

### **3. Regelungskonzept**

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt ausführlich auf die Regelstrecke - hier die Belastungseinrichtung - eingegangen wurde, möchte ich mich jetzt der eigentlichen Regelung, also dem Regler, zuwenden.

Der Regler hat allgemein die Aufgabe, die Regelgröße entsprechend den technologischen Anforderungen zu steuern. Wie in /WÄLI/ beschrieben, sind das meistens

- hohe statische Genauigkeit
- kürzeste Übergangszeiten
- überschwingfreie Übergangsverläufe
- sanfte Anfahr- und Bremsvorgänge

Dabei bewirkt meist die Verbesserung des einen Kriteriums eine Verschlechterung des anderen. Es muß also ein Optimum gefunden werden. Dazu muß zuerst die Regelstrecke bekannt sein. Entsprechend ihrer Struktur und ihrer Parameter wird ein Reglertyp ausgewählt und seine Parameter berechnet.

Wie schon in der Modellbildung festgestellt, besitzen hydraulische Regelstrecken eine Vielzahl negativer Eigenschaften, die die Reglerauswahl und -bemessung erschweren. Da die bei der Modellbildung durchgeführte Linearisierung nur in einem bestimmten Arbeitspunkt gilt, kann der dafür bemessene Regler auch nur in der unmittelbaren Umgebung des Arbeitspunktes optimal arbeiten.

Das „Prinzip der Lokalisation“ (/WEB/ und /ZACH/), das dem PL-Regler zu Grunde liegt, hat sich als ein robustes Regelverfahren herausgestellt. „Robust“ ist hier im Sinne nicht genau bekannter oder zeitlich varianter Entwurfsparameter (Streckenparameter) zu verstehen. Ein „robuster“ Regler wird auch unter diesen Umständen eine stabile Regelung und sogar die erwarteten Kennwerte erreichen.

Für die Regelaufgaben an der Belastungseinrichtung werde ich den PL-Regler einsetzen, weil er die Eigenschaften eines robusten Reglers mit einem einfach zu automatisierenden Entwurfs- und Regelverfahren vereint.

#### **3.1. Überblick**

Für die Belastungseinrichtung gibt es zwei grundsätzlich verschiedene technologische Anwendungsfälle.

1. die Lageregelung des Kolbens
2. die Kraftregelung im Ziehkissenbetrieb

Wie schon in Abschnitt 2.3. erläutert, existieren bereits zwei verschiedene Streckenmodelle entsprechend den Anwendungsfällen. Für diese zwei Modelle werden also auch zwei verschiedene Regler mit zwei unterschiedlichen Parametersätzen eingesetzt.

##### **3.1.1. Die Lageregelung**

Die Regelstrecke für die Lageregelung besitzt  $IT_S$ -Verhalten. Der eingesetzte PL-Regler besitzt keinen I-Anteil.

Um die Anforderungen an sanfte Anlauf- und Bremsvorgänge zu erfüllen, wird ein Führungsgrößenfilter eingesetzt, das aus einem Sollwertsprung einen sinusoiden Verlauf formt.

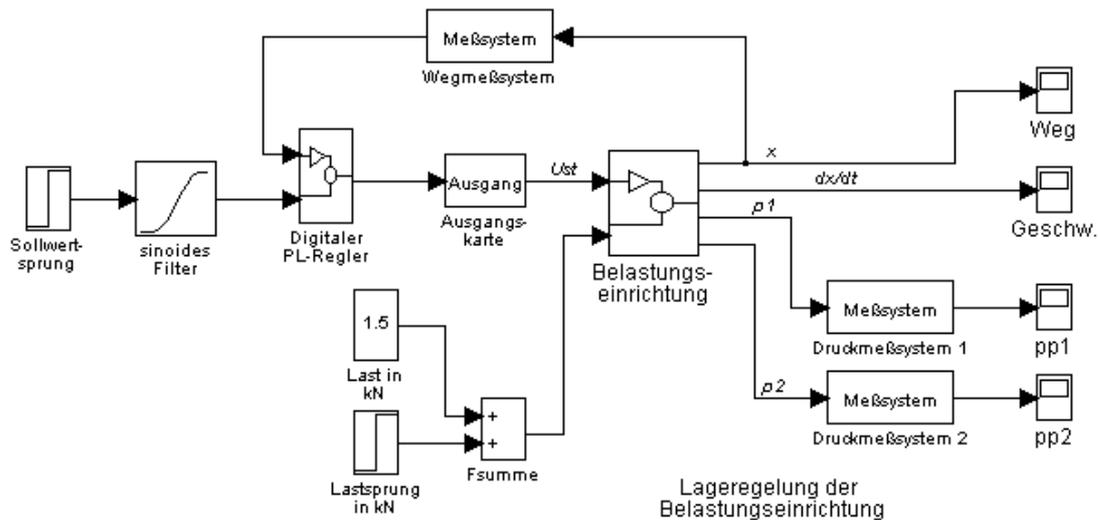


Abb. 3.1.1. Lageregelkreis mit PL-Regler und Führungsgrößenfilter

### 3.1.2. Die Kraftregelung

Die Regelstrecke für die Kraftregelung besitzt  $PT_S$ -Verhalten. Der eingesetzte Regler sollte also einen I-Anteil enthalten.

Für die Kraftregelung wird vom Steuerungsrechner ein Sollwertverlauf vorgegeben, ein Führungsgrößenfilter muß hier also nicht eingesetzt werden.

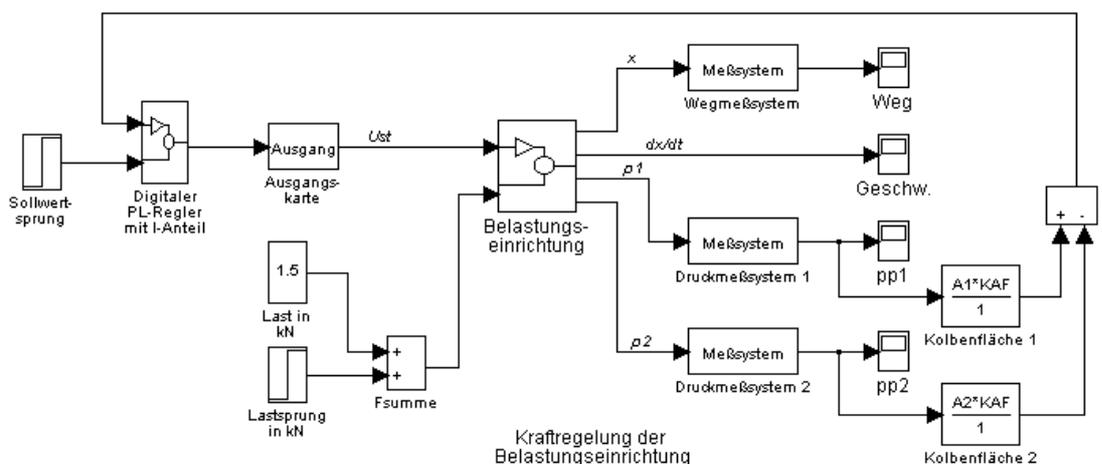


Abb. 3.1.2. Kraftregelkreis mit PL-Regler

### 3.2. Führungsgrößengenerierung

Die Führungsgrößengenerierung hat die Aufgabe, aus einem sprungförmig anliegenden Sollwert einen gewünschten Sollwertverlauf zu formen. Dabei sollen bestimmte Vorgaben wie Maximalbeschleunigung und -anstiegsgeschwindigkeit eingehalten werden. Für die Lageregelung, z.B., werden meist weiche Übergangsvorgänge gefordert, das heißt, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge sollen ruckfrei ablaufen. Da Beschleunigung und Geschwindigkeit Ableitungen des Weges sind, kann man schon erkennen, daß die Führungsgrößengenerierung zu einer Vorgabe der Ableitungen führen wird.

### 3.2.1. Die Sinoide Übergangsfunktion

In /ZACH/ wird der Vorschlag einer sinoiden Übergangsfunktion gemacht. Sinusfunktionen haben den Vorteil, daß ihre Ableitungen ebenfalls Sinusfunktionen sind. Es kann also keine unstetigen Übergänge geben.

Beim heutigen Stand der Rechentechnik (i486 mit integriertem mathematischen Coprocessor) ist die Sinusfunktion bereits hardwaremäßig als Befehl implementiert. Es besteht also rechentechnisch kein Grund, die Sinusfunktion nicht einzusetzen.

In /ZACH/ wird die „BESTEHORN-Sinoid-Funktion“ als geeignete Funktion eingeführt.

$$f\left(\frac{t}{T_{AB}}\right) = \frac{t}{T_{AB}} - \frac{1}{2}\pi \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{Gln. 3.2.1})$$

mit  $T_{AB} = \frac{2\pi}{\omega}$  (Gln. 3.2.2)

wobei  $T_{AB}$  die Summe aus Anlauf- und Bremszeit darstellt. Betrachtet man eine Sinusschwingung, so kann man die positive Halbwelle als Anlauf- und die negative Halbwelle als Bremsvorgang bezeichnen.

Auf das Lageregelproblem /ZACH/ angewendet, wird aus (Gln. 3.2.1) folgende Beziehung:

$$x(t) = \frac{v_{soll}}{2} \left(1 - \frac{1}{\omega} \sin(\omega \cdot t)\right) \quad (\text{Gln. 3.2.3})$$

$v_{soll}$  ist dabei die nach der Beschleunigung zu erreichende stationäre Geschwindigkeit.

Wie bereits oben erwähnt, führt die Führungsgrößengenerierung auf eine Vorgabe der Ableitungen hin. Für den Weg als Sollwert sind die benötigten Ableitungen die Geschwindigkeit und die Beschleunigung. Es muß also nur ein Beschleunigungsverlauf vorgegeben werden, aus dem dann durch zweifache Integration der entsprechende Wegsollwertverlauf entsteht.

Für die Ableitungen aus (Gln. 3.2.3) gilt :

$$\dot{x} = v = \frac{v_{soll}}{2} (1 - \cos(\omega \cdot t)) \quad (\text{Gln. 3.2.4})$$

$$\ddot{x} = a = \frac{v_{soll}}{2} \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{Gln. 3.2.5})$$

Aus den vorgegeben Größen  $x_{soll}$ ,  $v_{max}$  und  $a_{max}$  soll nun der entsprechende Führungsgrößenverlauf bestimmt werden. Dazu sind folgende Vorbetrachtungen nötig. Voraussetzung ist, daß Anlauf- und Bremsphase gleich verlaufen (siehe Halbwellen). Weiterhin gehe ich vorläufig davon aus, daß  $x_{soll}$  größer als der in der Anlauf- und Bremsphase zurückgelegte Weg sei, das heißt,  $v_{soll} = v_{max}$ . Ein entsprechender gewünschter Verlauf würde so aussehen :

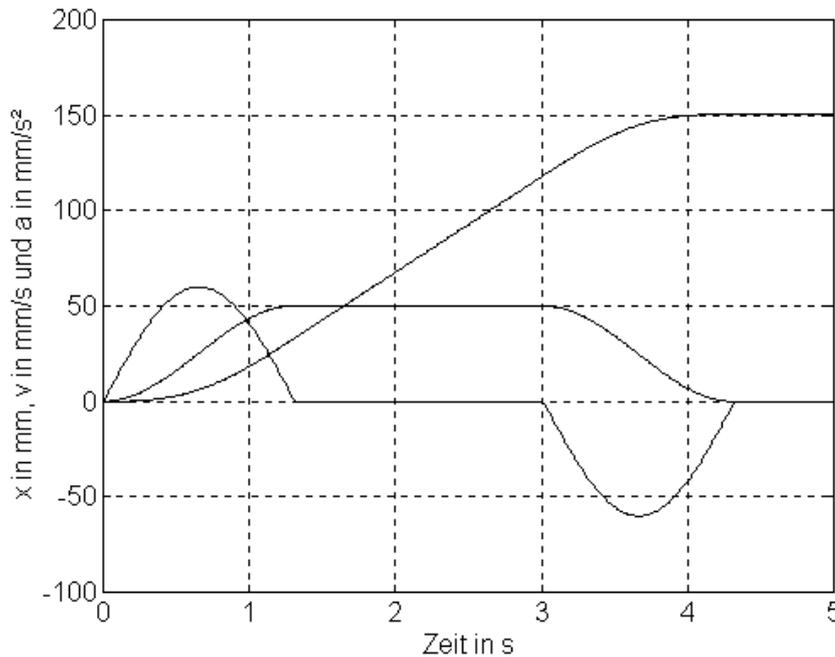


Abb. 3.2.1. Sinoider Führungsgrößenverlauf

Es entstehen also 3 Phasen. Phase I und III sind gleichlang. Sie entsprechen der Zeit  $T_A$ . Aus (Gln. 3.2.5) folgt für  $a(t)=a_{max}$  (das Maximum ist erreicht, wenn  $\sin(\omega t)=1$ ):

$$a_{max} = \frac{v_{soll}}{2} \cdot \omega \cdot 1 \quad (\text{Gln. 3.2.6})$$

Aus (Gln. 3.2.6) folgt mit (Gln. 3.2.2) und  $T_A = 1/2 T_{AB}$ :

$$T_A = \frac{v_{soll} \cdot \pi}{2a_{max}} \quad (\text{Gln. 3.2.7})$$

und 
$$\omega = \frac{\pi}{T_A} \quad (\text{Gln. 3.2.8})$$

Damit ist die Zeitdauer für Anlauf- und Bremsvorgang bestimmt. Um jetzt die Dauer der stationären Phase  $T_K$  zu ermitteln, sind Anlauf- und Bremsweg zu bestimmen. Dazu werden (Gln. 3.2.7) und (Gln. 3.2.8) in (Gln. 3.2.3) eingesetzt :

$$x_{AB} = \frac{v_{soll}}{2} \left( 2T_A - \frac{1}{\omega} \sin\left(\frac{\pi}{T_A} 2T_A\right) \right) \quad \text{mit } \sin(2\pi) = 0 \text{ folgt :}$$

$$x_{AB} = v_{soll} \cdot T_A \quad (\text{Gln. 3.2.9})$$

Damit ist Anlauf- und Bremsweg bestimmt. Für die Zeit  $T_K$  bleibt die Geschwindigkeit konstant.  $T_K$  berechnet sich also aus (Gln. 3.2.9) wie folgt :

$$T_K = \frac{x_{soll} - x_{AB}}{v_{soll}} = \frac{x_{soll}}{v_{soll}} - T_A \quad (\text{Gln. 3.2.10})$$

Bis jetzt haben wir den Fall  $x_{soll} < x_{AB}$  außer acht gelassen. Eine Sinusschwingung der Beschleunigung wäre zu lang, und  $x$  wäre größer als  $x_{soll}$ . Also muß  $T_A$  verringert werden und zwar soweit, daß der Weg während einer Schwingung genau  $x_{soll}$  entspricht. In (Gln. 3.2.9) eingesetzt ergibt das zusammen mit (Gln. 3.2.7) :

$$x_{soll} = x_{AB} = v_{soll} \cdot T_A = \frac{v_{soll}^2 \cdot \pi}{2a_{\max}} \quad (\text{Gln. 3.2.11})$$

Für  $v_{soll}$  ergibt sich dann :

$$v_{soll} = \sqrt{\frac{2a_{\max} \cdot x_{soll}}{\pi}} \quad (\text{Gln. 3.2.12})$$

Ein entsprechender Führungsgrößenverlauf würde etwa so aussehen :

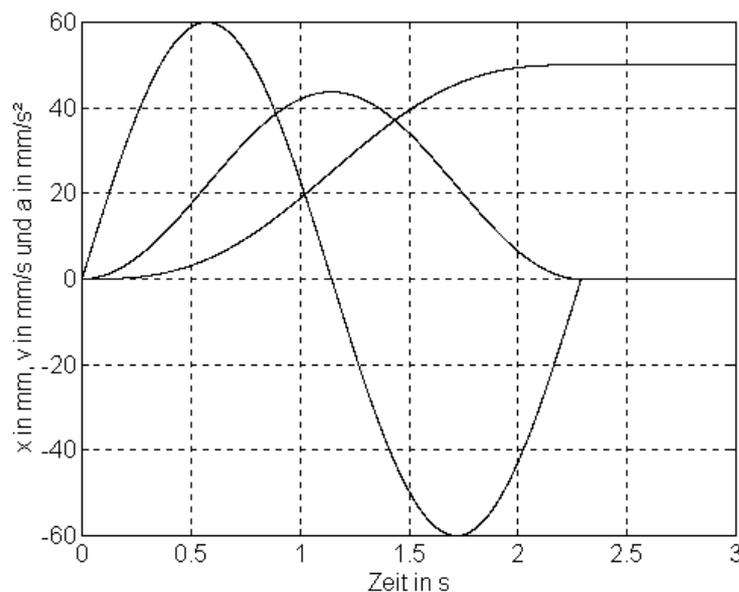


Abb. 3.2.2. Führungsgrößenverlauf für  $x_{soll} < x_{AB}$

Zusammenfassend ergeben sich also folgende Berechnungsschritte :

1. Berechnung von  $v_{soll}$  
$$v_{soll} = \sqrt{\frac{2a_{\max} \cdot x_{soll}}{\pi}} \quad (\text{Gln. 3.2.12})$$

2. Begrenzung von  $v_{soll}$ , wenn  $v_{soll} > v_{\max}$

3.  $T_A$  und  $\omega$  berechnen 
$$T_A = \frac{v_{soll} \cdot \pi}{2a_{\max}} \quad (\text{Gln. 3.2.7})$$

$$\omega = \frac{\pi}{T_A} \quad (\text{Gln. 3.2.8})$$

4.  $T_K$  berechnen 
$$T_K = \frac{x_{soll}}{v_{soll}} - T_A \quad (\text{Gln. 3.2.10})$$

5. wenn  $T_K < 0$  ist (keine stationäre Phase), dann  $T_K = 0$

6. Je nach Phase wird der entsprechende Beschleunigungswert berechnet.

I ( $t \leq T_A$ ) : 
$$\ddot{x} = a = a_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

II ( $T_A < t \leq T_A + T_K$ ) 
$$\ddot{x} = a = 0$$

III ( $T_A + T_K < t \leq 2T_A + T_K$ ) 
$$\ddot{x} = a = a_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot (t - T_A - T_K))$$

7. Durch zweifache Integration wird der Wegsollwert bestimmt.

Man kann die Führungsgrößengenerierung also in zwei Prozesse einteilen :

1. Schritte 1...5 : Initialisieren
2. Schritte 6...7 : aktuellen Wert berechnen

### 3.2.2. Realisierung

Da die gesamte Regelung in einem zeitdiskreten digitalem Rechnersystem läuft, muß auch die Führungsgrößengenerierung diskret aufgebaut sein.

Teilprozeß 1 - die Initialisierung - berechnet alle Größen und setzt das Start-Flag. Nun kann bei jedem Tastschritt der Teilprozeß 2 - aktuellen Wert berechnen - ausgeführt werden.

Durch die Taktung kommt es in Abhängigkeit von der Tastperiodendauer zu geringen Abweichungen des Endwertes. Um diese zu vermeiden, wird die letzte Wertberechnung dem Endwert gleichgesetzt. Gleichzeitig wird das Start-Flag rückgesetzt.

Entsprechende MatLAB- (*SINOID.M*) und TurboPascal- (*REG\_SIN1.PAS*, *REG\_SIN2.PAS*) Programme finden Sie im Anhang B.

### **3.3. Der PL-Regler - Das Prinzip der Lokalisation**

Alle Berechnungen und Herleitungen in diesem Kapitel gehen von einem Schwingglied 2. Ordnung als Regelstrecke aus. Die entsprechende Übertragungsfunktion lautet :

$$G_s(p) = \frac{1}{T_s^2 p^2 + 2D_s T_s p + 1} \quad (\text{Gln. 3.3.1})$$

Später wird dann auch auf die Regelstrecke mit Integrierglied eingegangen.

Der PL-Regler ist bereits in /WEB/, /PLRN/ und /ZACH/ ausführlich erläutert worden, trotzdem möchte ich hier noch einmal ausführlich die Zusammenhänge darstellen, um auf die am Ende verwendeten mathematischen Beziehungen für die Programmierung zu kommen.

#### **3.3.1. Das Prinzip der Lokalisation**

Das Prinzip der Lokalisation beruht auf der Vorstellung eines inneren und eines äußeren Regelkreises /WEB/ , wobei der innere bedeutend schneller ist, also auch schneller auf Änderungen reagieren kann.

Ziel des PL-Reglers ist es, den Regelkreis einem bestimmten gewünschten Führungsverhalten anzupassen.

Das Steuergesetz des PL-Reglers im kontinuierlichen Fall lautet /PLRN/ :

$$u = K \cdot \left[ F(x_g, w) - x^{(n)} \right] \quad (\text{Gln. 3.3.2})$$

wobei  $x^{(n)}$  die höchste Ableitung der Regelgröße,  $x_g$  das gewünschte Führungsverhalten und  $F(x_g, w)$  die gewünschte höchste Ableitung darstellen.

Da ich hier nur ein Schwingglied 2. Ordnung betrachten möchte, lautet die gewünschte Führungsübertragungsfunktion :

$$G_g(p) = \frac{1}{T_g^2 p^2 + 2D_g T_g p + 1} \quad (\text{Gln. 3.3.3})$$

$T_g$  ist dabei die gewünschte Zeitkonstante und  $D_g$  die gewünschte Dämpfung. Ein günstiges Übergangsverhalten (5% Überschwingen) erhält man mit  $D_g = 0.7$ .

Aus der gewünschten Führungsübertragungsfunktion (Gln. 3.3.3) ergibt sich nun für  $F(x_g, w)$  :

$$F(x_g, w) = \ddot{x}_g = -\frac{2D_g}{T_g} \dot{x}_g - \frac{1}{T_g^2} x_g + \frac{1}{T_g^2} w \quad (\text{Gln. 3.3.4})$$

Nimmt man nun an, daß im ausgeregelteten Zustand (Ziel der Regelung) gilt  $x_g \approx x$ , so kann an Stelle von  $x_g$  bzw.  $\dot{x}_g$  auch  $x$  bzw.  $\dot{x}$  eingesetzt werden. Damit ergibt sich also die folgende Reglerstruktur für einen PL-Regler mit einer Strecke 2. Ordnung. Als Zusatz soll ein Regler-I-Anteil eingeführt werden :

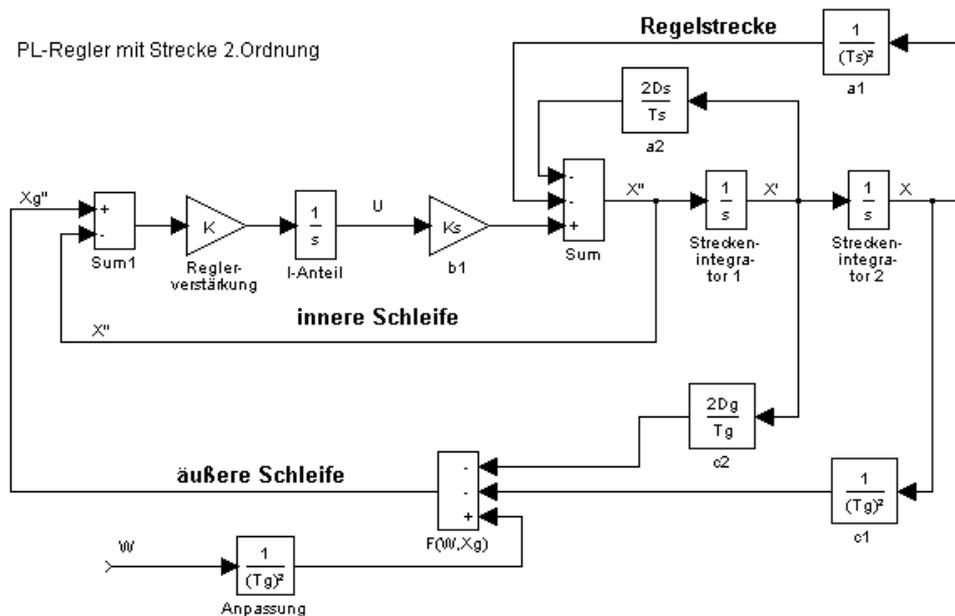


Abb. 3.3.1.  $PT_s$ -Strecke mit PL-Regler

Wie man erkennen kann, ergeben sich ein innerer und ein äußerer Kreis. Der innere Kreis enthält keine Verzögerungsglieder und hat als Ausgangsgröße eine 2. Ableitung. Diese innere Schleife muß also sehr schnell sein.

### 3.3.2. Der kontinuierliche PL-Regler

Es gilt nun, durch geeignete Reglerparameter das reale Regelkreisverhalten an die gewünschte Führungsübertragungsfunktion anzupassen.

Dazu ist jedoch vorher noch eine Hürde zu überwinden. Für die Reglerstruktur sind die Ableitungen der Regelgröße  $X''$  und  $X'$  nötig.

Nun ist es aber in der Realität meistens nicht möglich, die Ableitungen der Regelgröße zu messen. Um diese zu erhalten, muß ein differenzierendes Filter 2. Ordnung /PLRN/ eingeführt werden. Eingangsgröße ist dabei die Regelgröße  $X$ , Ausgangsgrößen sind die geschätzten Ableitungen  $Y''$ ,  $Y'$  und  $Y$ .

Die Filtergleichung lautet /PLRN/ :

$$\ddot{y} = -\frac{d_1}{T_f} \dot{y} - \frac{1}{T_f^2} y + \frac{1}{T_f^2} x \quad (\text{Gln. 3.3.5})$$

Für den Regelkreis ergibt sich damit folgende Struktur :

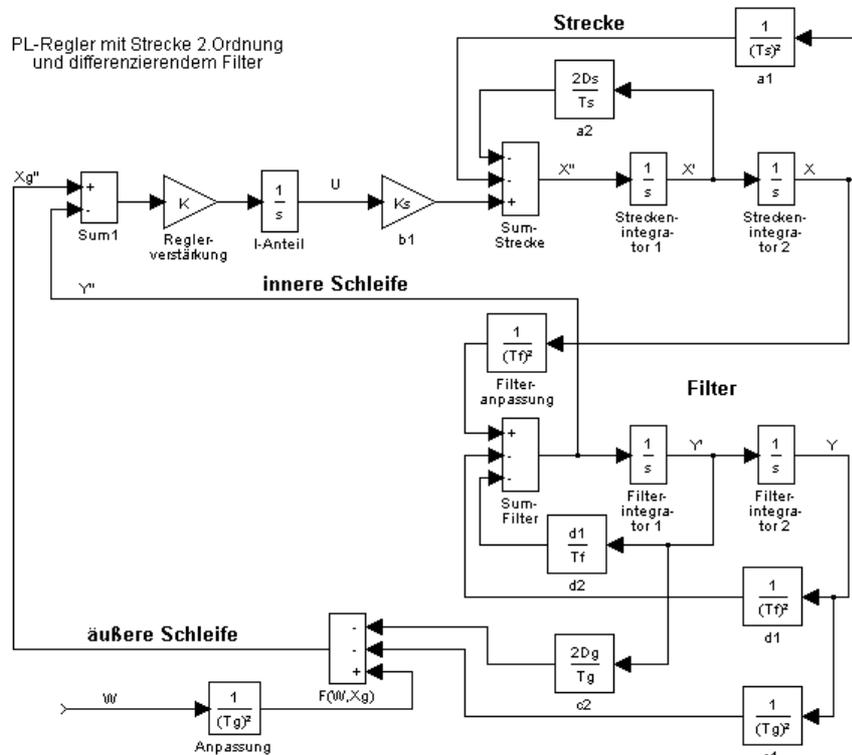


Abb. 3.3.2.  $PT_s$ -Strecke mit PL-Regler und Regelgrößenfilter

Wie man sieht, besteht die innere Schleife aus :

- Reglerverstärkung
- Regler-I-Anteil
- Streckenverstärkung
- differenzierendem Filter

Die Übertragungsfunktion des inneren Kreises lautet also :

$$G_I(p) = \frac{1}{\frac{T_f^2}{KK_S} p^3 + \frac{d_1 T_f}{KK_S} p^2 + \frac{1}{KK_S} p + 1} \quad (\text{Gln. 3.3.6})$$

Den Nenner dieser Gleichung nennt man die charakteristische Gleichung. Deren Normalform (eine Gleichung 3. Ordnung) lautet :

$$T_y^3 p^3 + r \cdot T_y^2 p^2 + r \cdot T_y p + 1 = 0 \quad (\text{Gln. 3.3.7})$$

Mit  $r = 2$  ergibt sich ein stabiles Verhalten mit 10% Überschwingen /PLRN/. Dieses Verhalten ist günstig für die innere Schleife.

Aus (Gln. 3.3.6) und (Gln. 3.3.7) kann man nun durch Koeffizientenvergleich die Parameter  $K$ ,  $T_f$  und  $d_I$  bestimmen. Mit deren Berechnung sind alle Reglerparameter bestimmt.

Zusammenfassend sind also folgende Schritte durchzuführen :

1. Festlegen des gewünschten Verhaltens  $T_g$  und  $D_g$
  2.  $T_y = 1/10 T_g$  /PLRN/
  3.  $K = \frac{1}{2K_s T_y}$
  4.  $T_f = \frac{T_y}{\sqrt{2}}$
  5.  $d_I = 0,7071$
3. ... 5. gilt für 10% Überschwingen ( $r = 2$ )

### 3.3.3. Der diskrete PL-Regler

In der heutigen Zeit werden Regler meist nicht mehr als analoge sondern als digitale softwarebasierte Regler eingesetzt. Auch diese Diplomarbeit hat zum Ziel, einen softwarebasierten Regler zu verwenden.

In der Digitaltechnik wird immer mit Takten und einem festen Zahlenvorrat gearbeitet. Deshalb muß vom kontinuierlichen in den zeitdiskreten Bereich gewechselt werden. Für die Berechnungen im zeitdiskreten Bereich eignen sich am besten z-transformierte Gleichungen.

Für den PL-Regler heißt das, aus dem Stellgesetz im kontinuierlichen Bereich (Gln. 3.3.2) wird das Stellgesetz für den diskreten Fall /PLRN/ :

$$u_k = u_{k-1} + K \cdot \left[ F(x_{gk+1}, w_k) - x_{k+1} \right] \quad (\text{Gln. 3.3.8})$$

Bei einer Strecke 2. Ordnung müßte eigentlich die 2. Ableitung, das heißt  $x_{k+2}$ , verwendet werden, warum aber nicht hier ?

Da auch das gewünschte Führungsverhalten nicht springen kann (darf), kann nur  $u_{k-1}$  einen Einfluß auf  $x_k$  haben. Es ist also schon eine Verschiebung um einen Takt vorhanden und für ein Glied 2. Ordnung muß nur noch eine weitere Verschiebung durchgeführt werden. Durch  $u_{k-1}$  wird auch automatisch der I-Anteil im Regler eingeführt.

Im nächsten Schritt müssen die Übertragungsfunktion  $G_s(p)$  der Strecke und das gewünschte Übertragungsverhalten  $G_g(p)$  vom Laplace- in den Z-Bereich transformiert werden. In beiden Fällen wird von einem „Halteglied nullter Ordnung“ ausgegangen. Die genaue Transformation ist im Anhang A beschrieben.

