

0 Inhaltsverzeichnis

0	INHALTSVERZEICHNISS	1
1	VORWORT	2
2	EINFÜHRUNG	2
3	DIE STEUERUNG	3
4	DIE REGELUNG	3
4.1	GRUNDLAGEN DER REGELUNGSTECHNIK	4
4.1.1	<i>Die Linearität</i>	4
4.1.2	<i>Die Zeitinvarianz</i>	4
4.1.3	<i>Der Grundregelkreis</i>	5
4.1.4	<i>Die Regelstrecke</i>	6
4.1.5	<i>Der PID-Regler</i>	8
4.2	LINEARE REGELUNGSSTRUKTUREN.....	10
4.2.1	<i>Der einfache Regelkreis</i>	10
4.2.2	<i>Störgrößenaufschaltung</i>	10
4.2.3	<i>Kaskadenregelung</i>	12
4.2.4	<i>Regler mit Beobachter (Prädiktor)</i>	13
4.2.5	<i>Overrideregelung</i>	16
4.2.6	<i>Verhältnisregelung</i>	17
4.3	EINSTELLKRITERIEN	18
4.3.1	<i>Die Stabilität</i>	18
4.3.2	<i>Die Regelgüte</i>	19
4.3.3	<i>Die experimentelle Prozeßanalyse zur Streckenmodellbildung</i>	21
4.3.4	<i>Berechnung der Reglerparameter</i>	25
4.4	NICHTLINEARE REGELUNGSKONZEPTE.....	30
4.4.1	<i>Der FUZZY-Regler</i>	30
4.4.2	<i>Veränderliche Regler</i>	32
5	DIE STELLGRÖÖE EINER REGELUNG	34
6	DAS STELLGERÄT	38
6.1	STELLGERÄTE FÜR DURCHFLUß UND DRUCK	39
6.1.1	<i>Kriterien für die Stellglieder</i>	39
6.1.2	<i>Bestimmung von Kenngrößen aus Anlagendaten</i>	42
7	APPLIKATIONEN	44
7.1	DIE NEUTRALISATION	44
7.2	STELLGLIEDER AN REGELSTRECKEN MIT STATISCHEM ODER/UND DYNAMISCHEM DRUCKVERLUST	48
7.2.1	<i>Stellglieder an Regelstrecken mit statischem Druckverlust[1]</i>	49
7.2.2	<i>Stellglieder an Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust[1]</i>	50
8	LITERATURVERZEICHNIS	53
9	ANHANG	54

1 Vorwort

Diese Arbeit gibt einen Überblick über das weite Feld der Steuerungs- und Regelungstechnik, speziell über die verschiedenen linearen Regelungsstrukturen und dazugehörigen Optimierungsverfahren. In dem Zusammenhang werden Verfahren vorgestellt, mit denen von einem Prozeß oder einer Regelstrecke ein mathematisches Modell im Zeit- bzw. Laplace-Bereich ermittelt werden kann. Des weiteren wird gezeigt, wie daraus mit Hilfe von Gütekriterien Reglerparameter berechnet werden. Auch nichtlineare Regelungsstrukturen werden vorgestellt und Ansätze zur Parameterbestimmung gezeigt. Da die Stellgeräte ein wichtiger Bestandteil eines Regelungs- oder Steuerungssystems sind, werden auch einige Stellgeräte z.B. Ventile mit Stellantrieb vorgestellt.

Am Ende dieser Arbeit wird als Zusammenfassung gezeigt, daß eine Steuerung mit Regelung nicht auf einer SPS mit Hilfe eines Reglerbausteines, einem externen Bedienpanel und einer externen Visualisierung realisiert werden sollte. Eine bessere und einfachere Lösung solcher Aufgabenstellungen ist durch den Einsatz von Universalreglern mit I/O-Modulsteckplätzen, Buskoppelbausteinen und der Programmierbarkeit von Steuerungsbausteinen gegeben. In diesem Zusammenhang wird ein Lösungsansatz für die Realisierung einer Neutralisationsanlage vorgestellt. Es wird gezeigt, daß heutige Universalregler in der Lage sind, neben der Regelung eines nichtlinearen, stark totzeitbehafteten Prozesses auch Steuerungsaufgaben und Überwachungsaufgaben von allen am Prozeß beteiligten Peripherieeinheiten zu übernehmen. Des weiteren kann über das vorhandene Bedienpanel eine Visualisierung und Bedienbarkeit wichtiger Prozeßsignale vor Ort durchgeführt werden. Auch eine Anbindung an übergeordnete Leittechnik kann über Buskoppelbausteine realisiert werden.

2 Einführung

In der Automatisierungstechnik können verschiedene Automatisierungsgrade und -strukturen unterschieden werden. Die automatisierungstechnischen Strukturen basieren auf der „Steuerung“ und der „Regelung“. Der Grad der Automatisierung beschreibt den Bereich von einer einfachen Steuerung über die Regelkreise bis hin zu komplexen Leitsystemen. Mit Hilfe von Leitsystemen können komplexe Anlagen gesteuert, geregelt, visualisiert und bedient, sowie Daten dokumentiert und betriebswirtschaftliche Betrachtungen durchgeführt werden.

Dieser Beitrag befaßt sich nur mit Automatisierungsstufen, die zwischen einem einfachen Regelkreis und der Automatisierung von kleinen Anlagen, wie z.B. einem Teil einer Großanlage ohne eigenem Leitsystem, einzuordnen sind. Ein Beispiel dafür ist die Neutralisation in einem Kraftwerk. Bei solchen Anlagen muß eine Bedienung vor Ort und die Verfügbarkeit aller wichtigen Daten im Leitsystem ermöglicht werden. Dies bedeutet, daß eine Anbindung über ein Bussystem mit einem Standardprotokoll wie *Profibus* an die Leitebene realisierbar sein muß.

3 Die Steuerung

Bei einer Steuerung ist die Wirkungskette des Steuereingriffs offen. Das heißt, es ist keine Rückführung des Systemverhaltens vorhanden, so daß die Steuereinrichtung keine Information über die Wirkung des Steuereingriffs erhält. Daher kann die Steuerung auf Störungen oder unvorhersehbare Ereignisse im Prozeßablauf nicht

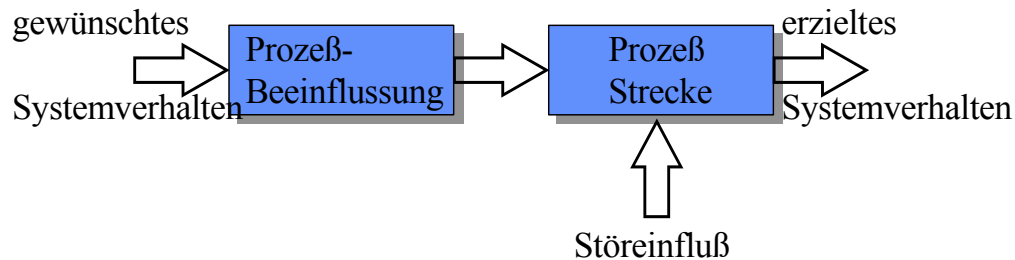


Abbildung 3.1: Steuerung - