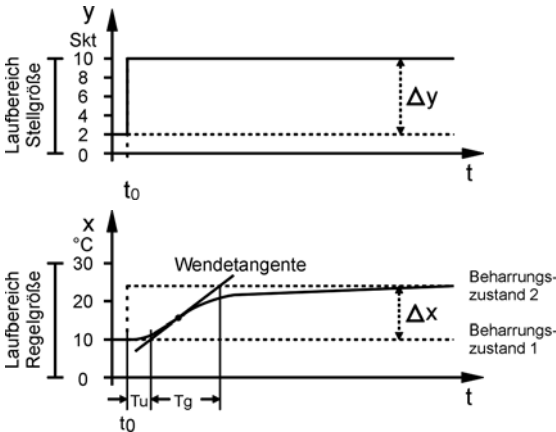


Bild 20.4: Temperaturregelung

20.2.2 Bestimmung von Regelstreckenparametern

Um das Verhalten einer Regelstrecke, z. B. der in Bild 20.4 gezeigten Temperaturregelstrecke, zu bestimmen, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 eine sprungartige Änderung der Stellgröße y vorgenommen. Die Reaktion der Regelgröße x wird in ihrem zeitlichen Verlauf aufgezeichnet und als Sprungantwort bezeichnet.



Regelstreckenparameter, die aus der Sprungantwort einer Regelstrecke höherer Ordnung mit Ausgleich bestimmt werden können:

Verzugszeit: T_U

Ausgleichszeit: T_g

Übertragungsbeiwert: $K_{PS} = \frac{\Delta x (\%) }{\Delta y (\%)}$

Bild 20.5:

Dynamisches Verhalten einer Regelstrecke

Die obige Temperatur-Regelstrecke zeigt ein träges Verhalten. Die Trägheit wird zurückgeführt auf das Zusammenwirken mehrerer unterschiedlich großer Energiespeicher wie Rohrleitungen, Heizkörper, Luftmassen und Messfühler.

Aus der Sprungantwort einer Regelstrecke höherer Ordnung lassen sich wichtige regelungstechnische Parameter ermitteln. Mit der Wendetangenten-Konstruktion wird die Sprungantwort in zwei Bereiche geteilt, aus denen sich die Kennwerte *Verzugszeit* T_U , *Ausgleichszeit* T_g und *Übertragungsbeiwert* K_{PS} der Regelstrecke ermitteln lassen. Verzugszeit T_U und Ausgleichszeit T_g sind direkt aus der Sprungantwort ablesbar. Der Übertragungsbeiwert K_{PS} der Regelstrecke ist durch den Quotienten der prozentualen Änderungen der Regelgröße x und Stellgröße y bestimmt. Durch die Festlegung auf prozentuale Änderungen der Regelgröße und Stellgröße erhält man einen dimensionsfreien Übertragungsbeiwert. Im Wirkungsplan entspricht dies dem Verhältnis der Ausgangsgröße bezogen auf die Eingangsgröße.

Für den Übertragungsbeiwert bedarf es noch einer weitergehenden Untersuchung. Es ist nämlich noch unbestimmt, wie groß die Regelgrößenänderung Δx bei einer anderen Stellgrößenänderung Δy geworden wäre. Diese Frage lässt sich anhand der statischen Kennlinie der Regelstrecke beantworten. Die statische Kennlinie zeigt den Zusammenhang zwischen Regelgröße x und Stellgröße y innerhalb des Laufbereichs beider Größen bei konstantem Störgrößeneinfluss unabhängig von der Zeit. Zu jedem Stellgrößenwert y ist der zugehörige Regelgrößenwert x im Beharrungszustand aufgetragen. Bei der betrachteten Temperaturregelung kann das die Abhängigkeit der Temperatur T (Regelgröße x) von der Stellung α des Mischventils (Stellgröße y) sein. Damit bei der Ermittlung dieses Zusammenhangs der Zeitfaktor keine Einfluss hat, muss die Auswirkung einer Stellgrößenänderung geduldig abgewartet werden, und zwar solange, bis sich bei der Temperatur (Regelgröße) der neue Endwert eingestellt hat (Erreichen des neuen Beharrungszustandes).

Ist diese statische Kennlinie eine Gerade aus dem Achsenursprung, spricht man von einer P-Regelstrecke mit konstantem Übertragungsbeiwert K_{PS} (Index P für proportional, Index S für

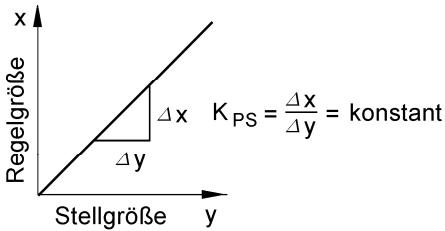
Strecke). Zur Berechnung von K_{PS} darf man in diesen Fall auch den ganzen Regelbereich einsetzen:

$$K_{PS} = \frac{\Delta X_h}{\Delta Y_h} \text{ mit}$$

X_h = Regelbereich der Strecke

Y_h = Stellbereich des Reglers

Regelstrecke mit linearer Kennlinie



Regelstrecke mit nichtlinearer Kennlinie

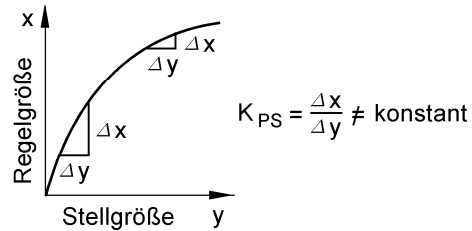


Bild 20.6: Statische Kennlinien von Regelstrecken mit Ausgleich

Häufig haben Regelstrecken jedoch nichtlinearer Kennlinien, d. h., sie sind gekrümmt, sodass der Übertragungsbeiwert K_{PS} keine Konstante ist. Das möchte man vermeiden, weil solche Strecken viel schwieriger zu regeln sind. Abhilfe kann durch eine umgekehrt nichtlineare Kennlinie des Stellgliedes geschaffen werden.

Liegt durch Messung die Sprungantwort der Regelstrecke vor, so lassen sich die Streckenparameter Verzugszeit T_U und Ausgleichzeit T_g bei einer Strecke höherer Ordnung mit der Wendetangente-Methode ermitteln. Erfahrungen haben ergeben, dass das Verhältnis von Verzugszeit T_U und Ausgleichzeit T_g Auskunft über die Regelbarkeit der Strecke ergeben.

Gut regelbar	Noch regelbar	Schlecht regelbar
$\frac{T_U}{T_g} < \frac{1}{10}$	$\frac{T_U}{T_g} = \frac{1}{5}$	$\frac{T_U}{T_g} > \frac{1}{3}$

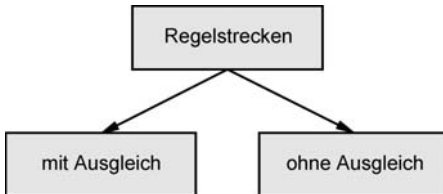
Zur Einschätzung der beiden Zeitwerte sind in der folgenden Tabelle die ungefähren Größenordnungen für die Verzugszeit und Ausgleichzeit gebräuchlicher Regelstrecken angegeben.

Regelgröße	Art der Regelstrecke	Verzugszeit T_U	Ausgleichszeit T_g
Temperatur	Elektrisch beheizter Ofen	0,5 bis 1 min	5 bis 15 min
	Destillationskolonne	1 bis 7 min	40 bis 60 min
	Raumheizung	1 bis 5 min	10 bis 60 min
Durchfluss	Rohrleitung mit Gas	0 bis 5 s	0,2 bis 10 s
Druck	Kessel mit Befeuerung	0	150 s
Füllstand	Trommelkessel	0,6 bis 1min	0
Drehzahl	Elektrischer Antrieb	0	1 bis 40 s

20.2.3 Typisierung der Regelstrecken

Es soll nun ein Ordnungsschema eingeführt werden, um sich besser in der unübersehbaren Vielfalt möglicher Regelstrecken zurecht zu finden.

Erstes Ordnungskriterium: Regelstrecken mit und ohne Ausgleich.



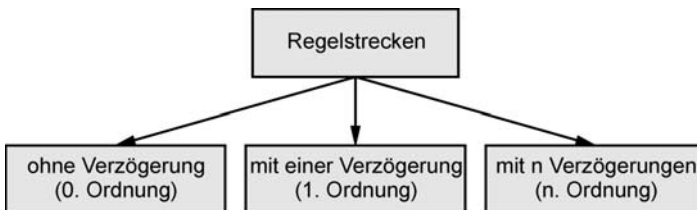
Ausgleich bedeutet, dass die Regelgröße einer Strecke nach sprunghafter Änderung der Stellgröße innerhalb einer Übergangszeit wieder einen stabilen Beharrungszustand annimmt.

Als Beispiel für eine *Regelstrecke mit Ausgleich* sei die Temperaturregelung des Bildes 20.4 genannt. Bei Veränderung der Mischventilstellung erreicht die Raumtemperatur auf verändertem Niveau wieder einen stabilen Wert.

Bei einer *Regelstrecke ohne Ausgleich* würde die Regelgröße x nach einer sprunghaften Änderung der Stellgröße y keinen neuen Beharrungszustand finden. Dies ist z. B. der Fall bei einem Behälter mit dem Füllstand als Regelgröße x , wenn die Ablaufmenge in m^3/h durch eine Pumpe konstant gehalten wird. Jede Änderung der Zulaufmenge in m^3/h führt dann entweder zum Überlaufen oder Leerlaufen des Behälters.

Regelstrecken mit Ausgleich und konstantem Übertragungsbeiwert K_{PS} haben einen proportionalen Charakter und werden deshalb auch *P-Strecken* genannt. Regelstrecken ohne Ausgleich haben einen integralen Charakter und werden daher als *I-Strecken* bezeichnet.

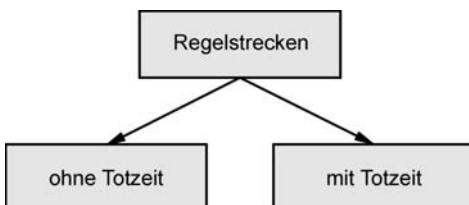
Zweites Ordnungskriterium: Regelstrecken mit und ohne Verzögerung.



Energiespeicher verursachen Verzögerungen. Die Regelstrecken mit mehreren Speichereinflüssen werden auch als *Regelstrecken höherer Ordnung* bezeichnet.

Verzögerung bedeutet, dass die Regelgröße x einer sprunghaften Änderung der Stellgröße y nicht sprunghaft folgen kann, sondern erst nach einer bestimmten Zeit einen neuen stabilen Wert erreicht. Verzögerungen treten bei technischen Prozessen immer auf, wenn Energie zugeführt oder Massen beschleunigt oder abgebremst werden müssen.

Drittes Ordnungskriterium: Regelstrecken mit und ohne Totzeit.



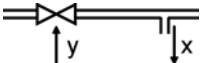
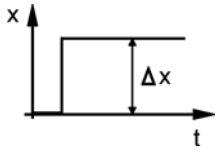
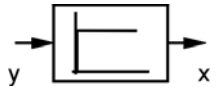
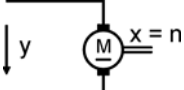
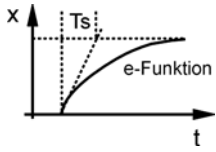
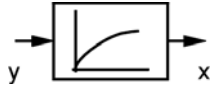
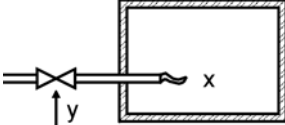
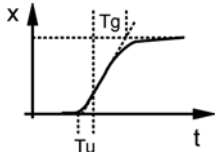

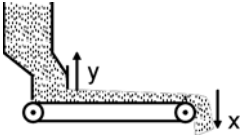
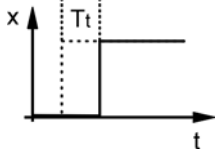
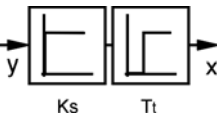
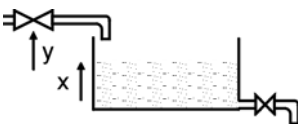
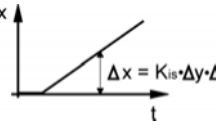
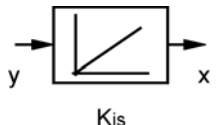
Totzeit bedeutet eine Wartezeit, bis eine Reaktion eintritt.

Ein bekanntes Beispiel für eine Regelstrecke mit Totzeit ist das Förderband. Durch eine Schieberöffnung (Stellgrößenänderung Δy) gelangt mehr Fördergut auf das Band. Die höhere Ausschüttmenge (Regelgrößenänderung Δx) wirkt sich am Bandende jedoch nicht sofort aus, sondern erst nach einer Totzeit, die von der Geschwindigkeit und der Länge des Bandes abhängt.

In der Praxis vorkommende Regelstrecken weisen zumeist Kombinationen von Eigenschaften auf. Die Kriterien Ausgleich, Verzögerung und Totzeit treten dann gemeinsam auf.

Die nachfolgende Tabelle zeigt Regelstreckenbeispiele mit den genannten Ordnungskriterien.

Tabelle 20.1: Regelstrecken

Art der Strecke Beispiel	Sprungantwort	Streckenparameter	Wirkungsplan-Darstellung
<p>P_0-Strecke P-Strecke ohne Verzögerung</p>  <p>Druck und Durchfluss in Flüssigkeitsrohrnetzen</p>		K_S	
<p>PT1-Strecke P-Strecke mit Verzögerung</p>  <p>Drehzahl</p>		K_S , T_S	
<p>PT2-Strecke</p>  <p>Ofentemperatur</p>		K_S , T_U , T_g	
<p>P-Strecke mit Totzeit</p>  <p>Fördermenge</p>		K_S , T_t	
<p>I-Strecke 0. Ordnung</p>  <p>Füllstand</p>		K_{IS}	

20.3 Regler

Der Regler ist der Teil des Regelkreises, in dem aus der Führungsgröße w und Regelgröße x durch die Regelfunktion die Reglerausgangsgröße y_R gebildet wird. Über eine Signalausgabe wird die ermittelte Reglerausgangsgröße y_R an die Stelleinrichtung weitergegeben, in der sie als Stellgröße y ein Stellglied ansteuert.

20.3.1 Realisierbare Reglerarten

Bei modernen elektronischen Reglern sind Soll-Ist-Vergleich und Regelfunktion softwaremäßig realisiert. Das Ergebnis der ausgeführten Regelfunktion ist ein binärer oder digitaler Zahlenwert. Erst in einer nachgeschalteten Signalausgabe wird aus dem Zahlenwert ein elektrisches Stellsignal gebildet, das entweder an einer Binärausgabe- oder Analogausgabebaugruppe ausgegeben wird. Mit den beiden Funktionseinheiten „Bildung der Regelfunktion“ und „Signalausgabe“ lassen sich mehrere Reglerkonfigurationen bilden. So kann z. B. ein digitaler Zahlenwert in einen proportionalen Spannungswert umgesetzt und an einer Analogausgabebaugruppe als kontinuierliches Stellsignal ausgegeben werden. Möglich ist es jedoch auch, den digitalen Zahlenwert in ein pulsweitenmoduliertes Spannungssignal umzusetzen und an einem Binärausgang als Stellsignal auszugeben, bei dem der Stellgrößenwert in der prozentualen Impulslänge bezogen auf eine konstante Periodendauer enthalten ist. In beiden Fällen kommt es darauf an, dass am Reglerausgang eine zum Stellsignal passende Stelleinrichtung angeschlossen ist.

Die möglichen Reglerarten (Reglerkonfigurationen) ergeben sich aus den beiden Merkmalen:

- Art der Regelfunktion: Zweipunkt-, Dreipunkt-, PID-Funktion und Fuzzy-Algorithmus.
- Art des Stellsignals: Zweipunkt/Dreipunkt, Kontinuierlich, Schritt und Impuls.

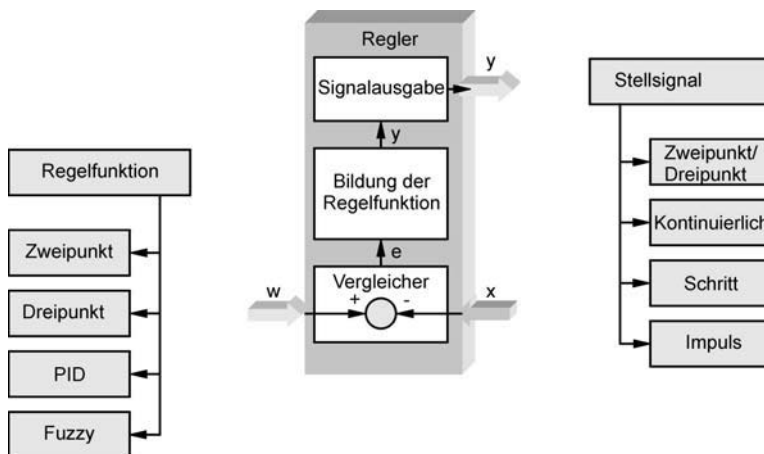


Bild 20.7: Reglerarten

Wichtiger Grundsatz bei der Auswahl des Reglers:

Reglerart und Stelleinrichtung bzw. Stellglied müssen zusammen passen.

20.3.2 Bildung der Regelfunktion

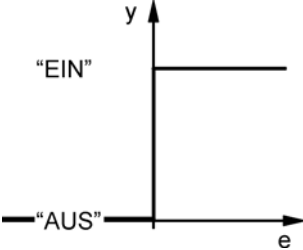
20.3.2.1 Zweipunkt-Regelfunktion

Bei der Bildung der Zweipunkt-Regelfunktion wird davon ausgegangen, das die Stellgröße die zwei Zustände „EIN“ und „AUS“ annehmen kann. „EIN“ entspricht dabei 100 % Leistungszuführung und „AUS“ 0 %.

Das nebenstehende Bild zeigt die Zweipunkt-Funktion in der Wirkungsplan-Darstellung. Eingangsgröße ist die Regeldifferenz e und Ausgangsgröße die Stellgröße y , die zwei unterschiedliche Werte annehmen kann.



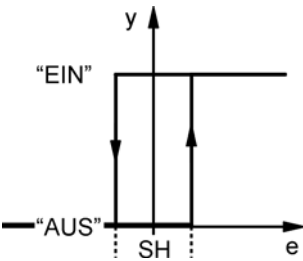
Kennlinie der Zweipunkt-Regelfunktion:



Ist die Regeldifferenz e kleiner null ($e < 0$) bedeutet dies, dass der Istwert x größer als der Sollwert ist ($x > w$). Die Leistungszuführung wird also abgeschaltet. Bei positiver Regeldifferenz ($e > 0$) ist der Sollwert w größer als der Istwert x ($w > x$). Die Leistungszuführung wird deshalb eingeschaltet.

Die Zweipunkt-Regelfunktion hat eine Dauerschwingung der Regelgröße x um den Sollwert w zur Folge. Die Amplitude und Schwingungsdauer wächst mit dem Verhältnis von Verzugszeit T_U zur Ausgleichzeit T_g der Regelstrecke. Ist die Verzugszeit T_U sehr klein oder gleich null (PT1-Strecke), muss eine Schalthysterese eingeführt werden, um Stellgliedschwingungen zu verhindern.

Kennlinie der Zweipunkt-Regelfunktion mit Schalthysterese SH:



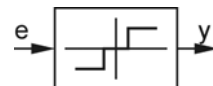
Die Größe SH gibt den Wert der Schalthysterese an. Ist die Regeldifferenz e kleiner als die negative halbe Hysterese SH ($e < -SH/2$) wird die Leistungszuführung abgeschaltet. Zugeschaltet wird die Leistungszuführung wieder, wenn die Regeldifferenz e größer als die positive halbe Hysterese SH ($e > +SH/2$) ist.

Charakteristisch für die Zweipunkt-Regelfunktion ist, dass sich kein Beharrungszustand im Regelkreis einstellen kann. Die Stellgröße pendelt ständig in einer Art Arbeitsbewegung um einen Mittelwert und zwingt der Regelgröße diese Schwingung auf.

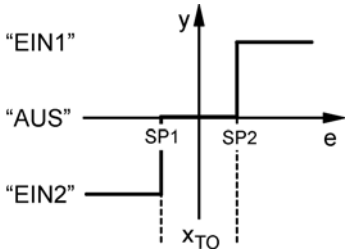
20.3.2.2 Dreipunkt-Regelfunktion

Bei der Bildung der Dreipunkt-Regelfunktion wird davon ausgegangen, das die Stellgröße die drei Zustände „EIN1“, „AUS“ und „EIN2“ annehmen kann. „EIN1“ entspricht dabei 100 % Leistungszuführung für beispielsweise Heizen und „EIN2“ einer 100 % Leistungszuführung für Kühlen. Beim Zustand „AUS“ sind die beiden Leistungszuführungen abgeschaltet. Einsatzgebiete für derartige Dreipunkt-Funktionen sind Wärme-, Kälte- und Klimakammern.

Das nebenstehende Bild zeigt die Dreipunkt-Funktion in der Wirkungsplan-Darstellung. Eingangsgröße ist die Regeldifferenz e und Ausgangsgröße die Stellgröße y mit ihren drei möglichen Schaltzuständen.



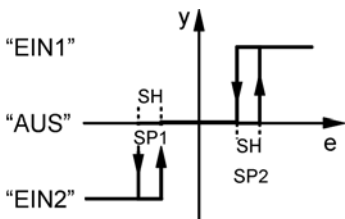
Kennlinie der Dreipunkt-Regelfunktion:



Ist die Regeldifferenz e kleiner als der Schalterpunkt $SP1$ wird „EIN2“ (z. B. die Kühlung zu 100 %) eingeschaltet. Ist die Regeldifferenz e größer als der Schalterpunkt $SP2$, wird „EIN1“ (z. B. die Heizung zu 100 %) eingeschaltet. Zwischen den beiden Schalterpunkten ist die so genannte „tote Zone“ x_{TO} . Je größer diese Schaltlücke gewählt wird, umso unempfindlicher ist der Regler.

Zur Herabsetzung der Schalthäufigkeit der Stellglieder kann der Dreipunkt-Regelfunktion noch eine Schalthysterese gegeben werden.

Kennlinie der Dreipunkt-Regelfunktion mit Schalthysterese SH:



Durch die Einführung einer Schalthysterese wird wie bei der Zweipunkt-Funktion das so genannte „Flattern“ der Stellgröße an einem bestimmten Punkt verhindert.

Dreipunktregler sind gut geeignet, um motorische Stellglieder zu betätigen, und zwar für die Schaltstellungen Rechtslauf, Stillstand, Linkslauf um z. B. eine Ventilverstellung auszuführen.

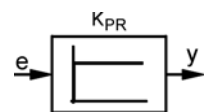
20.3.2.3 PID-Regelfunktionen (P, I, PI, PI-Schritt, PD, PID)

Die PID-Regelfunktion setzt sich aus den drei elementaren Übertragungsfunktionen P-Funktion, I-Funktion und D-Funktion zusammen. Diese Funktionen können allein (Ausnahme: D-Funktion) oder in Kombinationen zur Bildung der Regelfunktion herangezogen werden. Im Folgenden werden die realisierbaren Regelfunktionen P, I, PI, PD und PID dargestellt.

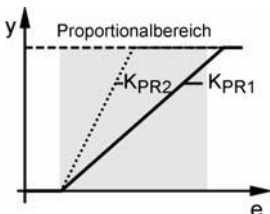
a) P-Regelfunktion

Bei der *P-Regelfunktion* ist die Ausgangsgröße (Stellgröße y) proportional zur Eingangsgröße (Regeldifferenz e). Ein Faktor K_{PR} gibt an, um welchen Betrag sich die Stellgröße ändert, wenn sich die Regeldifferenz um den Betrag 1 ändert.

Das nebenstehende Bild zeigt die Wirkungsplan-Darstellung der P-Regelfunktion. Eingangsgröße ist die Regeldifferenz e und Ausgangsgröße die Stellgröße y . Die Symbolik zeigt den typischen Verlauf der Sprungantwort des P-Reglers.



Das Verhalten der P-Funktion ist aus der Kennlinie zu ersehen. Es besteht innerhalb des Arbeitsbereichs ein linearer Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße und Eingangsgröße.



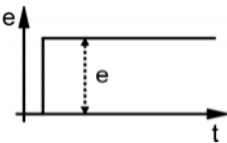
Mit zunehmender Verstärkung K_{PR} verläuft die Kennlinie steiler ($K_{PR2} > K_{PR1}$). Oberhalb des Proportionalbereichs geht die Funktion in den Sättigungsbereich über. Im Sättigungsbereich ist dann keine Erhöhung der Stellgröße y bei weiter zunehmender Regeldifferenz e möglich.

Der Proportionalbeiwert K_{PR} (Index P = proportional, R = Regler) wird auch als Verstärkung bezeichnet. Je größer die Verstärkung desto kleiner kann die Regeldifferenz e sein, um eine bestimmte Stellgröße y zu erreichen. Die Verstärkung kann jedoch nicht beliebig erhöht werden, da bei zu großer Verstärkung Stabilitätsprobleme im Regelkreis auftreten. Der mathematische Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße y und Eingangsgröße e ist durch folgende Gleichung gegeben:

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

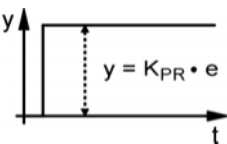
Das Zeitverhalten der P-Regelfunktion kann aus der Sprungantwort abgelesen werden.

Einheitsprung:



Die Ausgangsgröße ist zu jedem Zeitpunkt proportional der Eingangsgröße. Da die Eingangsgröße unmittelbar auf die Ausgangsgröße reagiert, wirkt die P-Regelfunktion sehr schnell auf die Strecke.

Sprungantwort:



Das Erreichen einer bestimmten Stellgröße y setzt aber eine entsprechende Regeldifferenz e voraus. Aus dem mathematischen Zusammenhang $y = K_{PR} \cdot e$ wird dies deutlich. D.h. mit einem P-Regler kann das eigentliche Ziel der Regelung, nämlich die Angleichung der Regelgröße x an die Führungsgröße w nur annäherungsweise erreicht werden.

Die P-Regelfunktion benötigt demnach für eine Verstellung immer eine Regeldifferenz e . Eine Störgröße oder Führungsgröße, die in einer Regelstrecke eine Regeldifferenz hervorruft, kann mit der P-Regelfunktion nie vollständig beseitigt werden. Diese so genannte bleibende Regeldifferenz kann bei bekanntem Proportionalbeiwert K_{PS} der Regelstrecke und K_{PR} des Reglers berechnet werden.

Mit: $y = K_{PR} \cdot e = K_{PR} \cdot (w - x)$ und $x = K_{PS} \cdot y$ ergibt sich aufgelöst nach der Regelgröße:

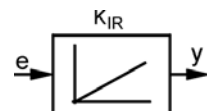
$$x = \frac{K_{PR} \cdot K_{PS}}{K_{PR} \cdot K_{PS} + 1} \cdot w \quad (\text{Ohne bleibende Regeldifferenz müsste } x = w \text{ sein.)}$$

Die bleibende Regeldifferenz ist der Nachteil der P-Regelfunktion. Sie wird zwar bei großen Proportionalbeiwerten K_{PR} klein (siehe Formel), jedoch kann K_{PR} nicht beliebig erhöht werden, da sonst der Regler instabil wird, d. h. schon bei sehr kleinen Regeldifferenz den Reglerausgang übersteuert, also den Proportionalbereich verlässt.

b) I-Regelfunktion:

Bei einer *I-Regelfunktion* ist die Ausgangsgröße (Stellgröße y) proportional zum Zeitintegral der Eingangsgröße (Regeldifferenz e). Das Zeitintegral $\int e \cdot dt$ entspricht der Fläche, welche die Regeldifferenz e in einer bestimmten Zeitspanne Δt bildet. Der Integrierbeiwert K_{IR} gibt an, um welchen Betrag sich die Stellgröße y in einer Zeiteinheit ändert, wenn die Regeldifferenz von null auf den Betrag 1 geändert wird.

Das nebenstehende Bild zeigt die Wirkungsplan-Darstellung der I-Funktion. Die Symbolik zeigt den typischen Verlauf der Sprungantwort eines I-Reglers.



Da sich die Ausgangsgröße y der I-Regelfunktion mit der Zeit ständig ändert, kann das Verhalten nicht mit einer Kennlinie beschrieben werden. Der mathematische Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße y und Eingangsgröße x ist durch folgende Gleichung gegeben:

I-Regelfunktion: $y = K_{IR} \int e \cdot dt$

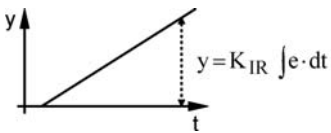
Das Zeitverhalten der I-Regelfunktion kann aus der Sprungantwort abgelesen werden.

Einheitssprung:



Aus der Sprungantwort ist zu erkennen, dass die Stellgrößenänderung Δy proportional zur Regeldifferenz e und zur Zeitspanne Δt ist. Der Übertragungsfaktor K_{IR} , die Zeitdifferenz Δt und die konstante Eingangsgröße e bestimmen die Stellgröße y .

Sprungantwort:



Der Kennwert K_{IR} gibt das Verhältnis der Ausgangsgröße y zur Eingangsgröße e nach der Zeit $t = 1$ s an.

$$K_{IR} = \frac{y}{e \cdot \Delta t}$$

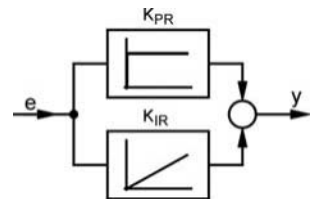
Einheit des Kennwertes K_{IR} : 1/s.

Eine I-Regelfunktion kann eine Änderung der Regelgröße nach Ablauf einer bestimmten Zeit ausgleichen. Die Reaktion auf eine Sollwert- oder Störgrößenänderung verläuft deshalb langsamer als bei der P-Regelfunktion. Je größer der Kennwert K_{IR} ist, umso schneller ändert sich jedoch die Stellgröße in Abhängigkeit von der Regeldifferenz. I-Regelfunktionen sind nur bei P-Strecken ohne oder mit geringer Zeitverzögerung einsetzbar. An I-Strecken kann die I-Regelfunktion nicht verwendet werden.

c) PI-Regelfunktion:

Bei der *PI-Regelfunktion* entspricht die Ausgangsgröße (Stellgröße) y einer Addition der Ausgangsgrößen einer P- und einer I-Regelfunktion.

Das nebenstehende Bild zeigt die Wirkungsplan-Darstellung der PI-Regelfunktion.



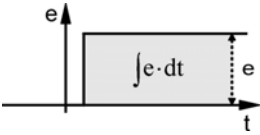
Der mathematische Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße y und Eingangsgröße e ergibt sich aus der Addition der P- und I-Regelfunktion.

PI-Regelfunktion: $y = K_{PR} \cdot e + K_{IR} \int e \cdot dt = K_{PR} \left(e + \frac{1}{T_n} \cdot \int e \cdot dt \right)$

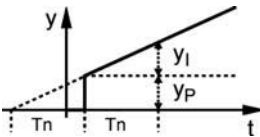
Aus der Gleichung ist zu ersehen, dass mit $T_n = \frac{K_{PR}}{K_{IR}}$ ein neuer Parameter durch Ausklammern des Proportionalbeiwerts K_{PR} eingeführt wurde. Der Parameter T_n wird als Nachstellzeit bezeichnet. Die *Nachstellzeit* T_n ist die Zeit, die bei der Verwendung eines PI-Reglers gegenüber der Verwendung eines reinen I-Reglers eingespart wird, um bei einer Änderung der Regeldifferenz den gleichen Stellgrößenwert zu erreichen.

Das Zeitverhalten der PI-Funktion kann aus der Sprungantwort abgelesen werden.

Einheitssprung:



Sprungantwort:



Verlängert man die Gerade der I-Verstellung in der Sprungantwort nach links bis zum Schnittpunkt mit der Zeitachse, so ergibt sich ein Zeitabschnitt, der der Nachstellzeit T_n entspricht. Die Zeitkonstante T_n gibt somit die Zeit an, um die eine PI-Regelfunktion schneller ist als eine reine I-Regelfunktion. Die Stellgröße ergibt sich aus der Addition von P- und I-Anteil:

$$y = y_P + y_I = K_{PR} \cdot e + \frac{K_{PR}}{T_n} \int e dt$$

Die PI-Regelfunktion hat den Vorteil, dass nach der schnellen P-Verstellung in der nachfolgenden durch den Wert T_n bestimmten Zeit die bleibende Regelabweichung vollständig kompensiert wird. Die Einstellwerte sind der Übertragungsfaktor K_{PR} und die Nachstellzeit T_n . Gegenüber der P-Regelfunktion erfordert die Einstellung des Beharrungszustandes eine längere Zeit, wodurch die Stabilität des Regelkreises herabgesetzt wird. Aus diesem Grund darf der Übertragungsfaktor K_{PR} nicht zu groß und die Nachstellzeit T_n nicht zu klein gewählt werden.

d) PI-Schritt-Regelfunktion:

Der PI-Schrittregler ist ein Sonderfall für eine PI-Regelfunktion, die sich erst aus dem Zusammenwirken einer Dreipunkt-Regelfunktion mit einem integrierenden Stellantrieb (Stellmotor) ergibt. Der PI-Schrittregler liefert binäre Stellsignale für Rechtslauf und Linkslauf bzw. Halt des Motors. Das Getriebe des Motors dient der Drehzahl-Übersetzung und der Drehmomentwandlung. Der durch Stellimpulse gesteuerte Motor läuft mit seiner Nenn Drehzahl.

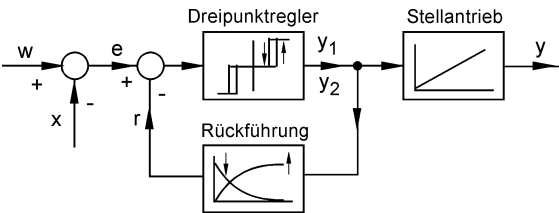
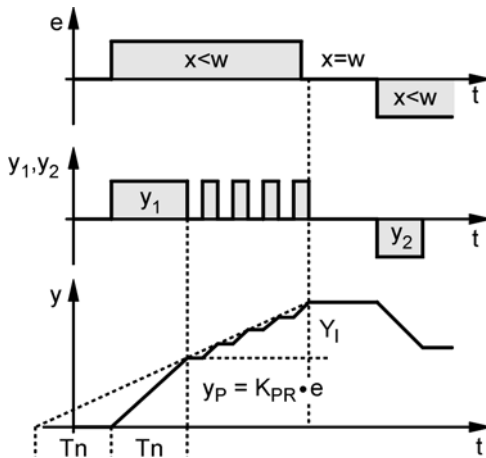


Bild 20.8: Dreipunktregler mit integrierendem Stellantrieb (I-Verhalten)

Der PI-Schrittregler soll an seinen Stellausgängen Stellimpulse und nicht nur drei Schaltzustände zur Verfügung stellen. Das kann dadurch erreicht werden, dass ein Dreipunktregler mit einer verzögernden Rückführung beschaltet wird. Die Rückführgröße r wird auf Grund der Verzögerung nur allmählich größer und täuscht dem Dreipunktregler eine geringer werdende Regeldifferenz e vor, die zur Ausgabe von kürzeren Impulsen führt. Die Impulspausen entstehen durch die Wirkung der Schalthysterese des Dreipunktreglers.

**Bild 20.9:**

Impulsverhalten eines PI-Schrittreglers :
Stellgröße y (Stellweg eines motorisch angetriebenen Ventils oder Schiebers) bei einer vorgegebenen sprungförmigen Regeldifferenz e .

Stellweg y_P ausgelöst durch das P-Verhalten.

Stellweg y_I ausgelöst durch das I-Verhalten.

y_1 und y_2 sind die Stellimpulse für den Motor für Rechtslauf – Halt – Linkslauf.

Auf eine sprungförmige Änderung der Regeldifferenz e reagiert der PI-Schrittregler sofort mit einem „langen“ Schritt. Das Stellsignal gibt dazu einen Impuls aus, der durch den P-Anteil des Reglers verursacht wird. Die darauffolgenden kürzeren Impulse werden durch den I-Anteil des Reglers gebildet. Der PI-Schrittregler wirkt solange, bis keine Regeldifferenz mehr besteht und der Stellantrieb stillstehen kann.

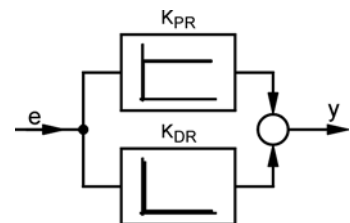
In Bild 20.9 ist ersichtlich, dass der PI-Schrittregler auch über einen Proportionalbeiwert K_{PR} und eine Nachstellzeit T_n verfügt, wie vom richtigen PI-Regler her bekannt. Mit diesen Parametern wird der Schrittregler an das dynamische Verhalten der Regelstrecke angepasst.

Bei der digitalen Realisierung dieses Reglertyps wird die Dreipunktregelfunktion durch einen PID-Geschwindigkeitsalgorithmus (siehe Kapitel 20.5.4) ersetzt.

e) PD-Regelfunktion:

Eine *PD-Regelfunktion* besteht aus einer P-Funktion mit zusätzlicher D-Aufschaltung (D = Differenzial). Durch die D-Aufschaltung wird erreicht, dass bei einer schnellen Änderung der Regeldifferenz e die Stellgröße y gleich am Anfang kräftig verstellt wird. Wie bei der PI-Regelfunktion besteht die PD-Regelfunktion aus zwei Anteilen, dem P- und dem D-Anteil.

Das nebenstehende Bild zeigt die Wirkungsplan-Darstellung der PD-Regelfunktion.



Der Übertragungsbeiwert der D-Funktion ist K_{DR} . Je größer dieser Übertragungsbeiwert ist, umso heftiger ist die Reaktion der Stellgröße auf eine Regeldifferenzänderung.

Der mathematische Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße y und Eingangsgröße e ergibt sich aus der Addition der P- und D-Regelfunktion.

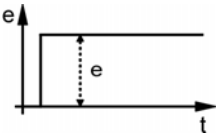
PD-Regelfunktion:

$$y = K_{PR} \cdot e + K_{DR} \cdot \frac{de}{dt} = K_{PR} \left(e + T_v \cdot \frac{de}{dt} \right)$$

Aus der Gleichung ist zu ersehen, dass mit $T_V = \frac{K_{DR}}{K_{PR}}$ ein neuer Parameter durch Ausklammern des Proportionalbeiwerts K_{PR} eingeführt wurde. Der Parameter T_V wird als Vorhaltzeit bezeichnet. Die Vorhaltzeit T_V gibt die Zeit an, um die der Wirkungsbeginn eines reinen P-Reglers vorverlegt werden müsste, um die gleiche Stellgrößenänderung zu erreichen, die der PD-Regler sofort auslöst.

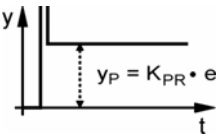
Das Zeitverhalten der PD-Funktion kann aus der Sprungantwort abgelesen werden. In der nachfolgenden Darstellung ist die Vorhaltzeit T_V jedoch nicht sichtbar, dafür aber die sprunghafte Stellgrößenänderung.

Einheitssprung:



Der D-Anteil ist der Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz de/dt proportional. Bei der idealen Regelfunktion ergibt der Differenzialquotient de/dt eine Nadelfunktion mit $y \rightarrow \infty$; bei der realen Regelfunktion wird die Größe durch den Aussteuerbereich begrenzt.

Sprungantwort:



Die Stellgröße ergibt sich aus der Addition von P- und D-Anteil:

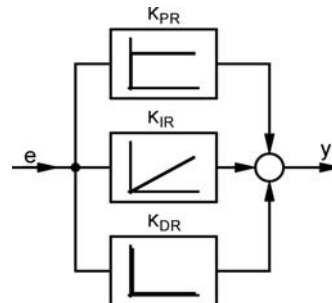
$$y = y_P + y_D = K_{PR} \cdot e + K_{PR} \cdot T_V \cdot \frac{de}{dt}$$

Die PD-Regelfunktion ist eine schnelle Funktion, die um die Vorhaltzeit T_V schneller ist als eine P-Funktion. Im Beharrungszustand ist der D-Anteil ohne Einfluss. Die PD-Regelfunktion hat also das gleiche statische Verhalten wie die P-Regelfunktion. Die Einstellwerte sind K_{PR} und T_V . Bei Verwendung des D-Anteils ist jedoch Vorsicht geboten. Störsignale, die der Regelgröße überlagert sein können, werden durch die differenzierende Wirkung des D-Anteils verstärkt und führen unter Umständen zu kräftigen Änderungen der Stellgröße y . Bei richtiger Anwendung hat der D-Anteil eine stabilisierende Wirkung, da Übergangsvorgänge schneller abklingen.

f) PID-Regelfunktion:

In der PID-Regelfunktion sind die drei grundsätzlichen Übertragungseigenschaften – proportional, integral und differenziell – zusammengefasst. Gebildet wird die PID-Regelfunktion durch parallele Ausführung der drei Funktionen P, I, D und Addition ihrer Stellgrößenanteile. Diese Regelfunktion vereint somit sämtliche Eigenschaften der Regelfunktionen dieses Abschnitts.

Das nebenstehende Bild zeigt die Wirkungsplan-Darstellung der PID-Regelfunktion.



Der mathematische Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße y und Eingangsgröße e ergibt sich aus der Addition der P-, I- und D-Regelfunktion.

PID-Regelfunktion:

$$y = K_{PR} \left(e + \frac{1}{T_n} \cdot \int e \cdot dt + T_v \cdot \frac{de}{dt} \right)$$

In der PID-Regelfunktion sind die beiden schon bekannten Zeitkonstanten für die

Nachstellzeit $T_n = \frac{K_{PR}}{K_{IR}}$ und Vorhaltzeit $T_v = \frac{K_{DR}}{K_{PR}}$ enthalten.

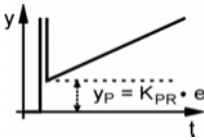
Das Zeitverhalten der PID-Funktion kann aus der Sprungantwort abgelesen werden.

Einheitssprung:



Der D-Anteil in der Stellgröße ist von der Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz abhängig. Bei einer sprunghaften Änderung der Regeldifferenz müsste die Stellgröße theoretisch unendlich groß werden, das jedoch ist nicht möglich.

Sprungantwort eines idealen PID-Reglers:



Der P-Anteil verhindert einen sofortigen Rückgang der Stellgröße auf null nach dem erfolgten Regeldifferenzsprung. Damit hat der P-Anteil seinen Beitrag schon geleistet.

Der I-Anteil überlagert sich dem P-Anteil in der Stellgröße und steigt entsprechend der Nachstellzeit T_n an.

Die PID-Regelfunktion zeichnet sich sowohl durch ein gutes statisches Verhalten (keine bleibende Regeldifferenz) als auch durch eine gute Anpassbarkeit an die dynamischen Forderungen einer Regelstrecke aus. Durch die drei Einstellparameter K_{PR} , T_n und T_v ist die PID-Funktion geeignet, auch komplizierte Regler-Anforderungen zu erfüllen.

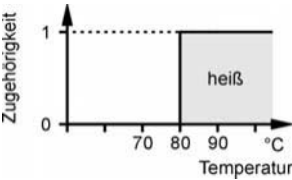
Zusammenfassend kann für alle beschriebenen Regelfunktionen festgestellt werden, dass der P-Regler durch eine Kenngröße, die PI-sowie PD-Regler durch zwei und der PID-Regler durch drei Kenngrößen charakterisiert sind. Zu erwähnen ist auch, dass die vier typischen Sprungantworten der Regler nicht dem zeitlichen Verlauf der Stellgröße bei geschlossenem Regelkreis beschreiben. Im geschlossenen Regelkreis wird ja durch die Wirkung der Stellgröße die Regeldifferenz verringert oder sogar auf null gebracht, während sie bei der Sprungantwort als konstant bleibend angenommen wird.

20.3.2.4 Fuzzy-Regelfunktion

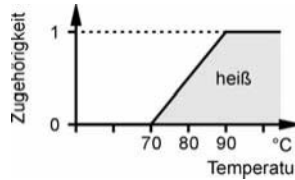
Die Grundlage beim Entwurf einer Fuzzy-Regelfunktion ist die Fuzzy-Logik. Fuzzy als Regelwerk mit unscharfer Logik hat gegenüber der Boole'schen Logik mit eindeutigen Zugehörigkeitsaussagen den Vorteil, dass sie dem menschlichen Verständnis von den Vorgängen in Anlagen und Prozessen sehr entgegen kommt. Wie im täglichen Leben genügt es völlig, die Objekte und Teilvorgänge qualitativ mit Worten der Umgangssprache wie groß, etwas, klein, wenig usw. zu charakterisieren ohne den Zwang der Festlegung auf konkrete Zahlenwerte. Die Boole'sche Logik zwingt dagegen dazu, relativ willkürlich Grenzen zu definieren und eine starre Entweder-Oder-Logik zu entwerfen.

Wird beispielsweise in einem verfahrenstechnischen Prozess eine Temperatur beschrieben, die „heiß“ ist, so kann die Aussage zutreffen, dass eine Temperatur über 90 °C mit Sicherheit der Kategorie „heiß“ zuzuordnen ist. Bei einer Temperatur von 80 °C gehen die Meinungen auseinander, aber eine Temperatur von 70 °C wird eindeutig nicht mehr als „heiß“ eingeordnet. In der Boole’schen Logik nimmt eine Zuordnung nur die Werte 0 oder 1 an. In der Fuzzy-Logik kann die Zuordnung von unscharfen Aussagen mit einer Zugehörigkeitsfunktion beschreiben werden. Dabei sind Zuordnungswerte zwischen 0 und 1 möglich.

Boole’sche Logik:



Fuzzy Logik:

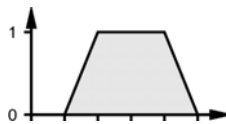


Für jede Prozessgröße lässt sich nach der Fuzzy-Logik ein Wertebereich bestimmen, in dem diese Größe variieren kann. Eine *Zugehörigkeitsfunktion* legt die Zuordnung zu einem bestimmten Prozesszustand innerhalb des angegebenen Wertebereiches fest. Beispiele von möglichen Zuordnungsfunktionen sind:

Gauß-Kurve:



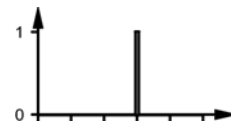
Trapez



Dreieck



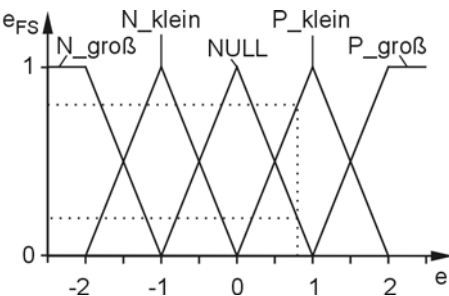
Singleton



Bei der Realisierung von Fuzzy-Regelfunktionen mit Automatisierungsgeräten werden hauptsächlich lineare Zuordnungsfunktionen verwendet.

Die verschiedenen Aussagen über eine Prozessgröße (kalt, warm, heiß, sehr heiß etc.) werden als *linguistische Werte* der Größe bezeichnet. Mit linguistischen Werten werden somit nicht eindeutig abgrenzbare Bereiche (d. h. unscharfe Mengen) der Prozess- oder Regelgröße festgelegt. Für die Regeldifferenz e können z. B. folgende linguistischen Werte bestimmt werden: Negativ_groß; Negativ_klein, NULL, Positiv_klein und Positiv_groß. Die verschiedenen linguistischen Werte werden in einem Diagramm der Kenngröße (Linguistische Variable) mit den entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen aufgetragen.

Beispiel: Satz von linguistischen Termen für die linguistische Variable Regeldifferenz



Ist der Signalwert der Regeldifferenz beispielsweise 0,8, so ist dieser Wert dem linguistischen Term „NULL“ mit dem Faktor 0,2 und dem linguistischen Term „P_klein“ mit dem Faktor 0,8 zugeordnet. Der scharfe Signalwert

$e = 0,8$ ergibt den Fuzzy-Signalwert e_{FS}

$e_{FS} = 0,2$ „NULL“; $0,8$ „P_klein“;

$e_{FS} = (0; 0; 0,2; 0,8; 0)$

Der Übergang vom scharfen Signalwert auf den zugehörigen Fuzzy-Signalwert wird als *Fuzzifizierung* bezeichnet.

Sind alle Eingangs- und Ausgangsgrößen einer Fuzzy-Regelfunktion fuzzifiziert, werden die Ausgangsgrößen durch *Fuzzy-Regeln* mit den Eingangsgrößen verknüpft. Die Regeln werden wie in der Umgangssprache durch Verknüpfung der linguistischen Terme mit WENN ... DANN-Relationen gebildet. Aufbau einer Fuzzy-Regel:

WENN <Vorbedingung>, DANN <Folgerung>

Solche WENN-DANN-Regeln entsprechen der einfachsten Art menschlichen Entscheidungsvermögens. Vorbedingung und Folgerung sind unscharfe Aussagen wie:

WENN <der Druck hoch ist> DANN <Ventil etwas öffnen> oder die verknüpfte Aussage wie:

WENN <der Druck hoch ist UND die Temperatur groß ist> DANN <Ventil weit öffnen>.

Die linguistischen Terme lassen sich umgangssprachlich mit UND oder ODER verknüpfen. Die UND-Verknüpfung entspricht der Schnittmenge (Minimum oder MIN-Operator) und die ODER-Verknüpfung der Vereinigungsmenge (Maximum bzw. Max-Operator).

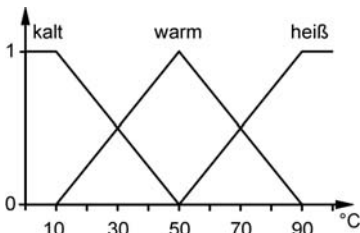
Jede dieser Fuzzy-Regeln beschreibt eine Strategie, das Verhalten der Fuzzy-Regelfunktion zu bestimmen. Zur mathematischen Verarbeitung der WENN-DANN-Regeln muss eine Operation zwischen den unscharfen Werten des WENN-Teils und denen des DANN-Teils gefunden werden. Die Verarbeitungsvorschrift für die WENN-DANN-Regeln wird als *Fuzzy-Inferenz* bezeichnet. Eine gebräuchliche Art einer Auswertung der Fuzzy-Regeln in der Automatisierungstechnik ist die MAX-MIN-Methode. Wie diese Methode die Fuzzy-Regeln abarbeitet, ist im folgenden Beispiel dargestellt.

Beispiel: Fuzzifizierung, Aufstellen der Fuzzy-Regeln und MAX-MIN-Methode

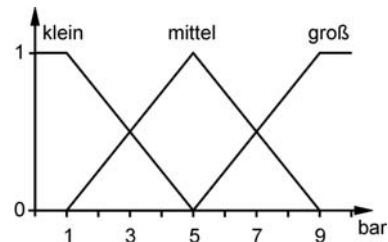
Die Stellung eines Entlüftungsventils soll in Abhängigkeit von der Temperatur T und dem Druck P verändert werden.

1. *Fuzzifizierung*: Für die drei Größen werden linguistische Terme eingeführt und Zuordnungsfunktionen gebildet.

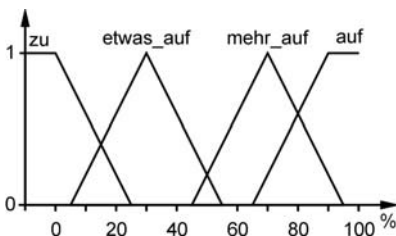
Temperatur



Druck



Ventilstellung



2. Aufstellen der Fuzzy-Regeln

Mit den linguistischen Termen der Temperatur und des Drucks lassen sich folgende sinnvolle Regeln aufstellen:

Regel 1: WENN die Temperatur kalt und der Druck klein, DANN Ventil zu.

Regel 2: WENN die Temperatur kalt und der Druck mittel, DANN Ventil zu.

Regel 3: WENN die Temperatur warm und der Druck klein, DANN Ventil zu.

Regel 4: WENN die Temperatur warm und der Druck mittel, DANN Ventil etwas_auf.

Regel 5: WENN die Temperatur heiß und der Druck mittel, DANN Ventil mehr_auf.

Regel 6: WENN die Temperatur warm und der Druck groß, DANN Ventil mehr_auf.

Regel 7: WENN die Temperatur heiß und der Druck groß, DANN Ventil auf.