Aus (Gln. 3.3.1) ergibt sich nun für das diskrete Prozeßmodell folgende Z-Transformierte :

$$HG_s(z) = \frac{X(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (\text{Gln. 3.3.9})$$

Aus (3.3.3) ergibt sich weiterhin das gewünschte Prozeßmodell :

$$HG_g(z) = \frac{X_g(z)}{W(z)} = \frac{C_w(z)}{C(z)} = \frac{c_{w1} z^{-1} + c_{w2} z^{-2}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}} \quad (\text{Gln. 3.3.10})$$

Für das Stellgesetz (Gln. 3.3.8) wird  $x_{gk+1}$  benötigt. Dazu muß die linke Seite von (Gln. 3.3.9) einfach nur mit  $z$  multipliziert werden.

$$F(w_k, x_{gk+1}) = \frac{z \cdot X_g(z)}{W(z)} = \frac{c_{w1} z^{-1} + c_{w2} z^{-2}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}} \quad (\text{Gln. 3.3.11})$$

Denn aus (Gln. 3.3.10) folgt :

$$x_{gk} = c_{w1} w_{k-1} + c_{w2} w_{k-2} - c_1 x_{k-1} - c_2 x_{k-2}$$

und  $F(w_k, x_{gk+1}) = x_{gk+1} = c_{w1} w_k + c_{w2} w_{k-1} - c_1 x_k - c_2 x_{k-1} \quad (\text{Gln. 3.3.12})$

Auch beim diskreten PL-Regler wird wieder ein differenzierendes Filter 2. Ordnung für die Bildung der Ableitungen der Regelgröße benötigt. Dieses Filter hat folgende Z-Transformierte :

$$y_{k+1} = \frac{z \cdot Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} \quad (\text{Gln. 3.3.13})$$

Warum  $y_{k+1}$  ?

Wie auch in (Gln. 3.3.11) wird der  $k+1$ -te Werte für das Stellgesetz (Gln. 3.3.8) benötigt. Die Differenzgleichung lautet :

$$y_{k+1} = x_k - d_1 y_k - d_2 y_{k-1} \quad (\text{Gln. 3.3.14})$$

Für die weiteren Betrachtungen wird von folgenden Voraussetzungen ausgegangen :

1.  $Y(z) \approx X(z)$  (Ziel des Filters)
2.  $X_g(z) \approx X(z) \approx Y(z)$  (Ziel der Regelung)

Weiterhin gelten folgende Koeffizienten :

$$C_w = \{0; C_{w1}; C_{w2}\}$$

$$C = \{1; C_1; C_2\}$$



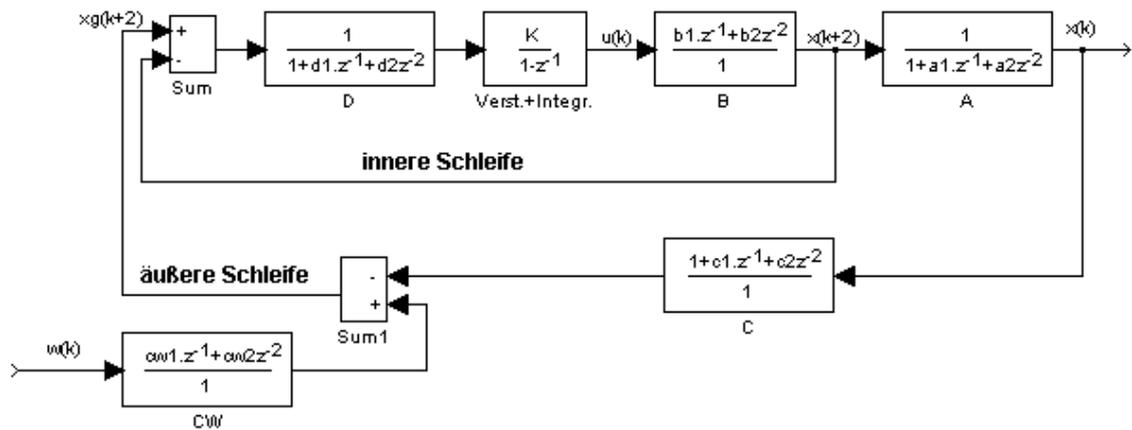


Abb. 3.3.4. diskreter PL-Regler mit PT<sub>S</sub>-Strecke

Wie auch beim kontinuierlichen Fall erkennt man die innere und die äußere Schleife. Die charakteristische Gleichung des inneren Kreises lautet :

$$\frac{K}{1-z^{-1}} \cdot \frac{1}{1+d_1z^{-1}+d_2z^{-2}} \cdot (b_1z^{-1}+b_2z^{-2}) + 1 = 0 \quad (\text{Gln. 3.3.18})$$

Nach Umformung erhält man :

$$z^3 + (Kb_1 + d_1 - 1) \cdot z^2 + (Kb_2 + d_2 - d_1) \cdot z - d_2 = 0 \quad (\text{Gln. 3.3.19})$$

Nimmt man nun einen Dreifachpol bei  $z = z_i$  an, so folgt daraus (Gln. 3.3.29) :

$$z^3 + (Kb_1 + d_1 - 1) \cdot z^2 + (Kb_2 + d_2 - d_1) \cdot z - d_2 = (z - z_i)^3 = z^3 - 3z_i z^2 + 3z_i^2 z - z_i^3$$

Es entstehen 3 Gleichungen mit 3 Unbekannten. Durch Koeffizientenvergleich erhält man  $K$ ,  $d_1$  und  $d_2$ .

Der Dreifachpol  $z_i$  ergibt sich aus der Definition der Z-Transformation :  $z = e^{pT}$ , wobei  $T$  die Tasteriodendauer und  $p = -1/T_F$  mit  $T_F$  - Filterzeitkonstante sind.