3. Auswertung nach der MAX-MIN-Methode

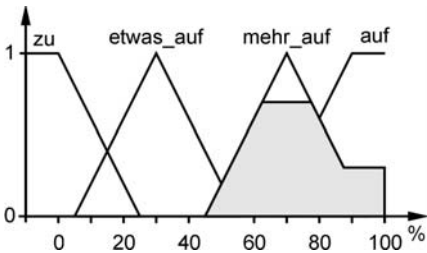
Das Inferenzschema soll für die scharfen Eingangswerte $T = 60\text{ °C}$ und $P = 9\text{ bar}$ ausgewertet werden.

Aus der Fuzzifizierung der Eingangsgrößen Temperatur und Druck sind folgende Zugehörigkeiten ablesbar: Temperatur T: 0-kalt; 0,75-warm und 0,25-heiß. Druck P: 0-klein, 0-mittel, 1-groß. Damit greifen nur die Regel 6 und Regel 7.

Regel 6: $\text{MIN}(0,75 \text{ und } 1) = 0,75$;

Regel 7: $\text{MIN}(0,25 \text{ und } 1) = 0,25$.

Ergebnis der Auswertung:



Die schraffierte Fläche bestimmt das Ergebnis der Auswertung der Regeln nach der MAX-MIN-Methode und ergibt sich aus dem in der Höhe $H = 0,75$ abgeschnittenen Fuzzy-Term „mehr_auf“ vereint mit dem in der Höhe $H = 0,25$ abgeschnittenen Fuzzy-Term „auf“.

Das Ergebnis der Auswertung der Regeln nach der MAX-MIN-Methode ist wiederum eine unscharfe Ausgangsgröße. Für die Fuzzy-Regelfunktion muss diese unscharfe Information in einen repräsentativen (scharfen) Zahlenwert umgesetzt werden, damit der Wert von einem analogen Stellglied verarbeitbar ist. Dieser Vorgang wird als *Defuzzifizierung* bezeichnet.

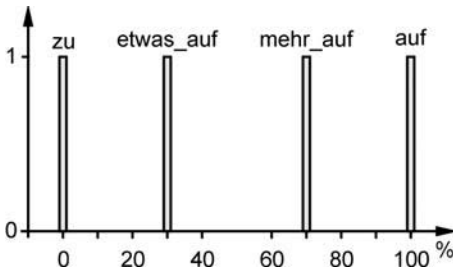
Für die Defuzzifizierung (Bildung des scharfen Ausgabewertes) werden in der Fuzzy-Theorie mehrere Methoden angeboten. Eine Auswahl der existierenden Methoden sind: die Maximum-Methode, die Akkumulationsmethode, die Schwerpunkt-methode, die Singleton-Schwerpunkt-methode und die lineare Defuzzifizierung. Im Folgenden wird nur die Singleton-Schwerpunkt-methode näher dargestellt, da diese Methode sich für die Realisierung der Fuzzy-Regelfunktion für Automatisierungsgeräte am besten eignet.

Die Anwendung der Singleton-Schwerpunkt-methode setzt voraus, dass die Fuzzy-Terme der Ausgangsgröße Singletons (Strichfunktionen) sind. Es wird dann für jede Regel der Erfüllungsgrad μ mit dem Wert des Singleton y multipliziert. Die Produkte $\mu_i y_i$ werden über alle Regeln aufsummiert und durch die Summe der Erfüllungsgrade y_i dividiert.

Damit ergibt sich die „scharfe“ Ausgangsgröße durch:

$$y = \frac{\mu_1 \cdot y_1 + \mu_2 \cdot y_2 + \mu_3 \cdot y_3 + \dots}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3} = \frac{\sum \mu_i \cdot y_i}{\sum \mu_i}.$$

Im vorangegangenen Beispiel würde die Fuzzifizierung der Ausgangsgröße (Ventilstellung in %) wie folgt aussehen:



Die Ventilstellung ist nun durch vier Fuzzy-Terme mit Singleton-Zuordnungs-Funktionen beschrieben.

Die Auswertung der Regeln bei einer Temperatur von 60 °C und einem Druck von 9 bar ergab folgende Erfüllungsgrade: Regel 6: 0,75 mehr_auf; Regel 7: 0,25 auf.

Damit ergibt sich die „scharfe“ Ausgangsgröße: $y = \frac{0,75 \cdot 70\% + 0,25 \cdot 100\%}{0,75 + 0,25} = 77,5\%.$

Zusammenfassend kann die logische Struktur eines Fuzzy-Reglers in die nachfolgend angegebenen Komponenten unterteilt werden.

- | | |
|-------------------|---|
| Fuzzifizierung: | Überführung der Momentanwerte eines Eingangs in Wahrheitsgrade |
| Inferenz: | Bearbeitung des Regelwerks durch Verknüpfung der Eingangswahrheitsgrade mit Hilfe des Minimumoperators (WENN-Teil) und Ermittlung des Wahrheitswertes für den betroffenen Ausgang (DANN-Teil) |
| Defuzzifizierung: | Berechnung der numerischen Ausgangswerte durch Wichtung der resultierenden Zugehörigkeitsfunktionen durch Bildung des Singleton-Schwerpunktes |

Der Einsatz eines Fuzzy-Reglers ist dann sinnvoll, wenn konventionelle Verfahren häufig korrigierende Eingriffe eines Anlagenfahrers erfordern oder wenn der Prozess überhaupt nur manuell gefahren werden kann. Das ist besonders dann der Fall, wenn mehrere betrieblich stark schwankende Prozessparameter das Regelungsergebnis beeinflussen. Konventionell schwer zu beherrschende technische Prozesse sind allgemein durch Mehrgrößen-Abhängigkeit oder nichtlineare und zeitvariante Prozesseigenschaften gekennzeichnet. Sie sind mit mathematischen Modellen nur unzureichend zu beschreiben. Der Einsatz einer Fuzzy-Anwendung ist in diesen Fällen zusätzlich oder auch allein anstelle einer konventionellen Lösung möglich. Beispiele für erfolgversprechende Fuzzy-Anwendungen sind:

- Regelung von nichtlinearen Ein- und vor allem Mehrgrößensystemen,
- Zeitvariante Reglerparametrierung oder Stellgrößenkorrektur,
- Prozessführung mit Koordination unterlagerter Regelungen,
- Qualitätsregelung mehrerer Eigenschaften eines Produkts,
- Realisierung von Logik-Strukturen in Steuerungsprozessen.

Die Verwendung der Fuzzy-Regelfunktion anstelle der PID-Regelfunktion bei einem Eingrößen-Regelsystem kann dann sinnvoll sein, wenn für die vorliegende Regelstrecke keine erfolgsversprechende Parameter K_{PR} , T_n und T_v gefunden werden können.

Die Eingangsgröße der Regelfunktion ist die Regeldifferenz e . Wird nur diese Größe zur Bildung der Ausgangsgröße mit dem Fuzzy-Algorithmus herangezogen, weist die Fuzzy-Regelfunktion gleiches Verhalten wie ein P-Regler auf. Man spricht deshalb auch von einem Fuzzy-P-Regler.

Durch Hinzunahme des Zeitintegrals $\int e \cdot dt$ zur Bildung der Ausgangsgrößen weist die Fuzzy-Regelfunktion PI-Verhalten auf.

Wird die Regeldifferenzänderung de/dt ebenfalls noch fuzzifiziert und bei der Bildung der WENN-DANN-Regeln hinzugenommen, ergibt sich das PID-Regelverhalten für den Fuzzy-Regelalgorithmus.

Je nach erzeugter Ausgangsgröße y oder dy ergeben sich somit folgende Zusammenhänge:

- Fuzzy-PID-Stellungsalgorithmus: $y = F(e, \int e \cdot dt, \dot{e})$
- Fuzzy-PID-Geschwindigkeitsalgorithmus: $\dot{y} = F(e, \dot{e}, \ddot{e})$

Das nachfolgende Bild zeigt die Struktur einer Fuzzy-PID-Regelfunktion.

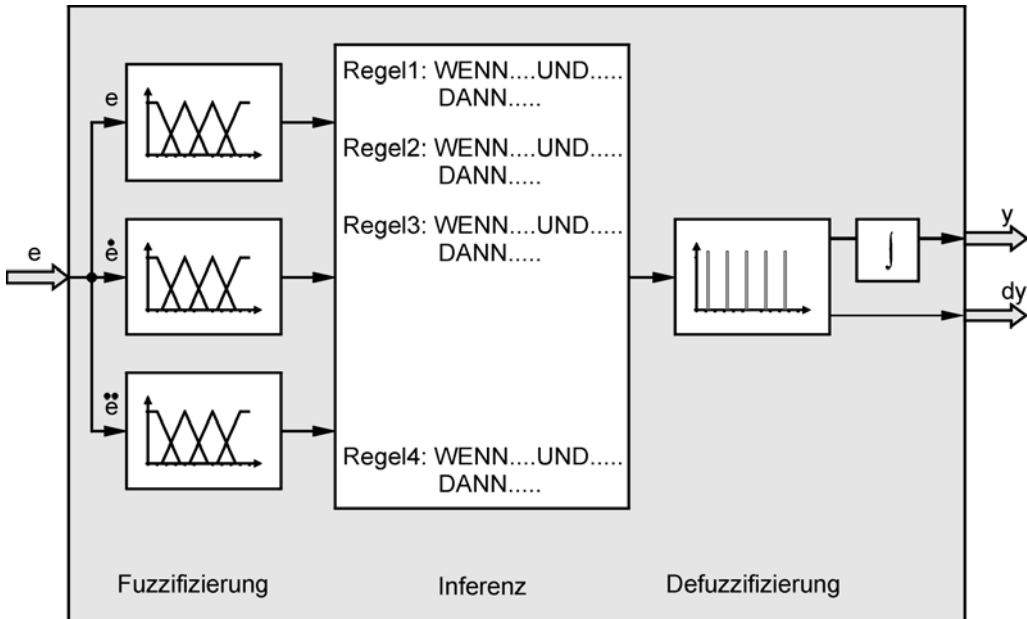


Bild 20.10: Struktur einer Fuzzy-Regelfunktion

Nachfolgend wird für eine Fuzzy-PI-Regelfunktion gezeigt, wie für diese Funktion die Eingangsgrößen und die Ausgangsgröße fuzzifiziert und die WENN-DANN-Regeln aufgestellt werden können.

Es sind folgende Projektierungsschritte für den Entwurf einer Fuzzy-PI-Regelfunktion ($\dot{y} = F(e, \dot{e})$) durchzuführen.

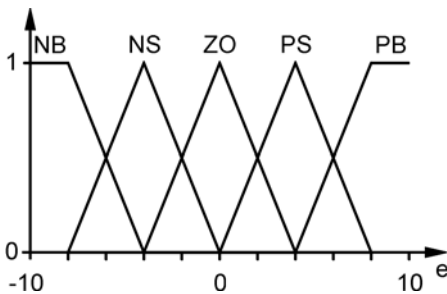
Schritt 1: Fuzzifizierung

Für die Regeldifferenz e und die Änderung der Regeldifferenz \dot{e} werden fünf linguistische Terme eingeführt:

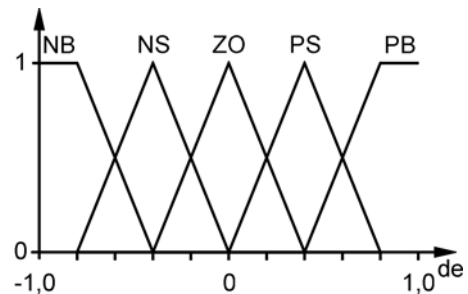
NB	NS	ZO	PS	PB
stark negativ	schwach negativ	ungefähr Null	schwach positiv	stark positiv

Bei der Aufstellung der Zugehörigkeitsfunktionen wird davon ausgegangen, dass sich die Regeldifferenz e in einem Bereich von -10.0 bis $+10.0$ ändern kann, während der Zahlenbereich für die Regeldifferenzänderung \dot{e} nur -1.0 bis $+1.0$ beträgt.

Regeldifferenz e



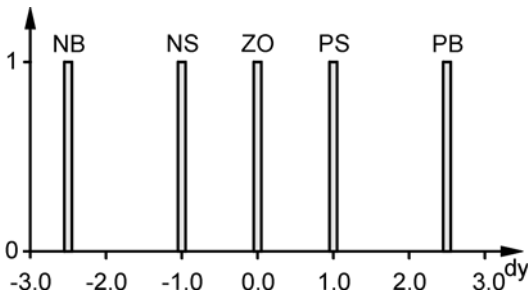
Regeldifferenzänderung \dot{e}



Schritt 2: Singletons für die Ausgangsgröße \dot{y}

Die Ausgangsgröße \dot{y} kann ebenfalls mit den fünf Fuzzy-Termen NB, NS, ZO, PS und PB beschrieben werden. Der Wertebereich für die Stellgrößenänderung wird von -3.0 bis $+3.0$ angenommen.

Ausgangsgröße \dot{y}



Der Singleton bei -2.5 (negativ groß) bedeutet bei voller Erfüllung beispielsweise, dass die Stellgrößenänderung \dot{e} -2.5 beträgt, die Stellgröße y demnach um den Wert 2.5 verkleinert wird.

Schritt 3: Aufstellen der WENN-DANN-Regeln

Mit den Fuzzy-Termen der beiden Eingabevariablen e und de lassen sich bei jeweils fünf linguistischen Termen insgesamt 25 verschiedene Regeln aufstellen. Nicht alle davon sind jedoch auch sinnvoll. Je kleiner und übersichtlicher die Regelbasis angelegt wird, umso besser können Auswirkungen bei Änderungen der Fuzzifizierung beobachtet werden. Bei diesem Beispiel wurden insgesamt 9 Regeln gewählt, die zu einem guten Regelergebnis geführt haben.

Regel 1:	WENN	$e = \text{NB}$	UND	$de = \text{ZO}$	DANN	$dy = \text{NB}$
Regel 2:	WENN	$e = \text{NS}$	UND	$de = \text{ZO}$	DANN	$dy = \text{NS}$
Regel 3:	WENN	$e = \text{ZO}$	UND	$de = \text{ZO}$	DANN	$dy = \text{ZO}$
Regel 4:	WENN	$e = \text{PS}$	UND	$de = \text{ZO}$	DANN	$dy = \text{PS}$
Regel 5:	WENN	$e = \text{PB}$	UND	$de = \text{ZO}$	DANN	$dy = \text{PB}$
Regel 6:	WENN	$e = \text{ZO}$	UND	$de = \text{NB}$	DANN	$dy = \text{NB}$
Regel 7:	WENN	$e = \text{ZO}$	UND	$de = \text{NS}$	DANN	$dy = \text{NS}$
Regel 8:	WENN	$e = \text{ZO}$	UND	$de = \text{PS}$	DANN	$dy = \text{PS}$
Regel 9:	WENN	$e = \text{ZO}$	UND	$de = \text{PB}$	DANN	$dy = \text{PB}$

Die Projektierung der Fuzzy-PI-Regelfunktion ist damit abgeschlossen. Die Auswertung der Regeln und anschließende Defuzzifizierung erfolgt nach der beschriebenen MAX-MIN-Methode und dem Singleton-Schwerpunktverfahren. Soll die Regelfunktion mit einem Automatisierungsgerät realisiert werden, so muss die Auswertung der Regeln und die Defuzzifizierung in Steueranweisungen übertragen werden. Die Firma SIEMENS bietet mit der Software „Fuzzy-Control“ ein Projektierungswerkzeug an, mit dem die beschriebenen Schritte sehr leicht ausgeführt werden können. Das Ergebnis der Projektierung ist dann ein Funktionsbaustein FB mit zugehörigem Instanz-Datenbaustein DB bzw. zugehöriger Instanz, der alle erforderlichen Berechnungsschritte zur Bildung der Ausgabegröße ausführt.

20.3.3 Stellsignaltypen

Die Stellsignale werden in der Signalausgabe der Regler erzeugt und sind die physikalischen Repräsentanten der Stellgrößen. Die Bildung der Stellgrößen erfolgt gesetzmäßig durch die bereits beschriebenen Regelfunktionen mit deren Zweipunkt-, Dreipunkt-, PID- und Fuzzy-Regelalgorithmen. Die Stellsignale bedürfen einer gesonderten Betrachtung, da sie zu den Stellantrieben und Stellgliedern funktionsmäßig passen müssen.

Stellantriebe haben die Aufgabe, die kontinuierlichen oder quasi-kontinuierlichen Stellsignale von Reglern in entsprechende Hub- oder Drehbewegungen zur Betätigung von Stellgliedern umzusetzen. Dazu benötigen sie eine elektrische oder pneumatische bzw. hydraulische Hilfsenergie.

Stellglieder sind im Prinzip steuerbare „Widerstände“ (Drosselemente) zur Beeinflussung von Energie- oder Massenströmen. Typische Stellglieder für elektrische Energieflüsse sind Transistoren und Thyristoren, für Massenströme (Gase, Flüssigkeiten, Feststoffe) werden Ventile, Klappen und Schieber verwendet.

20.3.3.1 Unstetige Stellsignale (Zweipunkt, Dreipunkt)

Das Stellsignal eines Reglers steht mit der Ausgangsgröße oder Stellgröße des Reglers in einer engen Beziehung. Ein elektrisches Stellsignal liefert einen Spannungswert und repräsentiert einen Stellgrößenwert, der in modernen Reglern im Prinzip ein abstraktes Zahlenergebnis der Regelfunktion ist. Man unterscheidet zu Beschreibung ihrer besonderen Eigenschaften stetige und unstetige Stellsignale.

Ein Stellsignal wird als unstetig bezeichnet, wenn es schaltet, d. h. sich sprunghaft ändert, und dabei die Stellgröße des Reglers keine beliebigen Zwischenwerte innerhalb des Stellbereichs annehmen kann. Es wird noch gezeigt werden, dass Schritt-Stellsignale und pulsweitenmodulierte Impuls-Stellsignale auch geschaltet werden und sich sprunghaft ändern und doch keine unstetigen Stellsignale sind, da die Stellgrößen fast alle Zwischenwerte innerhalb des Stellbereichs annehmen können. Es kommt also nicht auf die Stufigkeit der Signalform an, sondern auf den Informationsgehalt des Stellsignals. Wenn das unstetige Stellsignal nur zwei oder drei Stellgrößenwerte repräsentieren kann, spricht man von einem 2- oder 3-Punkt-Stellsignal.

Zweipunkt-Stellsignal

Bei einer Zweipunktregelung besteht das Stellglied aus einem Schalter, der die Schaltzustände „EIN“ oder „AUS“ annehmen kann. Das von der Signalausgabe des Zweipunktreglers ausgegebene unstetige Stellsignal ist binär und kann immer nur einen von zwei möglichen Stellgrößenwerten (1 oder 0) repräsentieren, die von den Schaltpunkten der Zweipunktregelfunktion abhängig sind. Beim Erreichen des oberen Abschaltpunktes x_O wird das Stellsignal ausgeschaltet und beim Erreichen des unteren Abschaltpunktes x_U eingeschaltet.

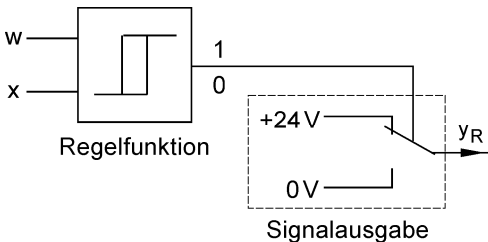
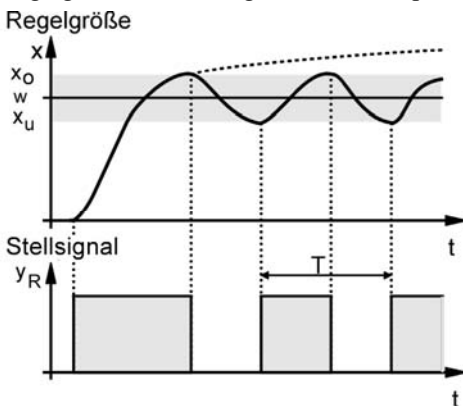


Bild 20.11:
Unstetiges Zweipunkt-Stellsignal

Regelgröße und Stellsignal eines Zweipunktreglers:



Der Regelvorgang funktioniert nur, wenn der Endwert der Regelgröße x im eingeschalteten Zustand größer als der obere Abschaltpunkt und der Endwert im ausgeschalteten Zustand kleiner als der untere Abschaltpunkt werden kann. Es muss also im eingeschalteten Zustand mit einem Leistungsüberschuss gearbeitet werden, der in der Regel etwa 100 % beträgt. Bedingt durch Trägheiten der Regelstrecke kann es zu einem Überschreiten bzw. Unterschreiten der Regelgrößen-Schaltpunkte kommen (im Bild nicht eingezeichnet).

Dreipunkt-Stellsignal

Bei einem Dreipunkt-Stellsignal muss das Stellglied über zwei Schaltkontakte verfügen, mit denen die drei Schaltzustände EIN1 – AUS – EIN2 realisiert werden können. Die beiden vom Dreipunktregler ausgehenden un stetigen Stellsignale sind durch die von der Regelfunktion vorgegebenen Schaltpunkte bestimmt.

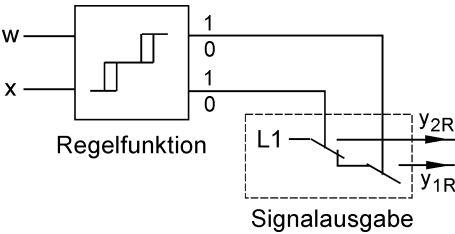
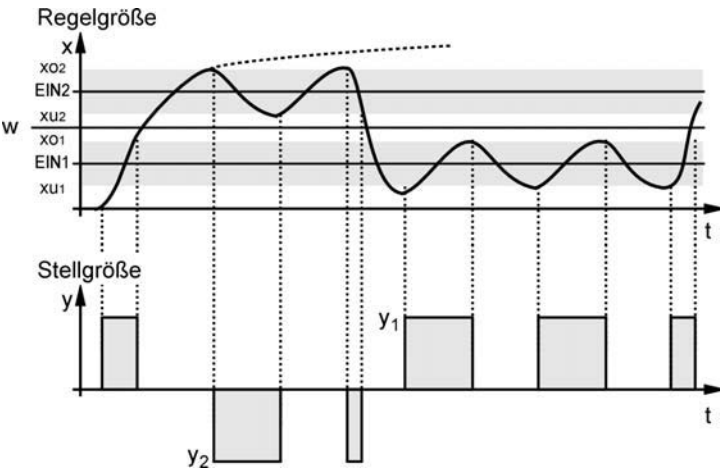


Bild 20.12:
Unstetiges Dreipunkt-Stellsignal

Regelgröße und Stellsignal eines Dreipunktreglers:



Zum Beispiel Temperaturregelung eines Lager-raums. Dann ist:

- x = Temperatur,
- y₁ = 100 % heizen,
- y₂ = 100 % kühlen.

(w und x können im positiven oder negativen Temperaturbereich liegen)

Dreipunkt-Stellsignale sind besonders zur Ansteuerung motorischer Stellglieder geeignet, und zwar für die Schaltstellungen Rechtslauf, Aus, Linkslauf des Stellmotors. Weitere Einsatzgebiete sind Wärme-, Kälte-, Klimakammern sowie Werkzeugbeheizungen für kunststoffverarbeitende Maschinen.

20.3.3.2 Kontinuierliche (stetige) Stellsignale

Ein kontinuierliches Stellsignal ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stellgröße y jeden Wert innerhalb des Stellbereichs annehmen kann. Damit können Stellglieder mit analogem Eingang angesteuert werden, die dann proportional zur Stellgröße Klappenöffnungen, Drehwinkel oder Schieberpositionen einstellen. Die Stellgröße wird dabei als normiertes Stromsignal 0 ... 20 mA oder 4 ... 20 mA oder auch als normiertes Spannungssignal 0 ... 10 V von SPS-Analogausgabe-Baugruppen ausgegeben. Regler mit kontinuierlichem Stellgrößensignal werden als K-Regler bezeichnet. Das kontinuierliche Stellsignal wird überall dort verwendet, wo das Stellglied ein ununterbrochenes Stellsignal erfordert. Das Hauptanwendungsgebiet ist die Ansteuerung von pneumatischen oder hydraulischen Stellgliedern. über zwischen geschaltete Signalumformer.

Beispiel einer kontinuierlichen Signalausgabe ist die nach einem PID-Algorithmus gebildete Stellgröße y , die an einen pneumatischen Stellantrieb gelegt wird. Bei $x = w$ muss die Stellgröße y den richtigen Wert ununterbrochen aufweisen.

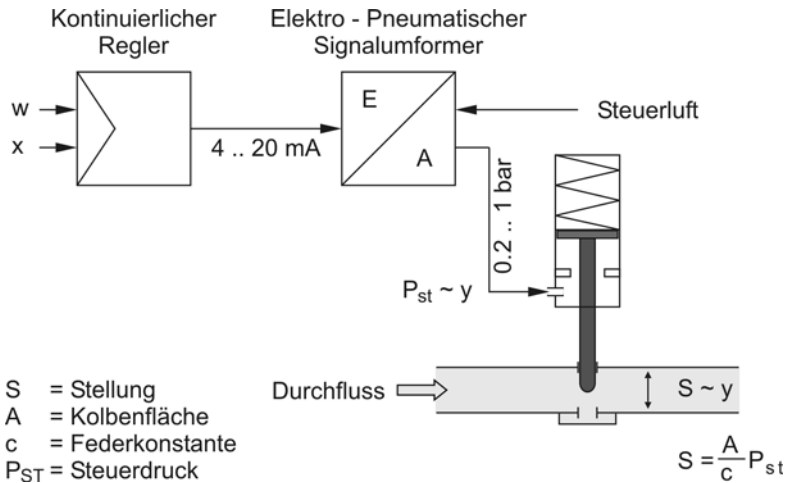
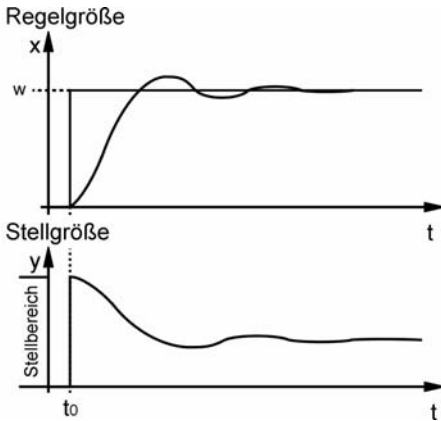


Bild 20.13:
 Kontinuierlicher
 Stellantrieb

Der mögliche zeitliche Verlauf der Regelgröße x und der Stellgröße y bei einer PID-Regelfunktion mit kontinuierlichem Stellsignal für die Stellgröße y ist in den beiden folgenden Zeitdiagramme für eine sprungartige Verstellung des Sollwertes w dargestellt.



Der Verlauf der Regelgröße zeigt, dass nach einem kurzen Einschwingvorgang die Regelgröße keine Abweichung mehr zum Sollwert w zeigt.

Die Stellgröße y nimmt zunächst den größten Wert innerhalb des Stellbereichs an und pendelt sich dann auf den Wert ein, bei dem die Regelgröße x den Sollwert w erreicht.

20.3.3.3 Quasi-kontinuierliche Schritt-Stellsignale

Das Schritt-Stellsignal besteht aus zwei binären Ansteuersignalen y_1 und y_2 , die auf Stellglieder wirken, welche die drei Schaltzustände RECHTS, AUS, LINKS annehmen können. Während der Impulsdauer der Ansteuersignale läuft der Motor mit Nenndrehzahl und verstellt über das Getriebe und die Gewindespindel den Schieber. In den Impulspausen bleibt der Motor stehen. Der motorische Stellantrieb integriert die Stellimpulse und bildet so die Stellgröße y . Der Stellmotor erhält sowohl in der einen Richtung ($y_1 = \text{RECHTS}$ bei $e > 0$) wie auch in der anderen Richtung ($y_2 = \text{LINKS}$ bei $e < 0$) nur solange Stellsignale, bis der Istwert x nicht mehr vom Sollwert w abweicht. Bei $x = w$ hat der Schieber die richtige Position erreicht und der Motor steht still. Das Getriebe dient der Drehzahlübersetzung und Drehmomentwandlung.

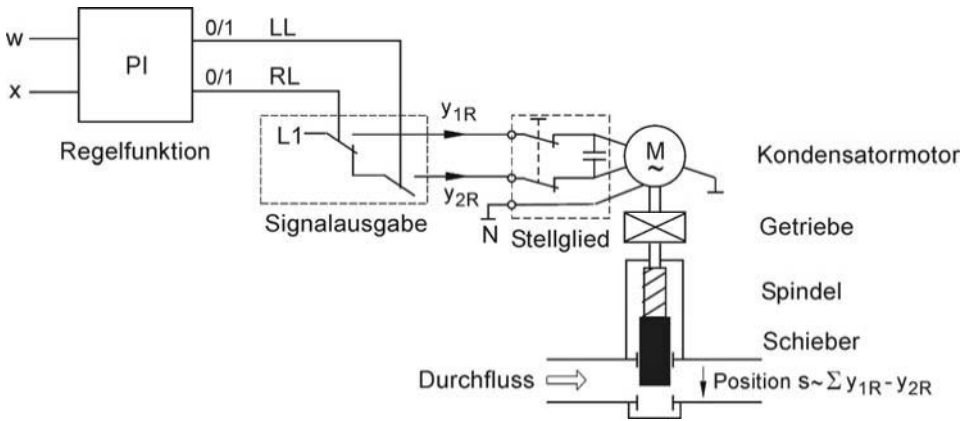
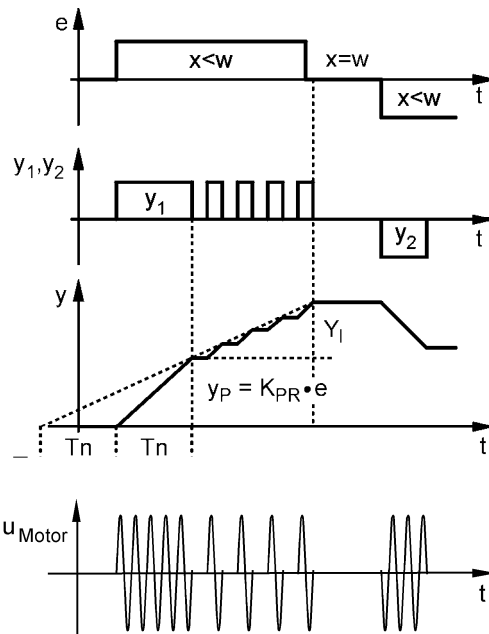


Bild 20.14: Quasi-kontinuierlicher Schritt-Stellantrieb (RL = Rechtslauf, LL = Linkslauf)

Dreipunkt-Schrittregler mit verzögerter Rückführung weisen in Verbindung mit einem motorischen Stellantrieb ein *quasistetiges Stellverhalten* auf, da jeder Wert des Stellbereichs erreichbar ist. Die nachfolgenden Zeitfunktionen zeigen die Schritt-Stellsignale in Abhängigkeit von der Regeldifferenz e und dem zurückgelegten Stellweg.



Impulsverhalten des PI-Schrittreglers:

- e = Regeldifferenz $e = w - x$
- y_1, y_2 = Ansteuersignale für Stellmotor
- y = Stellsignal zur Positionierung

Auf eine sprungförmige Änderung der Regeldifferenz e reagiert der PI-Schrittregler sofort durch einen langen „Schritt“. Das Stellsignal y_1 gibt dazu einen langen Impuls aus. Dieser Impuls wird durch den P-Anteil der Regelfunktion verursacht. Die darauffolgenden kürzeren Impulse werden durch den I-Anteil der Regelfunktion gebildet.

Der Stellmotor wird impulsweise mit Nennspannung angesteuert. Als Stellglied eignet sich ein Triac, auf dessen Gate die Ansteuerimpulse y_1, y_2 geführt werden.

Bild 20.15: Quasi-kontinuierliches Schrittssignal

20.3.3.4. Quasi-kontinuierliche Impuls-Stellsignale (pulsweitenmoduliert)

Ein pulswertenmoduliertes-Stellsignal entsteht durch Umwandlung der kontinuierlichen Ausgangsgröße einer PID-Regelfunktion in ein Signal bestimmter Impulslänge bei konstanter Periodendauer. Bei größer werdender Impulszeit verringert sich die Pausenzeit entsprechend. Die Reglerausgangsgröße y_R bestimmt das Impuls-Pausen-Verhältnis des Stellsignals.

Die nachfolgenden Zeitfunktionen zeigen das Impuls-Stellsignal, das bei einer sprunghaften Änderung der Regeldifferenz e bei einer PID-Regelfunktion entsteht.

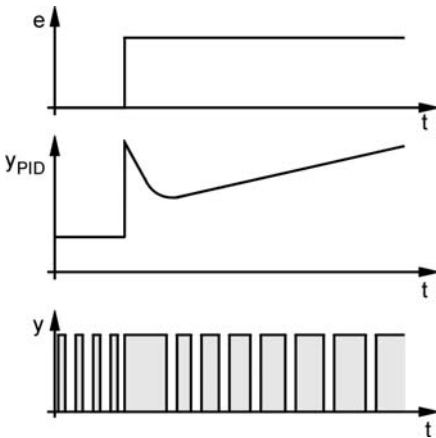


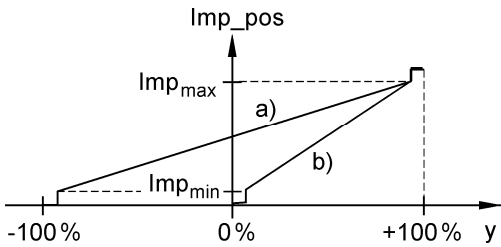
Bild 20.16:
Quasi-kontinuierliches Impuls-Stellsignal

y_{PID} = Ausgangsgröße Sprungantwort der PID-Regelfunktion

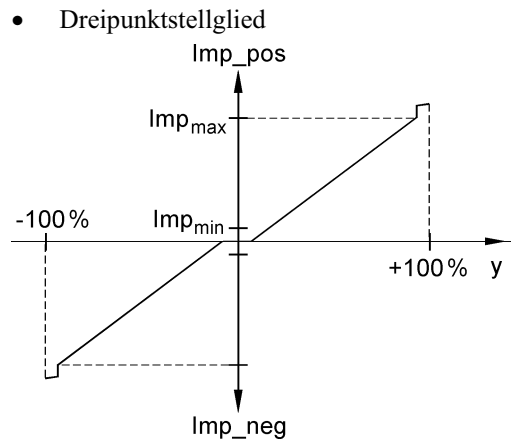
y = Impuls-Stellsignal
Aus dem Zeitverhalten des Stellsignals y ist zu erkennen, dass die Impulsbreite abhängig von der Ausgangsgröße y_{PID} der Regelfunktion ist.

Impuls-Stellsignale werden zur Realisierung von PID-Reglern mit Impulsausgang zur Ansteuerung proportionaler Stellglieder benötigt. Zur Signalausgabe stehen zwei Binärausgänge mit den Bezeichnungen Imp_pos und Imp_neg zur Verfügung.

- Zweipunktstellglied mit
 - a) bipolarem Stellbereich (-100 % ... +100 %)
 - b) unipolarem Stellbereich (0 ... +100 %)



Imp_max = Periodendauer - Imp_min
 Imp_min = Mindestimpulsdauer



Die voranstehenden Kennlinien zeigen, dass die Ansteuerung proportionaler Stellglieder mit Impuls-Stellsignalen zu einem quasikontinuierlichen Stellverhalten führt.

Ein zum Impuls-Stellsignal passendes Stellglied ist z. B. ein Transistorsteller (IGBT), der einen Gleichstrommotor mit parallel geschalteter Freilaufdiode ansteuert und über die Impulsbreite dessen Drehzahl n beeinflusst.

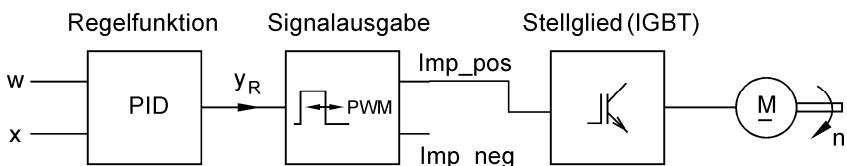


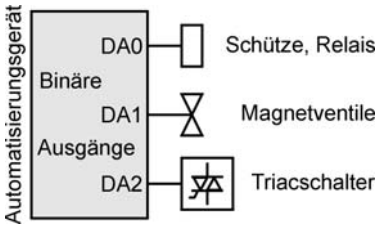
Bild 20.17: Quasi-kontinuierlicher Impuls-Stellantrieb (für nur eine Drehrichtung des Motors)

20.4 Stellglieder

Das Stellglied bestimmt die Art des Stellsignals, das im Regler gebildet wird. In sehr vielen Fällen werden Ventile oder Klappen zur Verstellung von Stoff- oder Energieströmen eingesetzt. Je nach Antrieb dieser Drosselorgane sind unterschiedliche Stellsignale erforderlich.

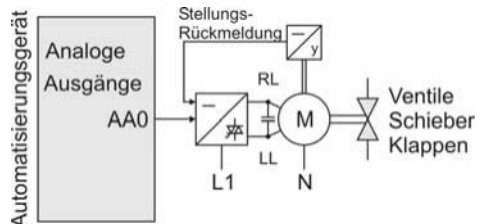
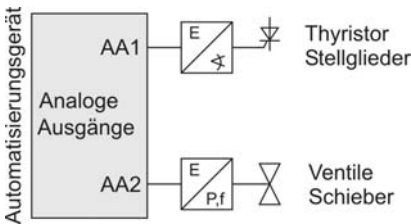
- Schaltende Stellglieder:**

Schaltenden Stellgliedern können mit un stetigen oder Impuls-Stellsignalen angesteuert werden. Schaltende Stellglieder sind Schütze, Magnetventile, Thyristoren oder Leistungstransistoren. Ein schaltendes Stellglied kann nur die Zustände EIN oder AUS annehmen.



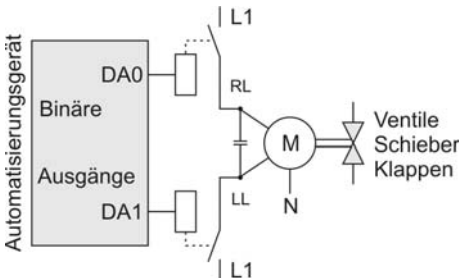
- Proportionale Stellglieder:**

Proportional zum Wert der Stellgröße y werden Drehwinkel oder Positionen eingenommen, d. h. innerhalb des Stellbereiches wirkt die Stellgröße in analoger Weise auf den Prozess ein. Zu dieser Gruppe von Stellgliedern gehören federbelastete pneumatische Antriebe aber auch motorische Antriebe mit Stellungsrückmeldung.



- Integrierende Stellglieder:**

Motorische Stellantriebe haben eine integrierende Wirkung. Ein großer Vorteil elektrischer Stellantriebe gegenüber pneumatischen Stellantrieben liegt darin, dass im Beharrungszustand keine Stellgröße y_R mehr erforderlich ist. Der Motor bleibt stehen und hat durch das Getriebe eine ausreichende Hemmung.



Reglerart und Stelleinrichtung bzw. Stellglied müssen zusammen passen.

20.5 Grundlagen der digitalen Regelung

20.5.1 Wirkungsplan digitaler Regelkreise

Bei der Realisierung eines Reglers mit einem Automatisierungssystem wird die Regelfunktion durch einen Algorithmus dargestellt, der zyklisch aufgerufen wird, um aus dem aktuellen Wert der Regeldifferenz e den neuen Wert der Stellgröße y zu bilden. Die Verarbeitung der gemessenen Signale und die Bestimmung der Stellgröße erfolgt zeitlich getaktet und nicht kontinuierlich. Man spricht von zeitdiskreten Regelungssystemen bzw. digitalen Reglern.

Im Unterschied zu einem kontinuierlichen Regler (Analogregler) wird bei einem digitalen Regler der Istwert x abgetastet und durch einen Analog-Digital-Umsetzer (A/D-Umsetzer) in ein digitales Signal überführt. Wird der Führungswert w nicht wie üblich mit einem Zahleneinsteller, sondern als analoge Spannung vorgegeben, dann muss auch dieser Wert über einen A/D-Umsetzer eingelesen werden. Der von der Regelfunktion berechnete digitale Wert für die Stellgröße $y_R(kT_A)$ wird, falls ein kontinuierliches Stellsignal erforderlich ist, durch einen Digital-Analog-Wandler in ein analoges Stellsignal überführt und an die Regelstrecke ausgegeben. Die Schreibweise $y_R(kT_A)$ für das Stellsignal bedeutet, dass der aktuelle Wert als eine diskrete Folge von Ausgangswerten im zeitlichen Abstand T_A ausgegeben wird.

Alle zur digitalen Regelung erforderlichen Funktionen werden vom Automatisierungsgerät bereitgestellt. In Bild 20.18 bedeuten AE = Analogeingang und AA = Analogausgang der entsprechenden Analogbaugruppen, Zeichen # = digital, Zeichen \cap = analog.

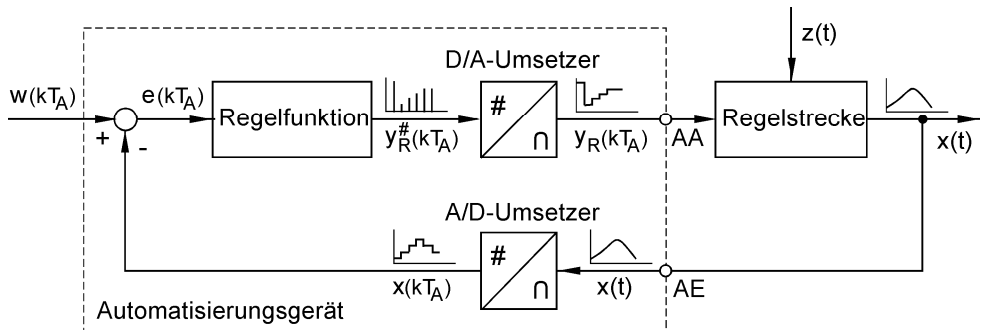


Bild 20.18: Digitaler Regelkreis

20.5.2 Abtastung, Abtastzeit

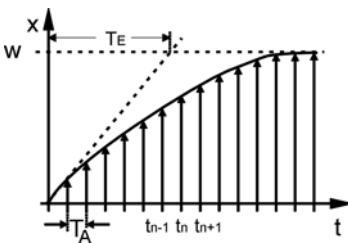
Ein wesentliches Merkmal eines digitalen Reglers ist die *Abtastung*, die dazu führt, dass der Regler nur zu bestimmten Zeitpunkten auf die Veränderungen der Regelgröße reagieren kann und das Stellsignal ebenfalls nur zu bestimmten Zeiten verändert wird. Der Abstand zwischen den Zeitpunkten wird mit *Abtastzeit* T_A bezeichnet. Während eines Abtastzeitraumes werden Eingangs- und Ausgangswerte des digitalen Reglers konstant gehalten.

Die Abtastzeit T_A bestimmt die Stichprobenhäufigkeit und ist somit ein wichtiger Parameter eines digitalen Reglers. Sie stellt die Zeitspanne dar, die zwischen zwei Bearbeitungen des Regelungsprogramms liegt. Der Unterschied von kontinuierlichen und digitalen Regelssystemen besteht darin, dass aufgrund der Abtastzeit weniger Informationen von der Regelstrecke zum Regler und umgekehrt übertragen werden. Bei der Wahl der Abtastzeit sind mehrere Faktoren zu berücksichtigen.

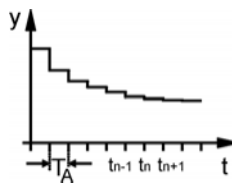
- Die Abtastzeitpunkte müssen einen äquidistanten (gleichen) Zeitabstand haben, d. h., die Abtastzeit T_A muss konstant sein. Die Abtastung sorgt dafür, dass die Regeldifferenz $e(kT_A)$ stets zu gleichen diskreten Zeitpunkten vorliegt, was den Regelalgorithmus vereinfacht. Die Abtastzeit beeinflusst auch die Regelparameter des digitalen Reglers.
- Aus regelungstechnischer Sicht sollte die Abtastzeit so klein wie möglich sein, damit das zeitdiskrete System dieselben Eigenschaften hat wie das kontinuierliche. Als kleinster Wert der Abtastzeit bei Automatisierungsgeräten ist die Zykluszeit denkbar. Diese kann aber nur dann verwendet werden, wenn eine konstante Zykluszeit gewährleistet ist.
- Abtastzeiten, die kleiner als die Wandlungszeiten der Analog-Digital-Umsetzer sind, machen keinen Sinn. Bei langsam aber störsicher arbeitenden Umsetzern wird erst nach der Verschlüsselungszeit z. B. von 60 ms ein Analogwert aktualisiert. Ist die Abtastzeit kleiner als die Verschlüsselungszeit, würde mit unverändert gebliebenen aufeinanderfolgenden Signalwerten gerechnet.
- Wesentlich für die Wahl der Abtastzeit ist die Ersatzzeitkonstante T_E der Regelstrecke, die sich aus der Sprungantwort durch Addition der Einzelzeitkonstanten T_t (Totzeit), T_u (Verzugszeit) und T_g (Ausgleichszeit) ergibt. Um ein zu Analogreglern vergleichbares Reglergebnis zu erzielen, hat die Erfahrung gezeigt, dass die Abtastzeit kleiner als $1/10$ der Ersatzzeitkonstanten T_E der Regelstrecke sein muss.

Das Prinzip der Abtastung eines Istwertes x sowie die Ausgabe der Stellgröße y verdeutlichen die nachfolgend abgebildeten Zeitfunktionen.

Istwertabtastung



Stellgrößenausgabe



Legende:

- T_A = Abtastzeit
 t = Abtastzeitpunkte
 T_E = Ersatzzeitkonstante
 x = Regelgröße
 w = Führungsgröße
 y = Stellgröße

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Abtastzeit T_A bestimmte Mindestzeitwerte wie Programmlaufzeit und Verschlüsselungszeiten nicht unterschreiten und $1/10$ der Ersatzzeitkonstanten T_E der Strecke nicht überschreiten sollte.

Faustformel:

$$\text{Programmlaufzeit, Verschlüsselungszeit} < T_A < 1/10 \cdot \text{Ersatzzeitkonstante } T_E$$

20.5.3 Auflösung

Unter *Auflösung* versteht man die Anzahl der unterscheidbaren Amplitudenstufen bei den Signalen, sie wird durch die Anzahl der Bits angegeben, die zur digitalen Darstellung von Zahlen verwendet werden. Bei einer A/D-Umsetzung mit 12 Bit + 1 VZ-Bit ergibt sich für den Messbereich von 0 ... 10 V die kleinste noch unterscheidbare Eingangsspannungsänderung aus

$$1 \text{ LSB} = \frac{\text{FS}}{2^n} = \frac{10 \text{ V}}{2^{12}} = 2,44 \text{ mV.}$$

Die Auflösung des Analogeingangs, dem die Regelgröße x zugeführt wird, muss in der Regel größer sein als die des Analogausgangs, mit dem das Stellglied angesteuert wird.

Weiterführende Einzelheiten zum Thema Auflösung und A/D-(D/A)-Umsetzer sind im Kapitel Analogwertverarbeitung verfügbar.

20.5.4 Digitaler PID-Algorithmus

Auch bei digitalen Reglern haben die in Abschnitt 20.3.2 beschriebenen Regelfunktionen eine weite Verbreitung gefunden. Es hat sich gezeigt, dass die Regelfunktionen auch bei digitalen Reglern zu entsprechend guten Regelergebnissen führen. Wird die Abtastzeit T_A richtig gewählt, so unterscheidet sich die Wirkung des digitalen Reglers nicht wesentlich vom Analogregler.

Die Regelfunktionen ohne I- und D-Anteil können unverändert übernommen und mit entsprechenden Anweisungen in ein Regelungsprogramm übersetzt werden. Bei Regelfunktionen mit I- und D-Anteil muss das Integral durch eine Summe und der Differenzialquotient durch einen Differenzenquotienten ersetzt werden. Für die Zeitspanne dt wird die Abtastzeit T_A eingesetzt. Damit ergibt sich eine Formel, mit der die Stellgröße y in jedem Abtastzeitpunkt k berechnet werden kann.

Stellgröße $y(k)$ zum Abtastzeitpunkt k :

$$y(k) = K_{PR} \cdot \left(e(k) + \frac{1}{T_n} \sum_{i=1}^k e(i) \cdot T_A + T_v \frac{e(k) - e(k-1)}{T_A} \right)$$

Da die Formel die Stellgröße $y(k)$ zu einem bestimmten Zeitpunkt k berechnet, wird dieser Algorithmus als *Stellungsalgorithmus* bezeichnet. Mit einem rekursiven Algorithmus kann die Summenbildung so ausgeführt werden, dass eine Speicherung aller Regeldifferenzen e nicht erforderlich ist. Mit $\sum_{i=1}^k e(i) = e_{SUM(k)} = e_{SUM(k-1)} + e_k$ ergibt sich:

$$y(k) = K_{PR} \cdot \left(e(k) + \frac{T_A}{T_n} e_{SUM(k)} + T_v \frac{e(k) - e(k-1)}{T_A} \right)$$

Wird für die Bildung eines Schritt-Stellsignals die Berechnung der Stellungsgrößenänderung Δy erforderlich, kann die Änderung der Stellgröße Δy aus der Differenz von $y(k) - y(k-1)$ berechnet werden.

Stellgröße $y(k-1)$ zum Abtastzeitpunkt $k-1$:

$$y(k-1) = K_{PR} \cdot \left(e(k-1) + \frac{T_A}{T_n} e_{SUM(k-1)} + T_v \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T_A} \right)$$

Stellgrößenänderung Δy :

$$\Delta y = K_{PR} \cdot \left(e(k) - e(k-1) + \frac{T_A}{T_n} \cdot e(k) + \frac{T_v}{T_A} (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \right)$$

Die gefundene Formel wird auch als *Geschwindigkeits-Algorithmus* bezeichnet, da die Stellgrößenänderung Δy pro Abtastzeit T_A berechnet wird. Die Stellgrößenänderung Δy kann bei der Bildung des Schritt-Stellsignals für einen Schrittregler direkt für die Bestimmung der jeweiligen Schrittweite herangezogen werden.

20.6 Regler-Programmierung

In diesem Abschnitt wird der Entwurf von Regelungs-Programmierbausteinen für unterschiedliche Reglerarten dargestellt. STEP 7 bietet in der Standard-Bibliothek zwar umfangreiche Regler-Funktionsbausteine an, auf die aber aus didaktischen Gründen nicht zurückgegriffen wird. Vielmehr soll gezeigt werden, dass man Reglerprogramme auch selber schreiben kann, um sie dann in Anwendungsbeispielen als verfügbare Bibliotheksbausteine zur Erprobung einzusetzen. Es wird dann auch möglich sein, die komplexeren industriellen Regler-Funktionen als „Black-box“-Bausteine mit Verständnis in eigene Programme zu integrieren.

20.6.1 Prinzipieller Aufbau eines Regelungsprogramms

Mit Speicherprogrammierbaren Steuerungen können auch Regelungen relativ einfach realisiert werden, wenn man weiß, wie ein Regelungsprogramm prinzipiell aufgebaut ist. Bild 20.19 zeigt eine Struktur, die auf alle Regelungsprogramme angewendet werden kann und die aus den Elementen Einlesen des Istwertes der Regelgröße, Sollwert-Istwert-Vergleich, Regelalgorithmus mit Berücksichtigung von Einstellparametern und Stellsignalausgabe besteht.

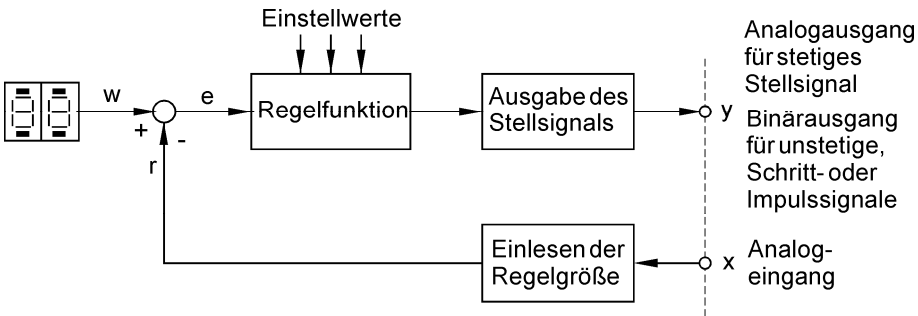


Bild 20.19:
Prinzipieller Aufbau eines Regelungsprogramms mit Bausteinen aus der eigenen Bausteinbibliothek

Anzustreben ist, Regelungsprogramme einfach durch Verschalten fertiger Bausteine aus der eigenen Bausteinbibliothek zu konfigurieren. Für das Einlesen und Ausgeben von Analogwerten stehen bereits Bausteine der Analogwertverarbeitung zur Verfügung. Für die Stellsignale der unetetigen Regler, Schrittregler und Impulsregler genügen Binärausgänge der SPS. Die noch fehlenden Bausteine mit den wichtigsten Regelfunktionen werden in den nachfolgenden Abschnitten entworfen und in anschließenden Beispielen getestet.