Davon ausgehend sind nun die folgenden Berechnungsschritte durchzuführen :

1. Vorgabe  $T$
2. Vorgabe  $T_F$  (wobei  $T_F \geq T$  gelten muß)
3.  $z_i = e^{-\frac{T}{T_F}}$  (Gln. 3.3.21)
4. aus (3.3.20) folgt  $d_2 = z_i^3$  (Gln. 3.3.22)
5. weiterhin :  $K = \frac{1-d_2+3z_i^2-3z_i}{b_1+b_2}$  (Gln. 3.3.23)
6. weiterhin :  $d_1 = 1-3z_i-K \cdot b_1$  (Gln. 3.3.24)

Damit sind alle Parameter des diskreten PL-Reglers bestimmt.  $c_{w1}$ ,  $c_{w2}$ ,  $c_1$  und  $c_2$  ergeben sich aus dem gewünschten Verhalten (Gln. 3.3.10),  $K$ ,  $d_1$  und  $d_2$  aus den Gleichungen (Gln. 3.3.21 ... 3.3.24).

Die einzigen Vorgaben sind  $T$ ,  $T_F$ ,  $T_g$  und  $D_g$ . Für  $T_F$  und  $T_g$  werden in /PLRN/ folgende Aussagen getroffen :

1.  $T_F \geq T$  (nicht zwingend)
2.  $2 \leq \frac{T_g}{T_F} \leq 10$  wobei für Antriebe 2 und für Temperaturstrecken 10 vorgegeben werden sollte.

In /WEB/ wird vorgeschlagen, den Faktor  $F_{95}$  einzuführen, der sozusagen das „Einstellpotentiometer“ für die Dynamik der PL-Regelung darstellt.

Ich erweitere diese Vorstellung noch um den Zeitkonstantenfaktor  $K_T$ , der das Verhältnis langsame Zeitkonstante zu schneller Zeitkonstante vorgibt.

Für  $T_F$  und  $T_g$  ergeben sich damit :

$$T_F = \frac{1}{2} \cdot T_S \cdot F_{95} \cdot 1,1 \quad (\text{Gln. 3.3.25})$$

$$T_g = K_T \cdot T_F \quad (\text{Gln. 3.3.26})$$

Als Anfangswerte sollten  $F_{95} = 1$  und  $K_T = 2$  verwendet werden.

### **3.3.4. Regelstrecken mit Integrator**

Alle bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf sogenannte „Regelstrecken mit Ausgleich“, im Speziellen auf das Schwingglied 2. Ordnung.

Die in dieser Diplomarbeit betrachtete Regelstrecke eines elektrohydraulischen Antriebes mit der Position als Regelgröße besitzt jedoch integrierendes Verhalten. Die Geschwindigkeitsübertragungsfunktion ist die eines PT<sub>S</sub>-Gliedes. Für die Ausgangsgröße „Weg“ ist ihr noch ein Integrator nachgeschaltet.

$$G_S(p) = \frac{1}{T_S^2 p^2 + 2D_S T_S p + 1} \cdot \frac{1}{p} \quad (\text{Gln. 3.3.27})$$

Die weitere Vorgehensweise ist folgende. Der I-Anteil der Strecke liegt in Reihe in der inneren Schleife. Wird nun einfach der I-Anteil des PL-Reglers weggelassen, so ändern sich keine der bisherigen Berechnungsgrundlagen.

Im Klartext heißt das, es gelten uneingeschränkt alle genannten Berechnungsvorschriften, nur der I-Anteil im Regler wird entfernt. Gleiches gilt für den diskreten Fall.

### **3.3.5. Berechnungsschritte zum Reglerentwurf**

Zum Schluß möchte ich noch einmal zusammenfassend alle nötigen Berechnungsschritte für den Entwurf eines diskreten PL-Reglers aufführen.

Vorgaben :

- $T_S, D_S$  und  $K_S$  - die Parameter der Regelstrecke
- $D_g$  - die gewünschte Dämpfung
- $F_{95}$  - Faktor für PL-Regelung (Anfangswert 1)
- $K_T$  - Zeitkonstantenverhältnis (Anfangswert 2)
- $T$  - Tastperiodendauer

Zeitkonstanten berechnen :

$$1. T_F = \frac{1}{2} \cdot T_S \cdot F_{95} \cdot 1,1 \quad T_F \geq T \quad (\text{Gln. 3.3.25})$$

$$2. T_g = K_T \cdot T_F \quad (\text{Gln. 3.3.26})$$

Z-Transformierte berechnen :

Die Berechnung erfolgt zweimal in 10 Schritten gemäß Anhang A für das Prozeßmodell und die gewünschte Pulsübertragungsfunktion.

$$3. HG_S(z) = \frac{X(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (\text{Gln. 3.3.9})$$

$$4. HG_g(z) = \frac{X_g(z)}{W(z)} = \frac{C_w(z)}{C(z)} = \frac{c_{w1} z^{-1} + c_{w2} z^{-2}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}} \quad (\text{Gln. 3.3.10})$$

Die Parameter  $c_{w1}$ ,  $c_{w2}$ ,  $c_1$  und  $c_2$  für den Regler sind nun bereits bekannt.

Inneren Kreis berechnen :

$$5. z_i = e^{-\frac{T}{T_F}} \quad (\text{Gln. 3.3.21})$$

$$6. d_2 = z_i^3 \quad (\text{Gln. 3.3.22})$$

$$7. K = \frac{1 - d_2 + 3z_i^2 - 3z_i}{b_1 + b_2} \quad (\text{Gln. 3.3.23})$$

$$8. d_1 = 1 - 3z_i - K \cdot b_1 \quad (\text{Gln. 3.3.24})$$

Damit sind auch die Reglerparameter  $K$ ,  $d_1$  und  $d_2$  berechnet. Der PL-Regler ist nun vollständig entworfen.

Im Anhang B finden Sie die Softwarelistings für MatLAB (*STF\_PL1.M*, *STF\_PL.M*) und für TurboPascal (*PLReglerEntwurf*).