20.6.2 Reglereinstellungen

Für die Gruppe der kontinuierlichen und quasi-kontinuierlichen Regler benötigt man zur Versuchsdurchführung Einstellwerte für K_{PR} (Proportionalbeiwert), T_n (Nachstellzeit) und T_v (Vorhaltzeit). Einen Anhaltspunkt geben die Einstellregeln nach Ziegler und Nichols für Regelstrecken mit Ausgleich, Verzögerung 1. Ordnung und Totzeit, die auf die in Bild 20.20 (Seite 644) gezeigte Füllstandsstrecke anwendbar sind.

Reglertyp	K_{PR}	T_n	T_v
P-	$0,5 K_{PRkr}$	-	-
PI-	$0,4 K_{PRkr}$	$0,83 T_{kr}$	-
PID-	$0,6 K_{PRkr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,12 T_{kr}$

Diese Reglereinstellungen sind Näherungswerte und durch Ausprobieren noch zu verbessern.

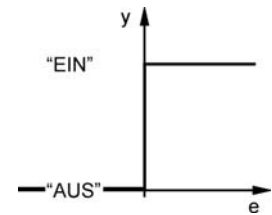
Für den Fall unbekannter Streckenparameter betreibt man den Regler zuerst als P-Regler (nur mit K_{PR}) und steigert diesen Einstellwert solange, bis im Regelkreis Dauerschwingungen auftreten und bestimmte Schwingungszeit T_{kr} und Proportionalbeiwert K_{PRkr} . Es gelten dann nebenstehende Werte.

20.6.3 Zweipunkt-Reglerbausteine

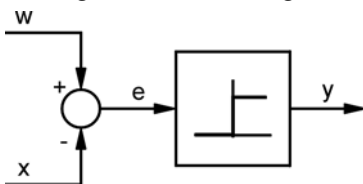
Zweipunktregelungen gehören zu den unstetigen Regelungen, bei denen der Regler einen Schalter nachbildet, der abhängig vom Wert der Regeldifferenz e die Stellgröße „EIN“ oder „AUS“ schaltet. Die Grundlagen der Zweipunktregler wurden bereits in den Kapiteln 20.3.2.1 und 20.3.3.1 dargestellt. Es gibt Zweipunkt-Regelfunktionen ohne und mit Schalthysterese.

• **Regelungsbaustein FC 72: Zweipunktregler ohne Schalthysterese (ZWP)**

Aus der nebenstehenden Kennlinie des Reglers kann die Aufgabe der Zweipunkt-Regelfunktion abgelesen werden. Überschreitet die Regelgröße x den Sollwert w ($e < 0$), dann schaltet der Regler die Stellgröße y auf „0“-Signal. Unterschreitet hingegen die Regelgröße x den Sollwert w ($e > 0$), so schaltet der Regler die Stellgröße y auf „1“-Signal.



Das Funktionsschema der Zweipunktregelung ohne Schalthysterese zeigt die an der Bildung der Reglerfunktion beteiligten Größen.



Legende:

- w = Sollwert
- x = Istwert (Regelgröße)
- e = Regeldifferenz
- y = Stellgröße

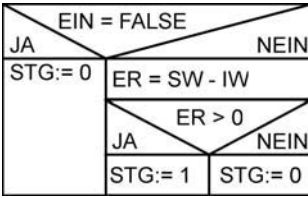
Da die Zweipunktregelfunktion keine Speichereigenschaften besitzt, kann der Reglerbaustein mit der Funktion FC 72 (ZWP) realisiert werden. Über den Funktions-Parameter EIN kann die Regelfunktion ein- oder ausgeschaltet werden. Weitere Eingangsparameter der Funktion FC 72 sind die Führungsgröße w (SW) und die Regelgröße x (IW). Es wird angenommen, dass beide Werte als Gleitpunktzahlen im Bereich von 0.0 bis 100.0 vorliegen. Die Ausgangsgröße STG der Funktion FC 72 (ZWP) ist die binäre Stellgröße y . Im ausgeschalteten Zustand soll der Ausgang STG „0“-Signal erhalten.

FC 72 (ZWP)						
Zweipunktregler ohne Schaltdifferenz						
Eingangsparameter				Ausgangsparameter		
Name	Typ	Bereich		Name	Typ	Bereich
EIN	BOOL					
SW	REAL	0..100.0				
IW	REAL	0..100.0		STG	BOOL	

Legende:

- EIN = Einschalten der Funktion
- SW = Sollwert
- IW = Istwert
- STG = Stellgröße

Programmdarstellung der Funktion FC 72 (ZWP) in Struktogrammform



Die Differenz $SW - IW$ (Regeldifferenz e) wird der lokalen Variablen ER (Error) zugewiesen. Ist die Variable ER positiv, wird der Funktionsausgang STG auf „1“-Signal gesetzt. Ist die Variable ER negativ, wird dem Funktionsausgangs STG „0“-Signal zugewiesen.

Das Programm der Funktion FC 72 kann sowohl in der Programmiersprache AWL wie auch in SCL sehr einfach in entsprechende Anweisungen umgesetzt werden.

STEP 7 Programm (Quelle)

```
FUNCTION FC72 : VOID
VAR INPUT          VAR OUTPUT
  EIN: BOOL ;      STG : BOOL ;
  SW : REAL ;      END_VAR
  IW : REAL ;      VAR_TEMP
END_VAR            ER : REAL ;
                  END_VAR
```

CoDeSys Programm

```
FUNCTION FC72 :BOOL
VAR INPUT          VAR
  EIN:BOOL;        ER:REAL;
  SW:REAL;         END_VAR
  IW:REAL;
END_VAR
```

AWL-Quelle

```
BEGIN
  UN #EIN;
  R #STG;
  BEB;
  L #SW;
  L #IW;
  -R ;
  T #ER;
  L 0.00e+00;
  >R ;
  = #STG;
END_FUNCTION
```

SCL

```
BEGIN
  IF EIN = FALSE
  THEN
    STG:=FALSE;
    RETURN;
  END_IF;
  ER:= SW - IW;
  IF ER > 0 THEN
    STG:=TRUE;
  ELSE
    STG:=FALSE;
  END_IF;
END_FUNCTION
```

AWL

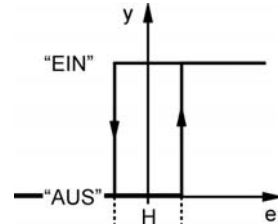
```
LDN EIN
R FC72
RETC
LD SW
SUB IW
ST ER
LD ER
GT 0.0
ST FC72
```

ST

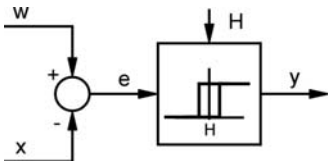
```
IF EIN = FALSE
THEN
  FC72:=FALSE;
  RETURN;
END_IF;
IF ER > 0 THEN
  FC72:=TRUE;
ELSE
  FC72:=FALSE;
END_IF;
```

• **Regelungsbaustein FC 74: Zweipunktregler mit Schalthysterese (ZWPH)**

Aus der Kennlinie des Zweipunktreglers mit Schalthysterese geht hervor, dass sich die Schaltpunkte um die Hysterese H verschieben. Unterschreitet die Regeldifferenz e die negative halbe Hysterese H ($e < -H/2$), so schaltet der Regler die Stellgröße y auf „0“-Signal. Überschreitet hingegen die Regeldifferenz e den Wert der halben Hysterese H ($e > H/2$), dann schaltet der Regler die Stellgröße y auf „1“-Signal.



Das Funktionsschema der Zweipunktregelung mit Schalthysterese zeigt die an der Bildung der Reglerfunktion beteiligten Größen.

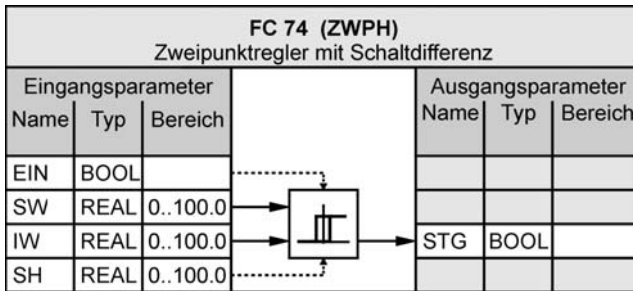


Legende:

- w = Sollwert
- e = Regeldifferenz
- H = Schalthysterese
- x = Istwert (Regelgröße)
- y = Stellgröße

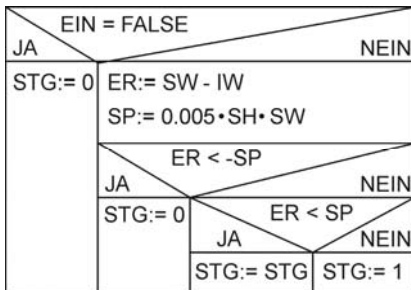
Der Reglerbaustein für die Zweipunktreglerfunktion mit Schalthysterese wird mit der Funktion FC 74 (ZWPH) realisiert. Über den Funktions-Parameter EIN kann die Regelfunktion ein- oder ausgeschaltet werden. Weitere Eingangsparameter der Funktion FC 74 sind die Führungsgröße w (IW), die Regelgröße x (SW) und die Schalthysterese H (SH). Es wird angenommen, dass die Werte als Gleitpunktzahlen im Bereich von 0.0 bis 100.0 vorliegen. Ein vorgegebener Wert von 20.0 für die Schalthysterese SH soll so verrechnet werden, dass sich dabei eine Schalthysterese von 20 % der Führungsgröße w ergibt. Die Ausgangsgröße STG der Funktion FC 74 (ZWPH) ist die binäre Stellgröße y. Im ausgeschalteten Zustand soll der Ausgang STG „0“-Signal erhalten.

Reglerbaustein FC 74 (ZWPH)



- Legende:
- EIN = Einschalten der Funktion
 - SW = Sollwert
 - IW = Istwert
 - SH = Schalthysterese
 - STG = Stellgröße

Programmdarstellung der Funktion FC 74 (ZWPH) im Struktogramm



Die Regeldifferenz e wird berechnet und der temporären Variablen ER zugewiesen. Der berechnete Betrag der beiden Schaltpunkte wird der temporären Variable SP zugewiesen. Ist die Regeldifferenz e kleiner als der negative Schaltpunkt SP (ER < -SP), wird dem Funktionsausgang STG „0“-Signal zugewiesen. Ist die Regeldifferenz e größer als der positive Schaltpunkt (ER > +SP), wird der Funktionsausgang STG auf „1“-Signal gesetzt.

Das Programm der Funktion FC 74 kann sowohl in der Programmiersprache AWL wie auch in SCL sehr einfach in entsprechende Anweisungen umgesetzt werden. Damit der Ausgang STG seinen Wert behält, wenn sich die Regeldifferenz e im Bereich der Hysterese H befindet, muss die Variable STG als IN_OUT_Variablen deklariert werden.

STEP 7 Programm (Quelle)

```

FUNCTION FC74 : VOID
VAR_INPUT          VAR_TEMP
  EIN: BOOL ;      ER : REAL ;
  SW : REAL ;      SP : REAL ;
  IW : REAL ;      END_VAR
  SH : REAL ;
END_VAR

VAR_IN_OUT
  STG : _BOOL ;
END_VAR
    
```

CoDeSys Programm

```

FUNCTION FC74 :_BOOL
VAR_INPUT          VAR
  EIN:_BOOL;      ER:_REAL;
  SW:_REAL;       SP:_REAL;
  IW:_REAL;       END_VAR
  SH:_REAL;
END_VAR

VAR_IN_OUT
  STG : _BOOL;
END_VAR
    
```

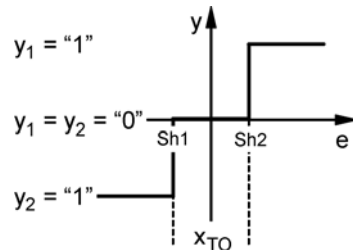
STEP7 AWL-Quelle	STEP 7 SCL	CoDeSys AWL	CoDeSys ST
BEGIN	BEGIN	LDN EIN	IF EIN = FALSE
UN #EIN;	IF EIN = FALSE	R STG	THEN
R #STG;	THEN	RETC	STG:=FALSE;
BEB;	STG:=FALSE;		RETURN;
L #SW;	RETURN;	LD SW	END_IF;
L #IW;	END_IF;	SUB IW	
-R ;		ST ER	ER:= SW - IW;
T #ER;	ER:= SW - IW;	LD 0.005	SP:=0.005*SH*SW;
L 5.00e-03;	SP:=0.005*SH*SW;	MUL SH	
L #SH;		MUL SW	IF ER < -1*SP
*R;	IF ER < (-1)*SP	ST SP	THEN
L #SW;	THEN		STG:=FALSE;
*R ;	STG:= FALSE;	LD ER	ELSIF ER > SP
T #SP;	ELSIF ER > SP	LT(SP	THEN
L #SP;	THEN	MUL -1.0	STG:=TRUE;
L -1.00e+00;	STG:= TRUE;)	END_IF;
*R ;	ELSE	R STG	
L #ER;	STG:=STG;	RETC	
TAK ;	END_IF;		
<R ;		LD ER	
R #STG;	END_FUNCTION	GT SP	
BEB		S STG	
L #ER;			
L #SP;			
>R ;			
S #STG;			
END_FUNCTION			

20.6.4 Dreipunkt-Reglerbausteine

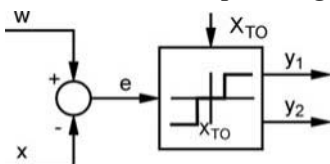
Besitzt das Stellglied einer Regelstrecke zwei binäre Eingänge z. B. für Heizen und Kühlen, wird eine Dreipunkt-Regelfunktion eingesetzt. In den Abschnitten 20.3.2 (Bildung der Regelfunktion) und 20.3.3 (Stellsignaltypen) wurden die Grundlagen des Dreipunktreglers bereits dargestellt. Die Dreipunkt-Regelfunktion kann wieder in eine Regelfunktion mit und ohne Schalthysterese unterteilt werden.

• Regelungsbaustein FC 73: Dreipunktregler ohne Schalthysterese (DRP)

Die nebenstehende Kennlinie gibt das Verhalten einer Dreipunktregelfunktion wieder. Die Differenz der beiden Schaltpunkte S_{h1} und S_{h2} wird mit Totzone X_{TO} bezeichnet. Unterschreitet die Regeldifferenz e den Schaltpunkt S_{h1} , dann schaltet der Regler die Stellgröße y_2 auf „1“-Signal. Überschreitet dagegen die Regeldifferenz e den Schaltpunkt S_{h2} , dann schaltet der Regler die Stellgröße y_1 auf „1“-Signal. Liegt die Regeldifferenz im Bereich der Totzone, haben die beiden Stellgrößenausgänge y_1 und y_2 „0“-Signal.



Funktionsschema der Dreipunktregelung ohne Schalthysterese



Legende:

w = Sollwert x = Istwert (Regelgröße)
e = Regeldifferenz X_{TO} = Totzone
 y_1 = Stellgröße 1 (z. B. Heizen)
 y_2 = Stellgröße 2 (z. B. Kühlen)

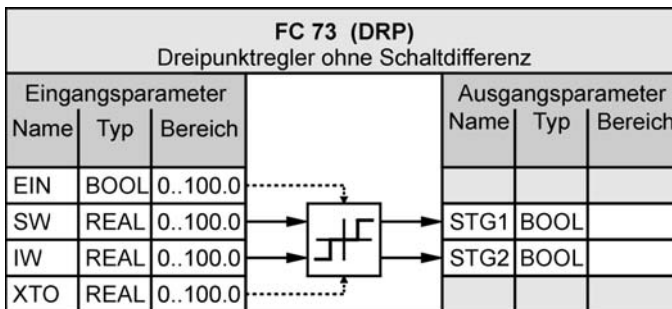
Da die Dreipunkt-Regelfunktion keine Speichereigenschaften besitzt, kann der Reglerbaustein mit der Funktion FC 73 (DRP) realisiert werden. Über den Funktions-Parameter EIN kann die Regelfunktion ein- oder ausgeschaltet werden. Weitere Eingangsparameter der Funktion FC 73 sind die Führungsgröße w (SW), die Regelgröße x (IW) und die Totzone X_{TO} (XTO). Es wird angenommen, dass die Werte als Gleitpunktzahlen im Bereich von 0.0 bis 100.0 vorliegen. Einer Vorgabe von beispielsweise 2.0 für die Totzone X_{TO} würde dabei einem Wert von 2% des Regelgrößenbereichs entsprechen. Der Regelgrößenbereich ergibt sich aus der Differenz der maximalen und minimalen Regelgröße x.

Zahlenbeispiel zur Berechnung der Totzone:

Die Regelgröße Temperatur in einem Lagerraum wird in einem Bereich von -10 °C bis 40 °C erfasst und in das Normsignal $0 \dots 10\text{ V}$ umgesetzt. Der interne Zahlenbereich für den Regelgrößenbereich beträgt $0 \dots 100$. Ein Vorgabewert von $XTO = 2.0$ für die Totzone würde dann bedeuten, dass die Temperatur in einem „toten“ Bereich von $(40\text{ °C} - (-10\text{ °C})) \cdot (XTO/100) = 50\text{ °C} \cdot 0,02 = 1\text{ °C}$ um den Sollwert schwanken darf, ohne dass ein Eingriff des Reglers erfolgt.

Die Ausgangsgrößen STG1 und STG2 der Dreipunkt-Reglerfunktion FC 73 (DRP) sind die binären Stellgrößen y_1 und y_2 . Im ausgeschalteten Zustand sollen beide Ausgänge STG1 und STG2 „0“-Signal erhalten.

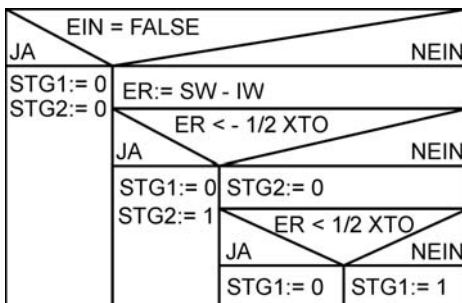
Reglerbaustein FC 73 (DPR)



Legende:

- EIN = Einschalten der Funktion
- SW = Sollwert w
- IW = Istwert x
- XTO = Totzone
- STG1 = Stellgröße y_1
- STG2 = Stellgröße y_2

Programmdarstellung der Funktion FC 73 (DRP) im Struktogramm



Die Regeldifferenz e wird berechnet und der temporären Variable ER zugewiesen. Ist die Regeldifferenz e kleiner als der negative Wert der halben Totzone XTO, wird dem Funktionsausgang STG2 „1“-Signalzustand und STG1 „0“-Signalzustand zugewiesen. Ist die Regeldifferenz e kleiner als der positive Wert der halben Totzone, wird den beiden Ausgängen STG1 und STG2 „0“-Signal zugewiesen. Im anderen Fall wird dem Ausgang STG2 „0“-Signal und dem Ausgang STG1 „1“-Signal zugewiesen.

Der angegebene Wert von XTO kann direkt zur Abfrage übernommen werden, da der Bereich von 0.0 ... 100.0 für den Sollwert gewählt wurde.

Programm der Funktion FC 73 in den Programmiersprachen AWL und SCL:

STEP 7 Programm (Quelle)

```
FUNCTION FC72 : VOID
VAR INPUT          VAR OUTPUT
EIN: BOOL ;        STG1 : BOOL ;
SW : REAL ;        STG2 : BOOL ;
IW : REAL ;        END_VAR
XTO: REAL ;        VAR_TEMP
END_VAR            ER : REAL ;
                  END_VAR
```

AWL-Quelle

```
BEGIN
UN #EIN;
R #STG1;
R #STG2;
BEB;
L #SW;
L #IW;
-R ;
T #ER;
L-5.00e-01;
L #XTO;
*R ;
L #ER;
TAK;
<R ;
S #STG2;
R #STG1;
BEB;
SET ;
R #STG2;
L 5.00e-01;
L #XTO;
*R ;
L #ER;
TAK;
<R ;
R #STG1;
BEB;
SET ;
S #STG1;
```

END_FUNCTION

CoDeSys Programm

```
FUNCTION FC72 :BOOL
VAR INPUT          VAR
EIN:BOOL;          ER:REAL;
SW:REAL;           END_VAR
IW:REAL;
END_VAR
```

AWL

```
LDN EIN
R FC73.STG1
R FC73.STG2
RETC
LD SW
SUB IW
ST ER

LD ER
LT ( XTO
MUL -0.5
)
R FC73.STG1
S FC73.STG2
RETC

LD TRUE
R FC73.STG2

LD ER
LT ( XTO
MUL 0.5
)
R FC73.STG1
RETC

LD TRUE
S FC73.STG1
RETC
```

ST

```
IF EIN = FALSE
THEN
FC73.STG1:=FALSE;
FC73.STG1:=FALSE;
RETURN;
END_IF;

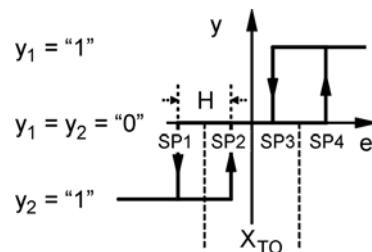
ER:= SW - IW;
IF ER < -0.5*XTO
THEN
FC73.STG1:=FALSE;
FC73.STG2:=TRUE;
ELSIF ER<0.5*XTO
THEN
FC73.STG1:=FALSE;
FC73.STG2:=FALSE;
ELSE
FC73.STG1:=TRUE;
FC73.STG2:=FALSE;
END_IF;
```

• Regelungsbaustein FC 75: Dreipunktregler mit Schalthysterese (DRPH)

Aus der Kennlinie des Dreipunktreglers mit Schalthysterese geht hervor, dass durch das Auftreten einer Schalthysterese H vier Schaltpunkte $SP1$ bis $SP4$ entstehen, die sich aus der Beziehung $\pm\left(\frac{1}{2} \cdot X_{TO} \pm \frac{1}{2} \cdot H\right)$ errechnen.

Überschreitet die Regeldifferenz e den Schaltpunkt $SP4$ erhält die Stellgröße y_1 ein 1-Signal. Unterschreitet dagegen die Regeldifferenz e den Schaltpunkt $SP3$, wird die

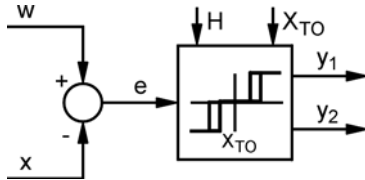
Stellgröße y_1 auf 0-Signal geschaltet. Für die Stellgröße y_2 gilt Entsprechendes.



Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass die Schalthysterese H an beiden Seiten der Totzone X_{TO} gleich groß ist.

Der Kennlinie des Dreipunktreglers mit Schalthysterese ist zu entnehmen, dass die Hysterese H kleiner als die Totzone X_{TO} sein muss, damit sich die Schaltpunkte SP2 und SP3 nicht überlappen. Gibt man die Schalthysterese H als Prozentwert der Totzone X_{TO} in einem Bereich von 0.0 bis 100.0 an, so ist dies gewährleistet.

Das Funktionsschema der Dreipunktregelung mit Schalthysterese zeigt die an der Bildung der Reglerfunktion beteiligten Größen.



Legende:

- w = Sollwert
- x = Istwert (Regelgröße)
- e = Regeldifferenz
- X_{TO} = Totzone
- H = Schalthysterese
- y_1 = Stellgröße 1
- y_2 = Stellgröße 2

Der Reglerbaustein für die Dreipunktreglerfunktion mit Schalthysterese wird mit der Funktion FC 75 (DRPH) realisiert. Über den Funktions-Parameter EIN kann die Regelfunktion ein- oder ausgeschaltet werden. Weitere Eingangsparameter der Funktion FC 75 sind die Führungsgröße w (SW), die Regelgröße x (IW), die Totzone X_{TO} (XTO) und die Schalthysterese H (SH). Es wird angenommen, dass die Werte als Gleitpunktzahlen im Bereich von 0.0 bis 100.0 vorliegen. Wie bei der Dreipunkt-Reglerfunktion ohne Schalthysterese würde der vorgegebene Wert von beispielsweise 2.0 für die Totzone X_{TO} 2 % des gesamten Regelbereichs x entsprechen. Die Schalthysterese wird als Prozentwert der Totzone X_{TO} angegeben. Der Wert von 50.0 bedeutet dabei eine Schalthysterese von 50 % der Totzone X_{TO} .

Zahlenbeispiel zur Berechnung der Schalthysterese:

Die Regelgröße Temperatur in einem Lagerraum wird in einem Bereich von -10 °C bis 40 °C erfasst und in das Normsignal 0..10 V umgesetzt. Für die Totzone wird der Wert $X_{TO} = 2\%$ und für die Schalthysterese der Wert $H = 50\%$ bei einem vorgegebenen Sollwert von $w = 10\text{ °C}$ eingestellt. Es sind die vier Schaltpunkte in $^{\circ}\text{C}$ zu bestimmen.

Lösung:

$$\text{Totzone } X_{TO} = (40\text{ °C} - (-10\text{ °C})) (2/100) = 1\text{ °C};$$

$$\text{Schalthysterese } H = (50/100) X_{TO} = 0,5\text{ °C};$$

Damit berechnen sich die Schaltpunkte zu:

$$\text{Schaltpunkt 1 SP1} = 9,25\text{ °C} (\rightarrow 3,85\text{ V});$$

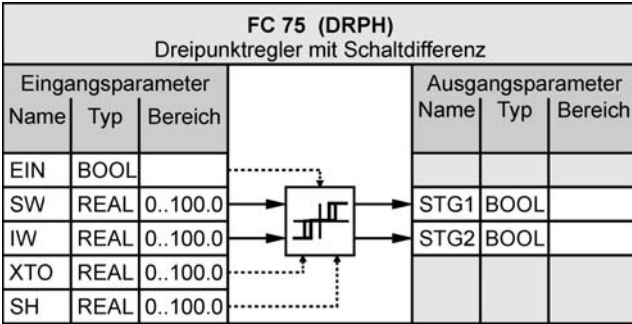
$$\text{Schaltpunkt 2 SP2} = 9,75\text{ °C} (\rightarrow 3,95\text{ V});$$

$$\text{Schaltpunkt 3 SP3} = 10,25\text{ °C} (\rightarrow 4,05\text{ V});$$

$$\text{Schaltpunkt 4 SP4} = 10,75\text{ °C} (\rightarrow 4,15\text{ V}).$$

Die Ausgangsgrößen STG1 und STG2 der Dreipunkt-Reglerfunktion FC 75 (DRPH) sind die binären Stellgrößen y_1 und y_2 . Im ausgeschalteten Zustand sollen beide Ausgänge STG1 und STG2 „0“-Signal erhalten.

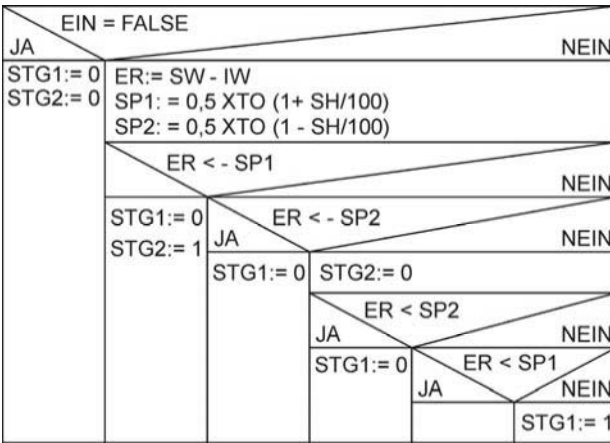
Reglerbaustein FC 75 (DRPH)



Legende:

- EIN = Einschalten der Funktion
- SW = Sollwert
- IW = Istwert
- XTO = Totzone
- SH = Schalthysterese
- STG1 = Stellgröße y_1
- STG2 = Stellgröße y_2

Programmdarstellung der Funktion FC 75 (DRPH) im Struktogramm



Die Regeldifferenz e wird berechnet und der temporären Variable ER zugewiesen. Da jeweils zwei der vier Schaltpunkte symmetrisch zum Nullpunkt liegen, wird nur der Betrag der beiden Schaltpunkte berechnet und den lokalen Variablen SP_1 und SP_2 zugewiesen. Mit den Abfragen der Regeldifferenz ER wird dann der Bereich von links nach rechts durchlaufen.

Das Programm der Funktion FC 75 kann sowohl in der Programmiersprache AWL wie auch in SCL sehr einfach in entsprechende Anweisungen umgesetzt werden. Damit STG1 bzw. STG2 den jeweiligen Wert behält, wenn sich die Regeldifferenz e in einem Bereich der Hysterese H befindet, müssen die Variablen STG1 und STG2 als IN_OUT_Variablen deklariert werden.

STEP 7 Programm (Quelle)

```

FUNCTION FC74 : VOID
VAR INPUT          VAR TEMP
  EIN : BOOL ;      ER : REAL ;
  SW  : REAL ;      SP1 : REAL ;
  IW  : REAL ;      SP2 : REAL ;
  XTO : REAL ;      END_VAR
  SH  : REAL ;
END_VAR

VAR_IN_OUT
  STG1 : BOOL ;
  STG2 : BOOL ;
END_VAR
    
```

CoDeSys Programm

```

FUNCTION FC74 :BOOL
VAR INPUT          VAR
  EIN:BOOL;        ER:REAL;
  SW:REAL;         SP1: REAL ;
  IW:REAL;         SP2: REAL ;
  SH:REAL;        END_VAR
END_VAR

VAR_IN_OUT
  STG1 : BOOL ;
  STG2 : BOOL ;
END_VAR
    
```

STEP7 AWL	STEP 7 SCL	CoDeSys AWL	CoDeSys ST
BEGIN	BEGIN	LDN EIN	IF EIN = FALSE THEN
UN #EIN;	IF EIN = FALSE THEN	R STG1	STG1:=FALSE;
R #STG1;	STG1:=FALSE;	R STG2	STG1:=FALSE;
R #STG2;	STG2:=FALSE;	RETC	RETURN;
BEB;	RETURN;		END_IF;
L #SW;	END_IF;	LD SW	ER:= SW - IW;
L #IW;	ER:= SW - IW;	SUB IW	SP1:=
-R ;	SP1:=	ST ER	0.5*XTO*(1+SH/100);
T #ER;	0.5*XTO*(1+SH/100);	LD SH	SP1:=
L #SH;	SP2:=	DIV 100.0	0.5*XTO*(1-SH/100);
L 1.00e+02;	0.5*XTO*(1-SH/100);	ADD 1.0	
/R ;		MUL XTO	IF ER < -SP1 THEN
L 1.00e+00;	IF ER < -1.0*SP1	MUL 0.5	STG1:=FALSE;
+R ;	THEN	ST SP1	STG2:=TRUE;
L #XTO;	STG1:=FALSE;		
*R ;	STG2:=TRUE;	LD 1.0	ELSIF ER < -SP2 THEN
L 5.00e-01;		SUB(SH	STG1:=FALSE;
*R ;	ELSIF ER < -1.0*SP2	DIV 100.0	
T #SP1;	THEN)	ELSIF ER < SP2 THEN
L #SH;	STG1:=FALSE;	MUL XTO	STG1:=FALSE;
L 1.00e+02;		MUL 0.5	STG2:=FALSE;
/R ;	ELSIF ER < SP2 THEN	ST SP2	
L 1.00e+00;	STG1:=FALSE;		ELSIF ER < SP1 THEN
TAK ;	STG2:=FALSE;	LD ER	STG2:=FALSE;
-R ;		LT(SP1	
L #XTO;	ELSIF ER < SP1 THEN	MUL -1.0	ELSE
*R ;	STG2:=FALSE;)	STG1:=TRUE;
L 5.00e-01;		R STG1	STG2:=FALSE;
*R ;	ELSE	S STG2	END_IF
T #SP2;	STG1:=TRUE;	RETC	
L #ER;	STG2:=FALSE;		
L #SP1;	END_IF;	LD ER	
NEGR;		LT(SP2	
<R ;	END_FUNCTION	MUL -1.0	
R #STG1;)	
S #STG2;		R STG1	
BEB;		RETC	
L #ER;			
L #SP2;		LD TRUE	
NEGR;		R STG2	
<R ;			
R #STG1;		LD ER	
BEB ;		LT SP2	
SET;		R STG1	
R #STG2;		RETC	
L #ER;		LD ER	
L #SP2;		LT SP1	
<R ;		RETC	
R #STG1;			
BEB;		LD TRUE	
L #ER;		S STG1	
L #SP1;			
<R ;			
BEB;			
SET;			
S #STG1;			
END_FUNCTION			

20.6.5 PID-Reglerbaustein

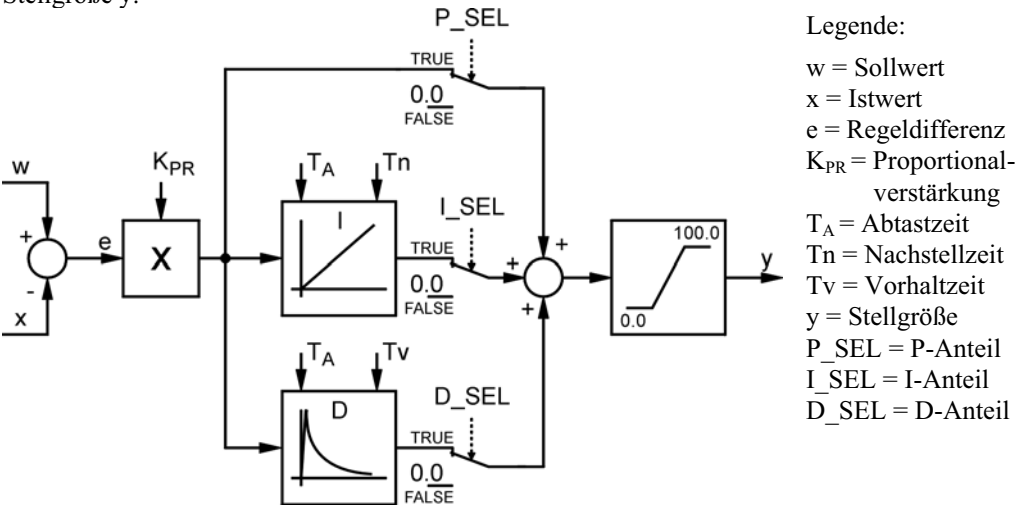
Mit Hilfe des PID-Reglerbausteins kann eine kontinuierliche Regelung mit den verschiedenen PID-Regelfunktionen wie P, PI, PD oder PID ausgeführt werden. Dazu sind der P-Anteil, I-Anteil bzw. D-Anteil über Parametereingänge an dem Baustein einzeln zu- und abschaltbar.

• **Regelungsbaustein FB 70: PID-Regler (PID)**

Grundlage des PID-Reglerbausteins ist die in Abschnitt 20.5.4 dargestellte Formel für die Stellgröße $y(k)$ zu einem beliebigen Abtastzeitpunkt k :

$$y(k) = K_{PR} \cdot \left(e(k) + \frac{T_A}{T_n} e_{SUM} + T_V \frac{e(k) - e(k-1)}{T_A} \right)$$

Das nachfolgende Funktionsschema des PID-Reglerbausteins zeigt sowohl die an der Bildung der Reglerfunktion beteiligten Größen bzw. Parameter als auch das Zustandekommen der Stellgröße y .



- Legende:
- w = Sollwert
 - x = Istwert
 - e = Regeldifferenz
 - K_{PR} = Proportionalverstärkung
 - T_A = Abtastzeit
 - T_n = Nachstellzeit
 - T_V = Vorhaltzeit
 - y = Stellgröße
 - P_SEL = P-Anteil
 - I_SEL = I-Anteil
 - D_SEL = D-Anteil

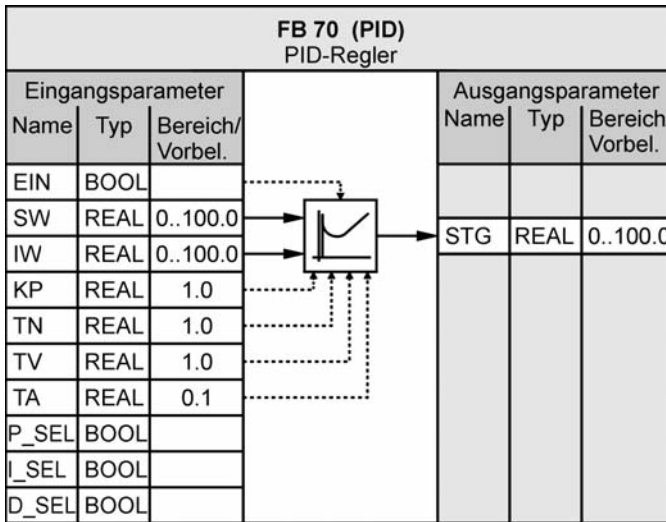
Da die PID-Reglerfunktion über Speichereigenschaften verfügt, wird das Programm mit einem Funktionsbaustein (FB 70) realisiert. Über den Eingangsparameter EIN kann die Regelfunktion ein- oder ausgeschaltet werden. Im ausgeschalteten Zustand werden alle gespeicherten Werte zurückgesetzt. Weitere Eingangsparameter des Funktionsbausteins FB 70 sind die Führungsgröße w (SW), die Regelgröße x (IW) sowie die Einstellwerte Proportionalbeiwert K_{PR} (KP), Nachstellzeit T_n (TN), Vorhaltzeit T_V (TV) und die Abtastzeit T_A (TA).

Es wird angenommen, dass die Führungsgröße w und die Regelgröße x als Gleitpunktzahlen im Bereich von 0.0 bis 100.0 vorliegen. Die Proportionalverstärkung K_{PR} und die Zeitwerte T_n , T_V und T_A sind ebenfalls als Gleitpunktzahlen anzugeben. Bei den Zeitwerten T_n , T_V und T_A entspricht dabei der Zahlenwert einem Zeitwert in Sekunden.

Mit den binären Eingangsparametern P_SEL, I_SEL und D_SEL können die einzelnen Anteile mit einem „1“-Signal zugeschaltet und mit einem „0“-Signal abgeschaltet werden.

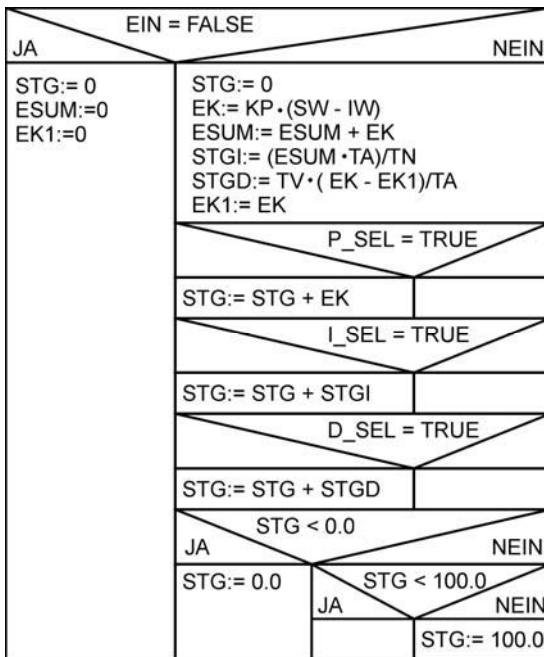
Die Ausgangsgröße STG der PID-Reglerfunktion FB 70 (PID) ist die kontinuierliche Stellgröße y in einem Gleitpunktzahlenbereich von 0.0 ... 100.0.

Reglerbaustein FB 70 (PID)



Legende: EIN = Einschalten der Funktion; SW = Sollwert w; IW = Istwert x; KP = Proportionalbeiwert; TN = Nachstellzeit; TV = Vorhaltzeit; TA = Abtastzeit; P_SEL = Auswahl P-Anteil; I_SEL = Auswahl I-Anteil; D_SEL = Auswahl D-Anteil; STG = Stellgröße y

Programmdarstellung der Funktion FB 70 (PID) im Struktogramm



Lokale stationäre Variablen des Funktionsbausteins:

EK1 = Regeldifferenz des vorhergehenden Abtastzeitpunktes mit dem Proportionalbeiwert KP multipliziert.

ESUM = Summe aller Regeldifferenzen, die mit dem Proportionalbeiwert KP multipliziert sind.

EK = Regeldifferenz mit dem Proportionalbeiwert KP multipliziert. Der Wert entspricht dem P-Anteil.

STGI = Berechneter I-Anteil der Stellgröße STG.

STGD = Berechneter D-Anteil der Stellgröße STG.

Nachfolgend ist das Steuerungsprogramm des Funktionsblocks FB 70 nur in der Programmiersprache SCL bzw. ST dargestellt.

STEP 7 Programm (SCL-Quelle)

```

FUNCTION_BLOCK FB70
VAR_INPUT
  EIN : BOOL ;
  SW, IW : REAL ;
  KP, TN, TV : REAL := 1.000e+00;
  TA : REAL := 1.000e-01;
  P_SEL, I_SEL, D_SEL: BOOL ;
END_VAR
BEGIN
  IF EIN = FALSE THEN
    STG:=0.0; EK1:=0.0; ESUM:=0.0;
    RETURN;
  END_IF;
  STG:= 0.0;
  EK:= KP*(SW-IW);
  ESUM:= ESUM + EK;
  STGI:= (ESUM*TA)/TN;
  STGD:= TV*(EK-EK1)/TA;
  EK1:=EK;

  VAR_OUTPUT          VAR_TEMP
  STG : REAL ;        EK : REAL ;
END_VAR              STGI : REAL ;
VAR                  STGD : REAL ;
  EK1 : REAL ;        END_VAR
  ESUM : REAL;
END_VAR

  IF P_SEL = TRUE THEN
    STG:=STG+EK; END_IF;
  IF I_SEL = TRUE THEN
    STG:=STG+STGI END_IF;
  IF D_SEL = TRUE THEN
    STG:=STG+STGD; END_IF;
  IF STG < 0.0 THEN STG:= 0.0;
  ELSIF STG > 100.0 THEN
    STG:= 100.0;
  END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

```

CoDeSys Programm (ST)

```

FUNCTION_BLOCK FB70
VAR_INPUT
  EIN: BOOL;
  SW, IW:REAL;
  KP, TN, TV:REAL:=1.0;
  TA:REAL:=0.1;
  P_SEL, I_SEL, D_SEL:BOOL;
END_VAR
BEGIN
  IF EIN = FALSE THEN
    STG:=0.0; EK1:=0.0; ESUM:=0.0;
    RETURN;
  END_IF;
  STG:= 0.0;
  EK:= KP*(SW-IW);
  ESUM:= ESUM + EK;
  STGI:= (ESUM*TA)/TN;
  STGD:= TV*(EK-EK1)/TA;
  EK1:=EK;

  VAR_OUTPUT          EK: REAL;
  STG : REAL ;        STGI: REAL;
END_VAR              STGD: REAL;
                    END_VAR
  VAR
  EK1 : REAL;
  ESUM:REAL;

  IF P_SEL = TRUE THEN
    STG:=STG+EK; END_IF;
  IF I_SEL = TRUE THEN
    STG:=STG+STGI; END_IF;
  IF D_SEL = TRUE THEN
    STG:=STG+STGD; END_IF;
  IF STG < 0.0 THEN STG:= 0.0;
  ELSIF STG > 100.0 THEN
    STG:= 100.0;
  END_IF;

```

Der PID-Reglerfunktionsbaustein FB 70 muss der Abtastzeit entsprechend in gleichen zeitlichen Abständen aufgerufen werden. Bei STEP 7 bietet das Betriebssystem der Automatisierungssysteme dazu so genannte Weckalarm-Organisationsbausteine (z. B. OB 35) an. Der Weckalarmzeittakt ist bei diesen Bausteinen von 1 ms bis 1 min konfigurierbar.

Eine andere Möglichkeit den Aufruf des Reglerbausteins FB 70 in gleichen Zeitabständen zu realisieren ist die Verwendung eines Taktgenerators. Nur beim Auftreten einer Taktflanke erfolgt der Aufruf des Funktionsbausteins. Da die Werte für die Abtastzeit nachfolgend mindestens 100 ms betragen, wird die Gleichheit der zeitlichen Abstände als hinreichend genau angenommen.

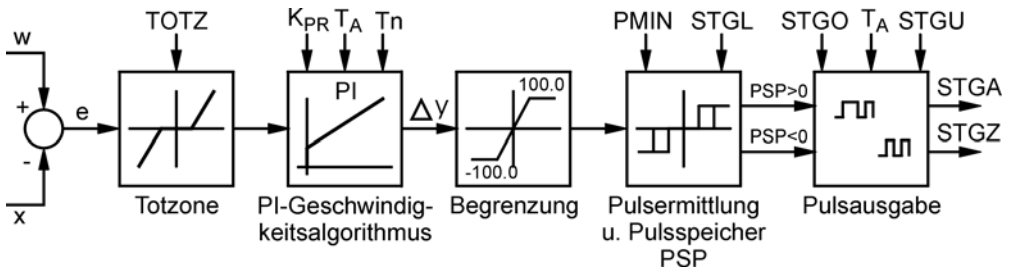
Hinweis: Auf der WEB-Seite www.automatisieren-mit-sps.de kann der Funktionsbaustein FB 70 für STEP 7 und CoDeSys auch in der AWL-Ausführung herunter geladen werden.

20.6.6 PI-Schrittreglerbaustein (Dreipunkt-Schrittregler mit PI-Verhalten)

Der PI-Schrittreglerbaustein (S-Regler) soll die Funktion eines Dreipunkt-Schrittreglers mit PI-Verhalten realisieren und zum Regeln von technischen Prozessen mit zwei binären Stellsignalen für integrierende Stellglieder verwendet werden. Das Stellsignal des Schrittreglers wurde bereits in Abschnitt 20.3.3.3 beschrieben.

• Regelungsbaustein FB 72: PI-Schrittregler (PSR)

Das nachfolgende Funktionsschema des PI-Schrittreglerbausteins zeigt sowohl die an der Bildung der Reglerfunktion beteiligten Größen bzw. Parameter als auch das Zustandekommen der Stellgrößen y_AUF (STGA) und y_ZU (STGZ).



w	= Sollwert	x	= Istwert (Regelgröße)
e	= Regeldifferenz	TOTZ	= Wert des Totzonenbereichs
K_{PR}	= Proportionalverstärkung	T_A	= Abtastzeit
T_n	= Nachstellzeit	Δy	= Stellgrößenänderung
PMIN	= Mindestpulsdauer	STGL	= Stellglied-Laufzeit
PSP	= Pulsspeicher mit der Anzahl der auszugebenden Pulsen	STGO	= Stellgliedgrenze Oben
STGA	= Stellgliedeingang AUF	STGU	= Stellgliedgrenze Unten
		STGZ	= Stellgliedeingang ZU

Die Funktionseinheit *Totzone* hat die Aufgabe, die Empfindlichkeit des S-Reglers zu begrenzen. Sehr kleine Regeldifferenzen e , die unterhalb der vorgegebenen Totzone TOTZ liegen, sollen zu keinen Regleraktivitäten führen. Es gilt:

$$e < |TOTZ| \rightarrow \text{S-Regler bleibt passiv}; \quad e > |TOTZ| \rightarrow \text{S-Regler wird aktiv.}$$

Die Funktionseinheit *PI-Geschwindigkeitsalgorithmus* berechnet aus der Regeldifferenz e zum Zeitpunkt k und $k - 1$ die Stellgrößenänderung Δy nach der Formel (siehe Kapitel 20.5.4):

$$\Delta y = K_{PR} \cdot \left(e(k) - e(k-1) + \frac{T_A}{T_n} \cdot e(k) \right)$$

In der Funktionseinheit *Begrenzung* werden außerhalb des Bereichs von -100.0 bis $+100.0$ liegende Werte durch die Grenzen des Bereichs ersetzt, damit das berechnete Stellinkrement Δy innerhalb des vorgegebenen Wertebereichs liegt.

Die Funktionseinheit *Pulsermittlung und Pulsspeicher* berechnet aus dem Zahlenwert des Stellinkrements Δy die entsprechende Pulszahl PZ und speichert diese im Pulsspeicher PSP. Zur Berechnung der Pulszahl werden die Parameter Mindestpulsdauer PMIN und Stellgliedlaufzeit STGL benötigt.

$$\text{Berechnungsformel: } PZ = \frac{STGL}{PMIN \cdot 100,0} \cdot \Delta y$$

Die Mindestimpulsdauer gibt die Zeit an, die das Stellglied mindesten eingeschaltet sein muss. Der Wert der Mindestimpulsdauer muss ein ganzes Vielfaches von der Abtastzeit T_A sein.

$$P_{MIN} = n \cdot T_A$$

Die Stellgliedlaufzeit STGL (Motorstellzeit) ist die Laufzeit des Stellgliedes von Anschlag zu Anschlag.

Zahlenbeispiel zur Berechnung der Pulszahl:

Gegeben: STGL = 20,0 s; P_{MIN} = 0,1 s; Δy = 10,0.

Gesucht: PZ (Pulszahl).

$$\text{Lösung: } PZ = \frac{STGL}{P_{MIN} \cdot 100,0} \cdot \Delta y = \frac{20 \text{ s}}{0,1 \text{ s} \cdot 100,0} \cdot 10,0 = 20$$

Im Beispiel muss zum Inhalt des Pulsspeichers PSP die Zahl PZ = 20 addiert werden, um das neue Stellinkrement Δy zu berücksichtigen. Das entspricht einer Ansteuerung des Ausgangs STGA von 2 s. Der Zahleninhalt des Impulsspeichers wird bei jedem Abtastvorgang um das vom PI-Regelalgorithmus jeweils berechnete Stellinkrement Δy aktualisiert.

Die Funktionseinheit *Pulsausgabe* hat die Aufgabe, die im Pulsspeicher PSP gespeicherten Zahlenwerte an den Ausgängen STGA bzw. STGZ in Form von Pulsen auszugeben. Positive Zahlen erzeugen dabei Pulse am Ausgang STGA und negative Zahlen am Ausgang STGZ. Damit die Mindesteinschaltzeit P_{MIN} eingehalten wird, wird die Pulsausgabe nur bei jedem n-ten (n = P_{MIN}/T_A) Abtastzyklus bearbeitet. Der Pulsspeicher PSP wird bei jeder Bearbeitung um den Betrag 1 vermindert. Zahlen, deren Betrag kleiner als 1 ist, werden nicht als Pulse ausgegeben, sondern bis zum nächsten Abtastzyklus gespeichert.

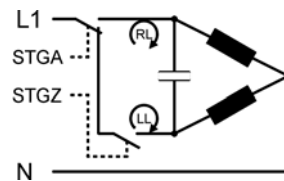
Da der PI-Schrittreglerfunktion über Speichereigenschaften verfügt, wird der Schrittreglerbaustein mit einem Funktionsbaustein (FB 72) realisiert. Über den Eingangsparameter EIN wird die Regelfunktion ein- oder ausgeschaltet. Im ausgeschalteten Zustand werden alle gespeicherten Werte zurückgesetzt. Weitere Eingangsparameter des Funktionsbausteins FB 72 sind die Führungsgröße w (SW), die Regelgröße x (IW) sowie die Einstellwerte Proportionalbeiwert K_{PR} (KP), Nachstellzeit T_n (TN), Abtastzeit T_A (TA) und die Totzone X_{TOT} (TOTZ).

Es wird angenommen, dass die Führungsgröße w und die Regelgröße x als Gleitpunktzahlen im Bereich von 0.0 bis 100.0 vorliegen. Die Proportionalverstärkung KP und die Zeitwerte TN, TA und TOTZ sind ebenfalls als Gleitpunktzahlen anzugeben. Bei den Zeitwerten TN, TA und TOTZ entspricht dabei der Zahlenwert einem Zeitwert in Sekunden.

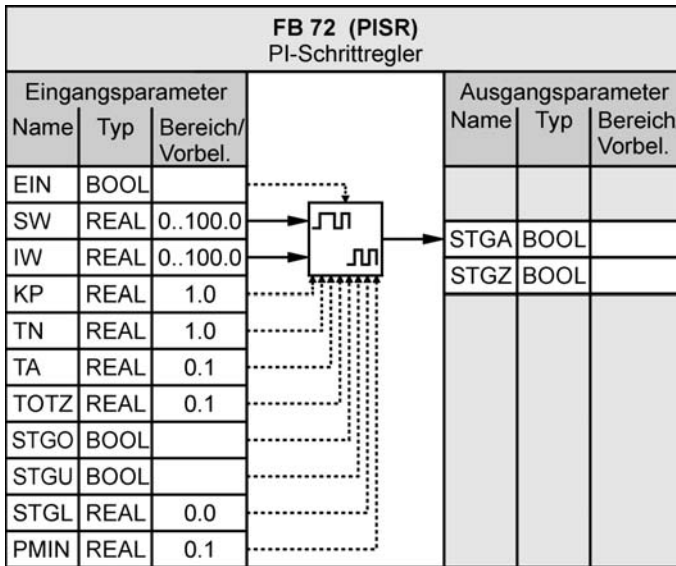
Weitere Eingabeparameter des PI-Schrittreglerbausteins sind Stellgliedeigenschaften wie *Oberer Anschlag erreicht* STGO (BOOL), *unterer Anschlag erreicht* STGU (BOOL), Stellgliedlaufzeit STGL (REAL) und Mindestimpulsdauer (P_{MIN}). Die bei STGL und P_{MIN} angegebene Gleitpunktzahl entsprechen einem Zeitwert in Sekunden.

Die Ausgangsgrößen STGA und STGZ der PI-Schrittreglerfunktion FB 72 (PISR) sind die beiden Stellgrößen für *Stellglied auf* (z. B. Motor rechts) und *Stellglied zu* (z. B. Motor links). Der an die Ausgänge angeschlossene Stellmotor hat integrierendes Zeitverhalten. Je nach Länge der Pulse wird der Stellbereich schrittweise durchfahren. Die Aufgabe der Pulse besteht darin, das Stellglied soweit zu verstellen, wie es zur Ausregelung einer Störung oder einer Führungsgröße erforderlich ist.

Motorstellglied:



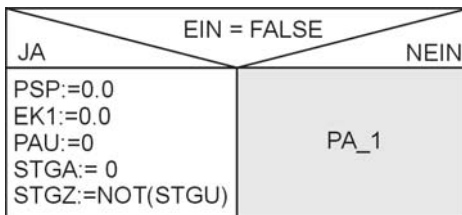
Reglerbaustein FB 72 (PISR):



Legende:

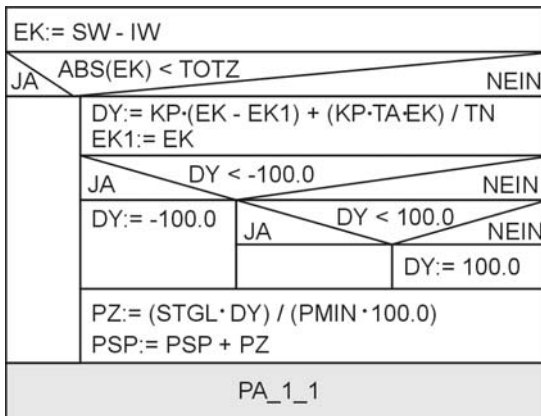
- EIN = Einschalten
- SW = Sollwert w
- IW = Istwert x
- KP = Proportionalbeiwert
- TN = Nachstellzeit
- TA = Abtastzeit
- TOTZ = Totzone
- STGO = Anschlag oben
- STGU = Anschlag unten
- STGL = Stellgliedlaufzeit
- PMIN = Mindestpulsdauer
- STGA = Stellgröße y_{AUF}
- STGZ = Stellgröße y_{ZU}

Zur Erstellung der erforderlichen Anweisungsfolge für den Funktionsbaustein FB 72 (PISR) werden die auszuführenden Datenoperationen in einem Struktogramm dargestellt. Da das komplette Struktogramm für den Funktionsbaustein sehr komplex ist, werden zunächst Struktogramme dargestellt, welche die Aufgaben der einzelnen Programmabschnitte wiedergeben.



Ist der Reglerbaustein ausgeschaltet (EIN = FALSE) werden alle stationäre Lokalvariablen gelöscht (Wert 0). Der Stellgliedausgang STGA erhält „0“-Signal und der Ausgang STGZ solange „1“-Signal, bis das Stellglied den unteren Anschlag STGU erreicht hat.

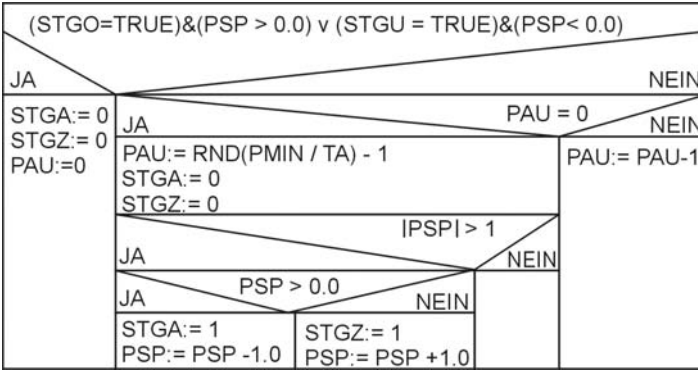
Programmabschnitt PA_1:



Mit dem nebenstehenden Struktogramm werden die Funktionseinheiten Totzone, PI-Geschwindigkeitsalgorithmus, Begrenzung sowie Pulsermittlung und Speicherung ausgeführt.

Zur Berechnung des Stellinkrements werden die temporären Variable DY und DYI (Bildung des Zwischenergebnisses) eingeführt. Nach der angegebenen Formel wird aus dem Stellinkrement die Pulszahl PZ (temporäre Variable) ermittelt und zum Pulsspeicher PSP (stationäre Variable) dazu addiert.

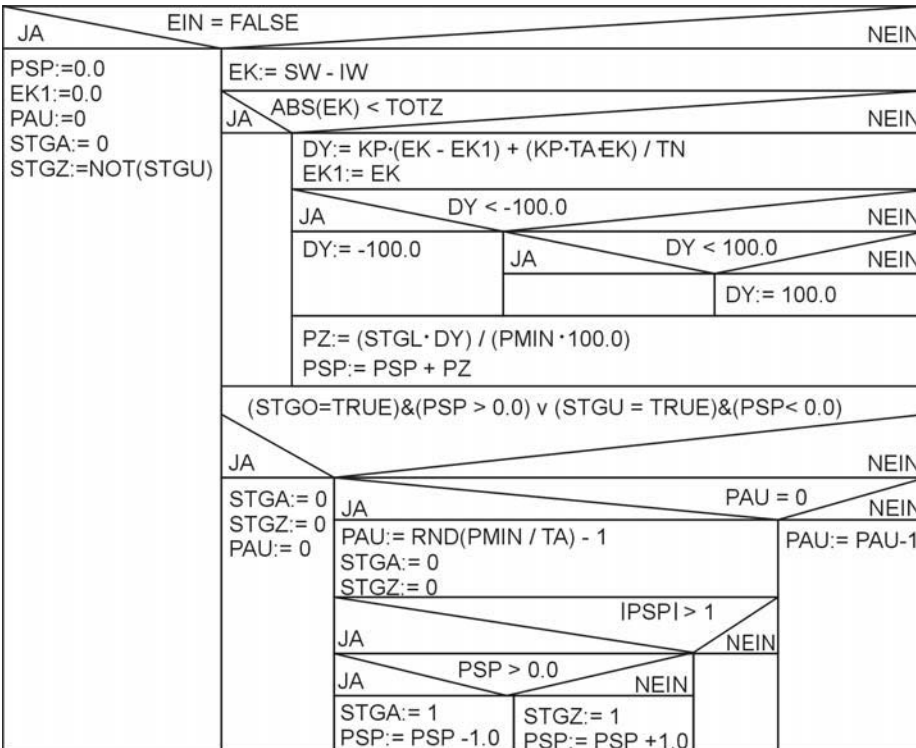
Programmabschnitt PA_1_1:



Mit dem nebenstehenden Struktogramm wird die Funktionseinheit Pulsausgabe ausgeführt. Nur wenn der Betrag des Pulsspeichers größer als 1 ist und die Endlagen des Stellgliedes nicht erreicht sind, werden Pulse ausgegeben.

Mit der ersten Abfrage wird geprüft, ob das Stellglied den oberen oder den unteren Anschlag erreicht hat und noch Pulse zur Ausgabe im Pulspeicher PSP stehen. Die Ausgabe der Pulse und damit die Ansteuerung der beiden Stellgliedausgänge STGA und STGZ wird nur bearbeitet, wenn die stationäre Variable PAU (INTEGER) den Wert 0 hat. Gebildet wird die Variable durch den Quotient $PMIN/TA - 1$. Damit ist gewährleistet, dass die Mindesteinschaltzeit eines Pulses PMIN eingehalten wird. Hat PAU den Wert 0 und ist der Betrag des Pulsspeichers PSP größer 1, erhält der Stellgliedausgang STGA „1“-Signal und der Pulspeicher PSP wird um Eins vermindert. Bei negativem Inhalt des Pulsspeichers PSP gilt Entsprechendes.

Komplettes Struktogramm für die Reglerfunktion FB 72:



Legende aller verwendeten lokalen Variablen:

EK1:	REAL	Regeldifferenz des vorhergehenden Abtastzeitpunktes;
PSP:	REAL	Summe der berechneten Pulszahlen;
PAU:	INT	Pulsausgabezeähler zur Einhaltung der Mindesteinschaltzeit PMIN.
EK:	REAL	Regeldifferenz,
DY:	REAL	Stellinkrement,
DYI:	REAL	Hilfsvariable für den I-Anteil des Stellinkrements und
PZ:	REAL	Pulszahl.

Das Programm des Funktionsbausteins FB 72 ist nachfolgend nur in der Programmiersprache SCL bzw. ST angegeben. In STEP 7 und CoDeSys sind dabei alle Anweisungen bis auf „END_FUNCTION_BLOCK“ am Ende des Anweisungsteils identisch.

STEP 7 / CoDeSys Programm (SCL-Quelle / ST)

```

FUNCTION_BLOCK FB72
VAR_INPUT
    EIN : BOOL ;
    SW, IW : REAL ;
    KP, TN : REAL:= 1.000e+00;
    TA, TOTZ: REAL:= 1.000e-01;
    STGO, STGU: BOOL ;
    STGL: REAL ;
    PMIN: REAL:= 1.000000e-001;
END_VAR
BEGIN
IF EIN = FALSE THEN
    STGA:=FALSE;
    STGZ:= NOT STGU;
    EK1:=0.0;
    PSP:=0.0;
    RETURN;
END_IF;
EK:= SW - IW;
IF ABS(EK) > TOTZ THEN
    DY:= KP*(EK-EK1)+(KP*TA*EK)/TN;
    EK1:=EK;
    IF DY < -100.0 THEN DY:=-100.0;
    ELSIF DY > 100.0 THEN DY:= 100.0;
    END_IF;
    PZ:=(STGL*DY)/(PMIN*100.0);
    PSP:=PSP + PZ;
END_IF;
IF (STGO = TRUE)AND(PSP>0.0) OR
    (STGU = TRUE)AND(PSP<0.0) THEN
    STGA:=FALSE; STGZ:=FALSE; PAU:=0;
ELSE
    IF PAU = 0 THEN
        PAU:=REAL TO_INT (PMIN/TA) -1;
        STGA:=FALSE; STGZ:=FALSE;
        IF ABS (PSP)>1 THEN
            IF PSP>0 THEN
                STGA:=TRUE; PSP:=PSP-1.0;
            ELSE
                STGZ:=TRUE; PSP:=PSP+1.0;
            END_IF;
        END_IF;
    ELSE PAU:=PAU-1;
    END_IF;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

```

Der PI-Schrittreglerbaustein FB 72 muss unbedingt mit einer konstanten Abtastzeit T_A in gleichen zeitlichen Abständen aufgerufen werden. Die Abtastzeit spielt dabei nicht nur beim Regelungsparameter T_n eine Rolle, sondern auch bei der Ausgabe der Pulse.

Der zeitgesteuerte Aufruf kann von einem Weckalarm-Organisationsbausteine (z. B. OB 35) aus erfolgen oder mit Hilfe eines Impulsgenerators ausgeführt werden. Nur beim Auftreten eines Impulses erfolgt der Aufruf des Funktionsbausteins. Die Werte für die Abtastzeit sollten mindestens 100 ms betragen sollten.

Hinweis: Auf der WEB-Seite www.automatisieren-mit-sps.de kann der Funktionsbaustein FB 70 für STEP 7 und CoDeSys auch in der AWL-Darstellung heruntergeladen werden.

20.7 Beispiele

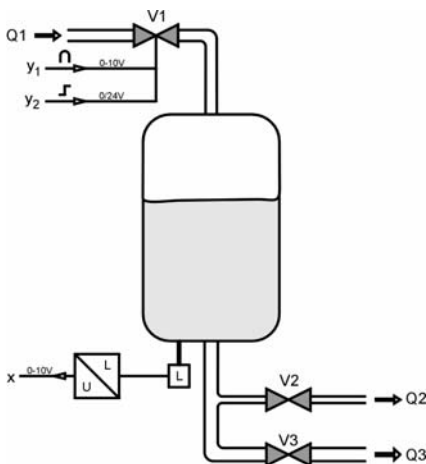
Beschreibung der Füllstandsstrecke als Regelstrecke

Als Regelstrecke für die nachfolgenden Beispiele wird, mit Ausnahme der Dreipunktregelung, jeweils ein Behälter verwendet, dessen Füllstand die Regelgröße x ist. Aufgabe der Regelung ist es, den Füllstand auf einem vorgegebenen Niveau konstant zu halten, wobei der Einfluss nicht vorhersehbarer Störgrößen ausgeglichen werden soll. Als nicht vorhersehbare Störeinflüsse können Veränderungen der Entnahmemenge angesehen werden. Das Verhalten der verwendeten Füllstandsstrecke entspricht einer Proportionalstrecke mit Verzögerung erster Ordnung (PT1), da die Auslaufmenge von der Füllhöhe abhängig ist, siehe Bild 20.20.

Der Regler soll die Aufgabe dadurch lösen, dass er eine Stellgröße y ausgibt, die ein Zulaufventil V1 in passender Weise ansteuert. Je nach verwendeter Reglerart wird bei einem kontinuierlichen Stellsignal y_1 das Zulaufventil V1 mit einer analogen Spannung von 0 ... 10 V oder bei einem binären Stellsignal y_2 mit einer Spannung von 0 V bzw. 24 V angesteuert. Im ersten Fall ist das Zulaufventil V1 ein Proportionalventil im zweiten Fall ein Sperrventil.

Zur Vorgabe der Führungsgröße w wird in den meisten Fällen ein vierstelliger BCD-Zifferneinsteller zur Sollwertvorgabe von 00,00 bis 99,99 % verwendet.

Technologieschema:



Legende:

- Q1 = Zulaufmenge
- Q2 / Q3 = Ablaufmenge
- V1 = Zulaufventil
- V2/V3 = Ablaufventile
- L = Füllstandsmessung
- y_1 = Analoge Stellgröße
- y_2 = Binäre Stellgröße
- x = Füllstand als Spannungssignal von 0 ... 10 V

Bild 20.20: Füllstandsstrecke

Die Streckeneigenschaften der Füllstandsstrecke können durch Vorschalten eines Totzeit-Gliedes oder eines PT1-Gliedes oder eines I-Gliedes zusätzlich verändert werden.

Hinweis:

Da bezüglich der Art des zu regelnden Prozesses keine Einschränkungen bei den Regler-Bausteinen bestehen, können zur Erprobung der Reglerprogramme auch andere vorhandene Regelstrecken eingesetzt werden.

■ **Beispiel 20.1: Zweipunktregelung eines Behälterfüllstandes**

Für die beschriebene Füllstands-Regelstrecke soll eine Zweipunktregelung mit einem Automatisierungsgerät ausgeführt werden.

Technologieschema:

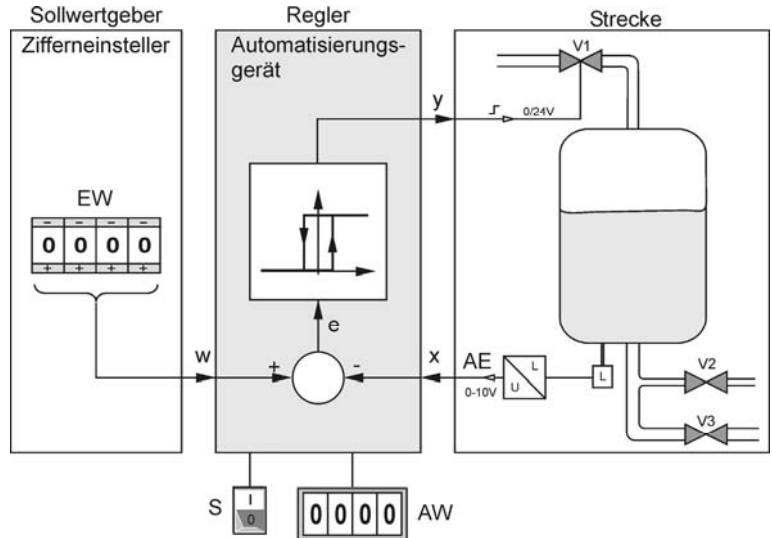


Bild 20.21:
Zweipunktregelung

Die Regelung wird mit dem Schalter S ein- bzw. ausgeschaltet. An der Ziffernanzeige soll der jeweils aktuelle Istwert x angezeigt werden. Die Schalthysterese SH wird im Programm fest mit 25 % des Sollwertes w vorgegeben.

Zuordnungstabelle der Eingänge und Ausgänge:

Eingangsvariable	Symbol	Datentyp	Logische Zuordnung	Adresse
Regelung Ein/AUS	S	BOOL	Betätigt S = 1	E 0.0
Sollwertgeber	EW	WORD	BCD-Code	EW 8
Füllstandsgeber	AE	WORD	Analogeingang 0..10V	PEW 320
Ausgangsvariable				
Stellgröße	y	BOOL	Leuchtet y = 1	A 4.1
Ziffernanzeige	AW	WORD	BCD-Code	AW 12

Zur Lösung der Regelungsaufgabe sind folgende Schritte auszuführen:

Schritt 1: Sollwert w einlesen und normieren

Umwandlung von BCD nach REAL und Normierung auf den Bereich von 0.0 ... 100.0 mit der Funktion FC 705 (BCD_REALN).

Schritt 2: Istwert x einlesen und normieren

Analogwert einlesen und auf den Bereich von 0.0 bis 100.0 normieren mit der Funktion FC 48 (AE_REALN).

Schritt 3: Berechnung der Stellgröße y

Aufruf und Parametrierung der Zweipunktregler-Funktion FC 74 (ZWPH).

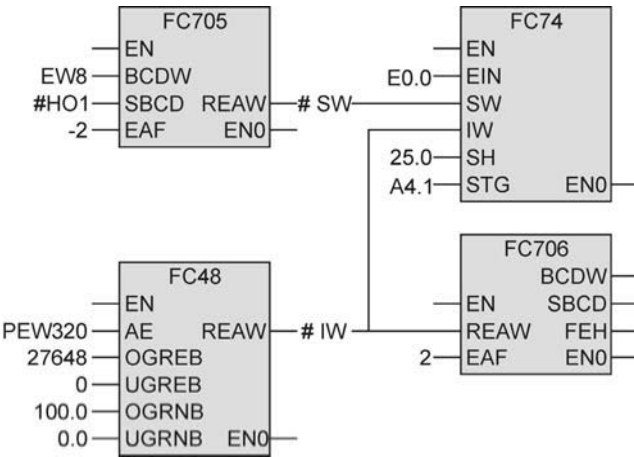
Schritt 4: Stellgröße y ausgeben

Der binäre Ausgang für das Stellsignal y wird mit dem Funktionsausgang STG der Zweipunktregelfunktion FC 74 verschaltet.

Schritt 5: Istwert x anzeigen

Umwandlung von REAL in BCD und Bereichsanpassung mit der Funktion FC 706 (REALN_BCD).

STEP 7: Verschaltung der Bausteine im OB 1 in freigrafischer Funktionsplandarstellung



Hinweise:

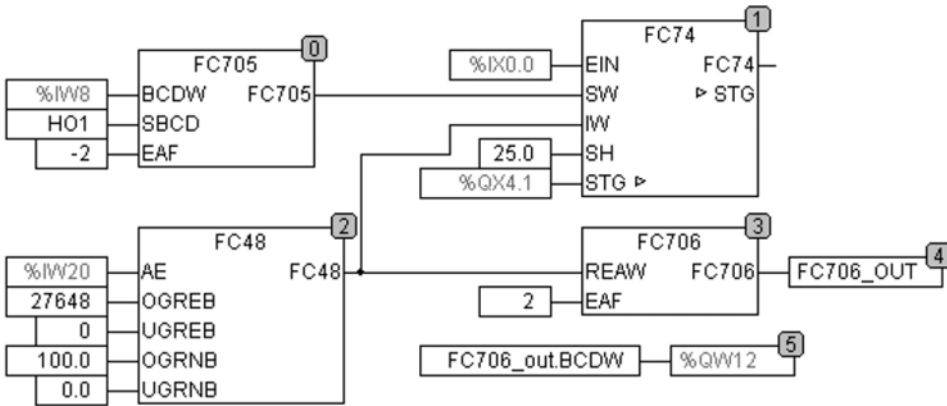
Die mit # gekennzeichneten Variablen sind als lokale Variablen des OB 1 zu deklarieren.

Der Wert -2 am Eingang EFA der Funktion FC 705 bedeutet, dass ein am Zifferneinsteller eingestellter Wert durch 100 dividiert wird.

Beispiel: Die Einstellung 4000 entspricht einer Sollwertvorgabe von 40,00 %.

Entsprechendes gilt für den Wert 2 am Eingang EAFK der Funktion FC 706.

CoDeSys: Aufruf der Bausteine im PLC_PRG in CFC

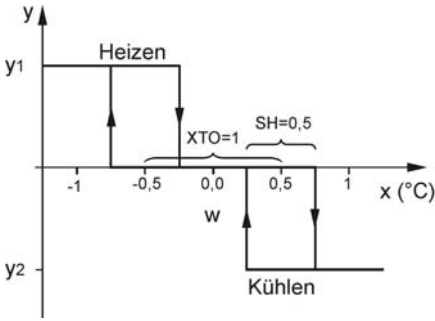


■ Beispiel 20.2: Temperaturregelung eines Lagerraums

Die Temperaturregelung eines Lagerraums umfasst sowohl die Möglichkeit der Lufterwärmung durch einen Lufterhitzer LE als auch der Luftkühlung durch einen Luftkühler LK. Dem Lufterhitzer kann durch Einschalten des Ventils M1 Heißwasser und dem Luftkühler durch Einschalten des Ventils M2 Kältemittel zugeführt werden. Der Umluftventilator führt die zu erwärmende oder abzukühlende Umluft heran.

Die Führungsgröße für die Temperatur kann mit einem analogen Sollwertgeber im Bereich von 5 ... 15 °C stufenlos eingestellt werden. Diesem Einstellbereich ist das Normsignal 0 ... 10 V zugeordnet. Die Lagertemperatur wird durch einen Temperaturfühler erfasst, der den Temperaturbereich von -10 °C ... 40 °C in das Normsignal 0 ... 10 V umsetzt.

Der Temperaturregelung soll die nachfolgende Regelsequenz von „Heizen – AUS – Kühlen“ zugrunde gelegt werden:



Legende:

x = Regelgröße (Temperatur)

w = Führungsgröße (vorgegebene Temperatur)

Der Kennlinie ist zu entnehmen, dass eine Totzone von $XTO = 1\text{ }^\circ\text{C}$ und eine Hysterese H von $SH = 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt werden soll.

Der Lagerraum sei zwangsbelüftet, d. h., die Ventilatoren VZL (Zuluft) und VAL (Abluft) sorgen für eine ausreichende Luftqualität. Die Zwangsbelüftung ist jedoch nicht Gegenstand dieser Aufgabe, sie hat jedoch je nach Außentemperatur einen Einfluss auf die Lagerraumtemperatur und ist somit als mögliche Störgröße zu betrachten, deren Auswirkung ausgeregelt werden soll. Andere klimatische Details, wie z. B. die Luftfeuchte, sollen unberücksichtigt bleiben. Die aktuelle Temperatur des Lagerraums soll an einer Ziffernanzeige mit zwei Kommastellen angezeigt werden.

Technologieschema:

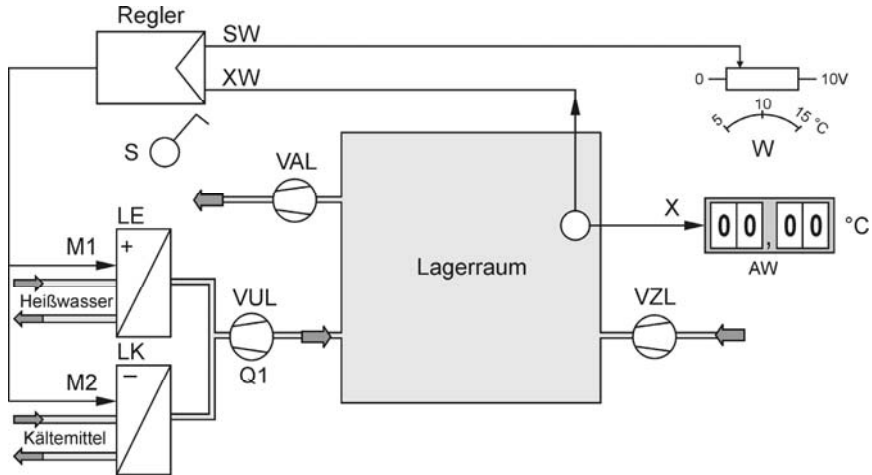


Bild 20.22: Temperaturregelung eines Lagerraums mit Dreipunktregler

Legende: LE = Lufterhitzer; LK = Luftkühler; VUL = Ventilator Umluft; VZL = Ventilator Zuluft; VAL = Ventilator Abluft

Zuordnungstabelle der Eingänge und Ausgänge:

Eingangsvariable	Symbol	Datentyp	Logische Zuordnung	Adresse
Regelung Ein/AUS	S	BOOL	Betätigt S = 0	E 0.0
Sollwertgeber	SW	WORD	Analogeingang 0..10V	PEW 320
Temperaturfühler	XW	WORD	Analogeingang 0..10V	PEW 322
Ausgangsvariable				
Magnetventil LE	M1	BOOL	Magnetventil auf M1 = 1	A 4.1
Magnetventil LK	M2	BOOL	Magnetventil auf M2 = 1	A 4.2
Ventilator Umluft	Q1	BOOL	Ventilator ein Q1 = 1	A.4.3
Ziffernanzeige	AW	WORD	BCD-Code	AW 12

Die Berechnungen innerhalb der Dreipunktreglerfunktion FC 75 können im Prozentbereich von 0 ... 100 % oder im physikalischen Zahlenbereich (hier Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) durchgeführt werden. Die Werte an den Eingängen der Funktion FC 75 müssen dabei auf den verwendeten Bereich angepasst werden. Für die nachfolgenden Angaben wird der Temperaturbereich zu Grunde gelegt.

Das Programm zur Lösung der Regelungsaufgabe kann in folgende Schritte eingeteilt werden:

Schritt 1: Sollwert einlesen und normieren

Der analoge Sollwert wird mit der Analogeingabe-Normierungsfunktion FC 48 (AE_REALN) in das Programm eingelesen. Der Bereich des Sollwertgebers von $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 V) bis $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10 V) kann unverändert übernommen werden. Der normierte Wert wird der temporären Variablen „SW“ zugewiesen.

Schritt 2: Istwert einlesen und normieren

Der analoge Istwert wird mit der Analogeingabe-Normierungsfunktion FC 48 (AE_REALN) in das Programm eingelesen. Der Regelbereich von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 V) bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10 V) kann unverändert übernommen werden. Der normierte Wert wird der temporären Variablen „IW“ zugewiesen.

Schritt 3: Aufruf Dreipunktreglerfunktion FC 75 (DRPH)

Aus der Aufgabenstellung geht hervor, dass eine Totzone von $X_{TO} = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine Schalthysterese SH von $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ einzustellen sind. Die Schalthysterese entspricht demnach einem Wert von 50 % der Totzone XTO. An den Parametereingang XTO der Funktion FC 75 wird deshalb der Wert 1.0 und an den Parametereingang SH der Wert 50.0 gelegt.

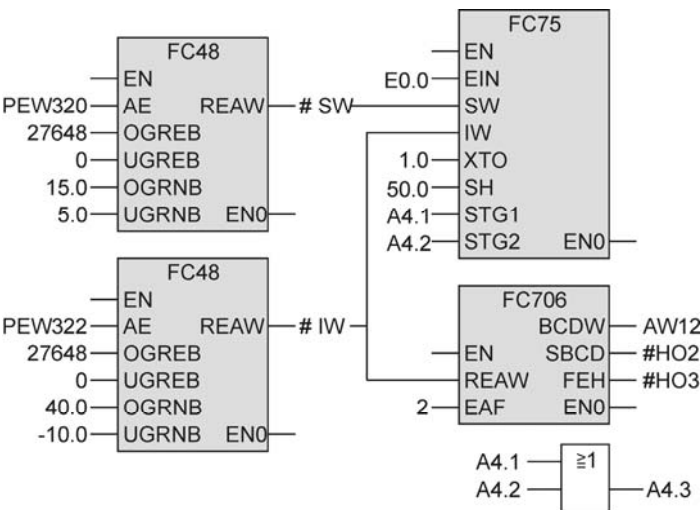
Schritt 4: Anzeigen der Temperatur

Mit Hilfe der Funktion FC 706 (REALN_BCD) wird der jeweils aktuelle Istwert angezeigt. Dazu werden an den Funktionseingang REAW der Istwert IW und an den Eingang EAF der Wert 2 gelegt. Die möglichen Istwerte von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden demnach mit 100 multipliziert und somit mit zwei Kommastellen angezeigt.

Schritt 5: Ansteuerung Ventilator Umluft VUL

Der Umluftventilator wird immer dann eingeschaltet, wenn die Stellsignale y_1 oder y_2 ein 1-Signal melden.

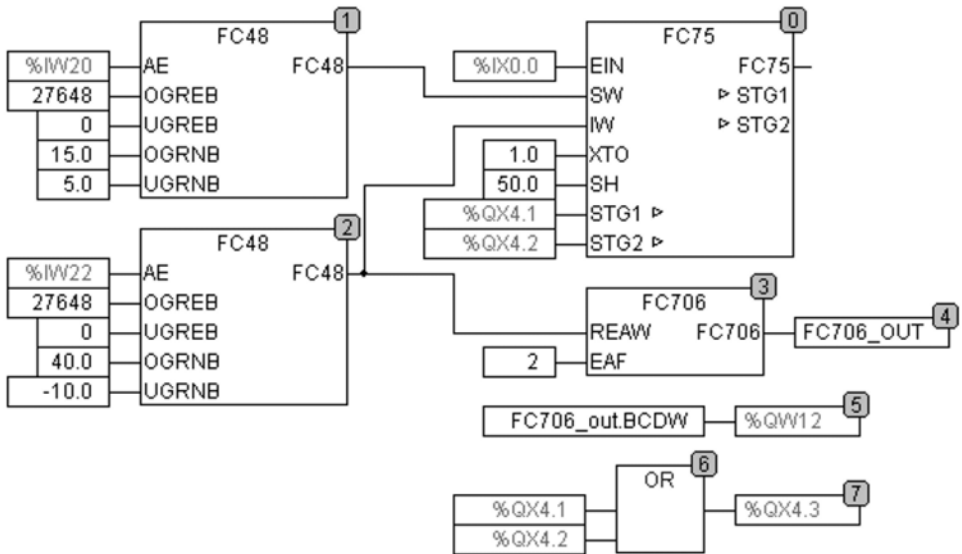
STEP 7: Verschaltung der Bausteine im OB 1 in freigrafischer Funktionsplandarstellung



Hinweise:

Die mit # gekennzeichneten Variablen sind als lokale Variablen des OB 1 zu deklarieren.

CoDeSys: Aufruf der Bausteine im PLC_PRG in CFC



■ Beispiel 20.3: Behälterfüllstand mit kontinuierlichem Regler

Die Zulaufmenge pro Zeit Q_{zu} wird über das Proportionalventil V1 beeinflusst. Angesteuert wird das Proportionalventil durch das Stellsignal y des Reglers, das im Bereich von 0 ... 10 V liegt. Bei 0 V sei das Ventil gesperrt, bei 10 V voll geöffnet. Die Ablaufmenge pro Zeit kann durch die beiden handbetätigten Ventile Y2 und Y3 beeinflusst werden. Bedingt durch den statischen Druck der Flüssigkeitssäule sei die Ablaufmenge pro Zeit Q_{ab} abhängig vom Flüssigkeitsstand, sodass der Behälter als eine PT1-Strecke angesehen werden kann.

Technologieschema:

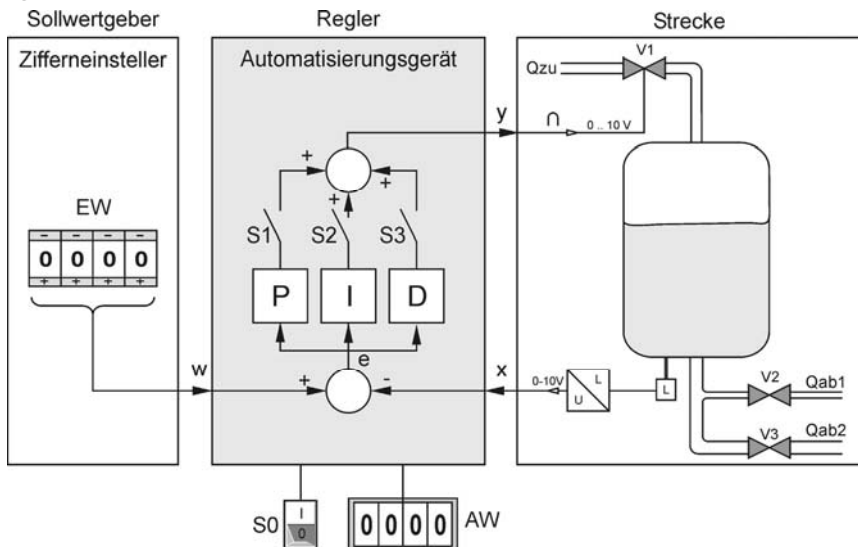


Bild 20.23: Kontinuierliche Regelung

Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ist konstant und wurde mit $K_{PS} = 1,5$ gemessen. Aus dem Zeitverhalten der Strecke wurde die Streckenzeitkonstante $T_S = 30$ s ermittelt.

Der PID-Regler wird mit dem Schalter S0 ein- bzw. ausgeschaltet. Durch Kombinationen der Schalter S1 (P-Anteil), S2 (I-Anteil) und S3 (D-Anteil) lassen sich verschiedene Regelfunktionen (P, PI, PD, PID) für den Reglerbaustein einstellen und somit ein unterschiedliches Regelverhalten erzielen. An einer vierstelligen Ziffernanzeige soll der jeweils aktuelle Wert der Regelgröße mit zwei Kommastellen angezeigt werden.

Zuordnungstabelle der Eingänge und Ausgänge:

Eingangsvariable	Symbol	Datentyp	Logische Zuordnung	Adresse
Regelung Ein/AUS	S0	BOOL	Betätigt S0 = 1	E 0.0
Sollwertgeber	w	WORD	BCD-Code	EW 8
Füllstandsgeber	x	WORD	Analogeingang 0..10 V	PEW 320
Schalter P-Anteil	S1	BOOL	Betätigt S1 = 1	E 0.1
Schalter I-Anteil	S2	BOOL	Betätigt S2 = 1	E 0.2
Schalter D-Anteil	S3	BOOL	Betätigt S3 = 1	E 0.3
Ausgangsvariable				
Stellgröße	y	WORD	Analogausgang 0 ..10 V	PAW 336
Ziffernanzeige	AW	WORD	BCD-Code	AW 12

Das PID-Reglerprogramm setzt sich im Wesentlichen aus Aufrufen von Bibliotheksbausteinen zusammen. Die Aufrufe mit den entsprechenden Parameterangaben sind in den nachfolgenden Schritten beschrieben.

Schritt 1: Sollwert w einlesen und normieren

Umwandlung von BCD nach REAL und Normierung auf den Bereich von 0.0 ... 100.0 mit der Funktion FC 705 (BCD_REALN). An den Eingang EAF wird -2 gelegt. Damit entspricht der Wert 4000 am Zifferneinsteller einem Sollwert von 40,00 %.

Schritt 2: Istwert x einlesen und normieren

Analogwert einlesen und auf den Bereich von 0.0 bis 100.0 normieren mit der Funktion FC 48 (AE_REALN).

Schritt 3: Bildung der Zeitabstände für den Aufruf des Reglerbausteins

Der Aufruf des Regelungs-Funktionsbausteines FB 70 in gleichen Zeitabständen wird mit dem Taktbaustein FC 100 bzw. FB 100 der Bausteinbibliothek gebildet. Der Ausgang Takt wird über eine Flankenbewertung an den EN-Eingang des Funktionsbausteins FB 70 gelegt.

Schritt 4: PID-Reglerbaustein aufrufen und parametrieren

Der PID-Reglerfunktionsbaustein FB 70 (PID) wird abhängig von den Impulsen des Taktgenerators zur Berechnung der Stellgröße y aufgerufen. Zum Testen des Regelungsprogramms werden folgende Regelparameter eingesetzt: $K_P = 5.0$; $T_N = 10.0$ (10 s), $T_V = 1.0$ (1 s) und $T_A = 0.1$ (0,1 s).

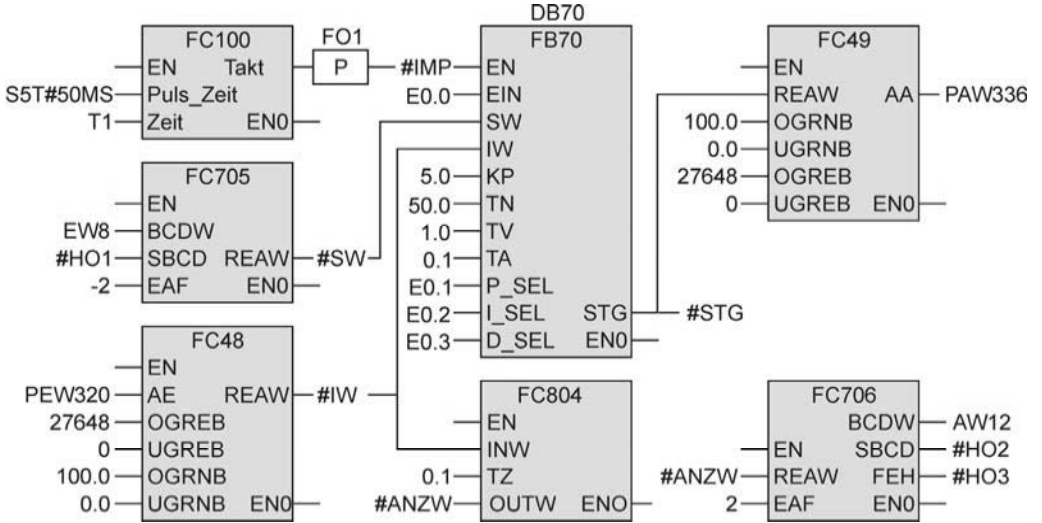
Schritt 5: Stellgröße y ausgeben

Das kontinuierliche Stellsignal y des Funktionsausgangs STG der PID-Reglerfunktion wird mit der Funktion FC 49 (REALN_AA) an den Analogausgang gelegt.

Schritt 6: Istwert x anzeigen

Umwandlung von REAL in BCD mit der Funktion FC 706 (REALN_BCD) und Bereichsanpassung. Damit die Anzeige nicht zu unruhig ist, wird vor der Umwandlung eine Totzone von 0.1 mit der Funktion FC 804 (TOTZ) gebildet.

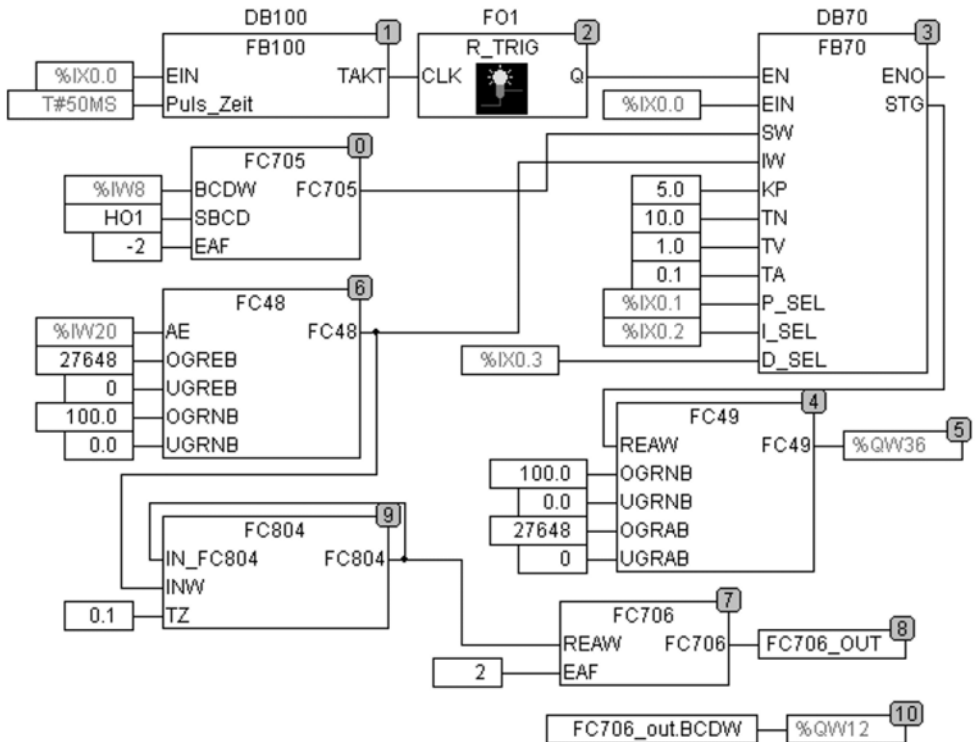
STEP 7: Verschaltung der Bausteine im OB 1 in freigraferischer Funktionsplanarstellung



Die verwendeten lokalen Variablen im OB 1 für die Übergabeparameter sind:

SW (Sollwertübergabe), IW (Istwertübergabe), STG (Übergabewert Stellgröße), ANZW (Übergabewert für die Anzeige), HO1, HO2, HO3 (Hilfsoperanden) und IMP für den Impulsgeber.

CoDeSys: Aufruf der Bausteine im PLC_PRG in CFC



■ Beispiel 20.4: Behälterfüllstand mit einem Dreipunkt-Schrittregler mit PI-Verhalten

Die Zulaufmenge pro Zeit Q_{zu} wird mit einem motorisch angetriebenen Stellglied Y durch die Stellsignale eines S-Reglers mit PI-Verhalten beeinflusst.

Die Stellgliedlaufzeit beträgt $T_{STGL} = 20$ s. Als Mindestpulsdauer für das Einschalten des Stellmotors wird $T_{PMIN} = 0,5$ s vorgegeben. Die Abtastzeit ist mit $T_A = 0,1$ s so gewählt, dass genügend viele Stichproben während der Stellzeit T_{STGL} genommen werden.

Die Ablaufmenge pro Zeit kann durch die beiden handbetätigten Ventile $Y2$ und $Y3$ beeinflusst werden. Bedingt durch den statischen Druck der Flüssigkeitssäule sei die Ablaufmenge pro Zeit Q_{ab} abhängig vom Flüssigkeitsstand, sodass der Behälter als eine PT1-Strecke angesehen werden kann. Der Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ist konstant und wurde mit $K_{PS} = 1,5$ gemessen. Aus dem Zeitverhalten der Strecke wurde die Streckenzeitkonstante $T_S = 30$ s ermittelt.

Der S-Regler wird mit dem Schalter $S0$ ein- bzw. ausgeschaltet. An einer vierstelligen Ziffernanzeige soll der jeweils aktuelle Wert der Regelgröße mit zwei Kommastellen angezeigt werden.

Zuordnungstabelle der Eingänge und Ausgänge:

Eingangsvariable	Symbol	Datentyp	Logische Zuordnung	Adresse
Regelung Ein/AUS	S0	BOOL	Betätigt S0 = 1	E 0.0
Stellgerät-Endschalter oben	S1	BOOL	Betätigt S1 = 1	E 0.1
Stellgerät-Endschalter unten	S2	BOOL	Betätigt S2 = 1	E 0.2
Sollwertgeber	w	WORD	BCD-Code	EW 8
Füllstandsgeber	x	WORD	Analogeingang 0..10 V	PEW 320
Ausgangsvariable				
Stellgröße Ventil AUF	YA	BOOL	Ventil geht auf YA = 1	A 4.1
Stellgröße Ventil ZU	YZ	BOOL	Ventil geht auf YZ = 1	A 4.2
Ziffernanzeige	AW	WORD	BCD-Code	AW 12

Technologieschema:

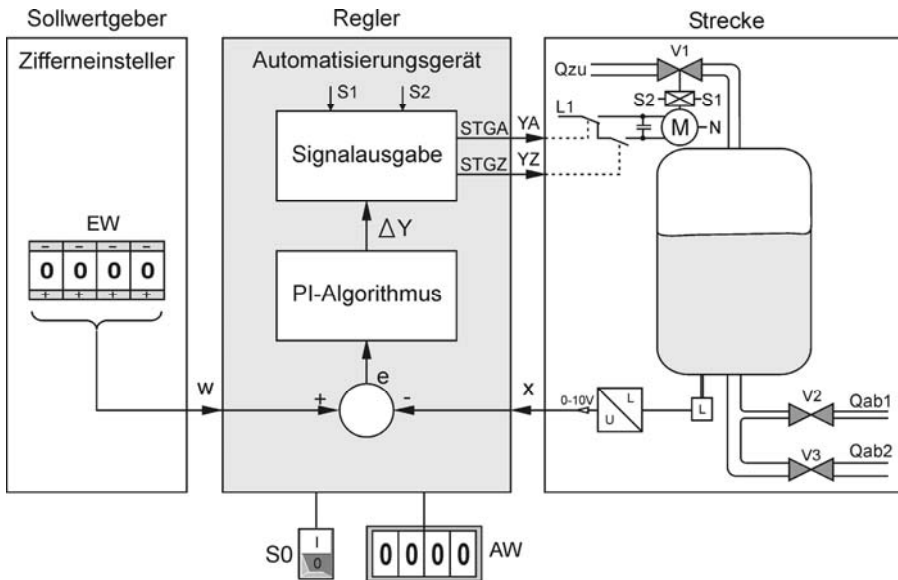


Bild 20.24: Dreipunkt-Schrittregelung mit PI-Verhalten

Das PI-Schrittreglerprogramm setzt sich im Wesentlichen aus Aufrufen von Bibliotheksbausteinen zusammen. Die Aufrufe mit entsprechender Parameterangabe sind in den nachfolgenden Schritten beschrieben.

Schritt 1: Sollwert w einlesen und normieren

Umwandlung von BCD nach REAL und Normierung auf den Bereich von 0.0 ... 100.0 mit der Funktion FC 705 (BCD_REALN). An den Eingang EAF wird der -2 gelegt. Damit entspricht der Wert 4000 am Zifferneinsteller einem Sollwert von 40,00 %.

Schritt 2: Istwert x einlesen und normieren

Analogwert einlesen und auf den Bereich von 0.0 bis 100.0 normieren mit der Funktion FC 48 (AE_REALN).

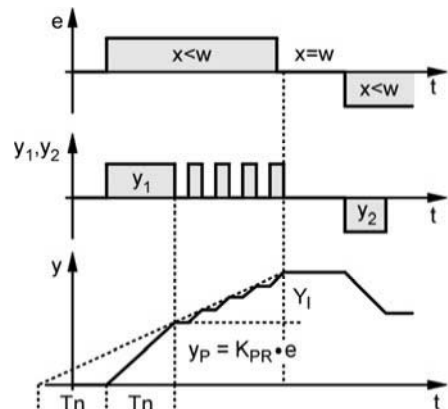
Schritt 3: Bildung der Zeitabstände für den Aufruf des Reglerbausteins

Der Aufruf des Regelungs-Funktionsbausteines FB 70 in gleichen Zeitabständen wird mit dem Taktbaustein FC 100 bzw. FB 100 der Bausteinbibliothek gebildet. Der Ausgang Takt wird über eine Flankenbewertung an den EN-Eingang des Funktionsbausteins FB 70 gelegt.

Schritt 4: PI-Schrittreglerbaustein aufrufen und parametrieren

Der PI-Reglerfunktionsbaustein FB 72 (PISR) wird abhängig von den Zeitimpulsen IMP zur Bestimmung der Stellgrößen YA und YZ aufgerufen. An den Eingang EIN des Funktionsbausteins ist der Schalter S0 zu legen. Die Endschalter S1 und S2 des Stellgliedes werden an die Eingänge STGO bzw. STGU des Funktionsbausteins gelegt. Als Stellgliedparameter werden folgende Werte angegeben: TOTZ = 0.5; STGL = 20.0 (20 s) und PMIN = 0.5 (0,5 s).

Zum Testen des Regelungsprogramms werden folgende Regelparameter eingesetzt: $K_P = 1.0$; $T_N = 10.0$ (10 s) und $T_A = 0.1$ (0,1 s). Bei günstig eingestellten Regelparametern sollte der zeitliche Verlauf der Pulse für das Stellglied den nebenstehenden Verlauf haben:



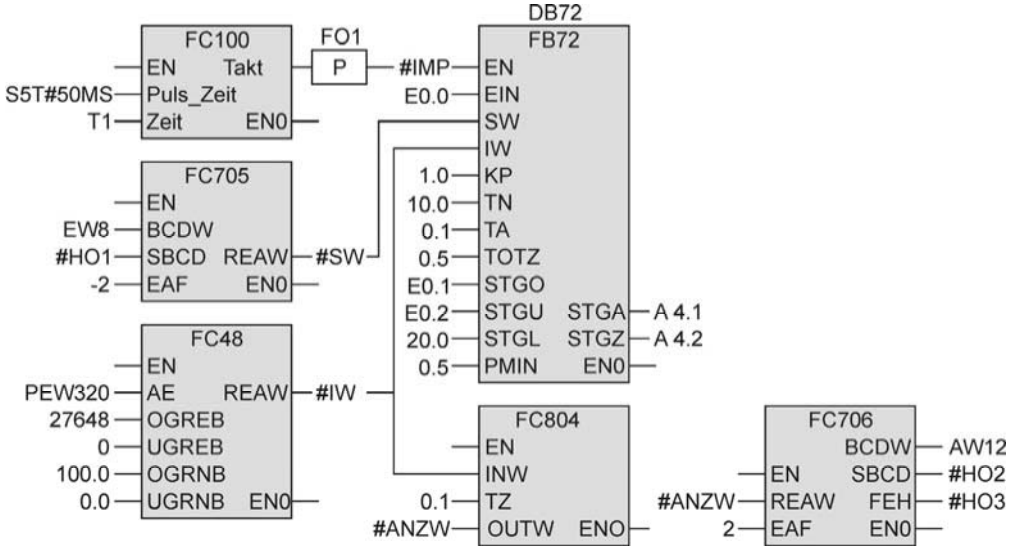
Schritt 5: Stellgrößen YA und YZ ausgeben

Die Ausgänge YA und YZ für das Stellglied können unmittelbar an den Funktionsbausteinausgängen STGA und STGZ abgegriffen werden.

Schritt 6: Istwert x anzeigen

Umwandlung von REAL in BCD mit der Funktion FC 51 (REALN_BCD) und Bereichsanpassung. Damit die Anzeige nicht zu unruhig ist, wird vor der Umwandlung eine Totzone von 0.1 mit der Funktion FC 70 (TOTZ) gebildet.

STEP 7: Verschaltung der Bausteine im OB 1 in freigraferischer Funktionsplandarstellung



Die verwendeten lokalen Variablen im OB 1 für die Übergabeparameter sind:

SW (Sollwertübergabe), IW (Istwertübergabe), ANZW (Übergabewert für die Anzeige), HO1, HO2, HO3 (Hilfsoperanden) und IMP für den Impulsgeber.

CoDeSys: Aufruf der Bausteine im PLC_PRG in CFC

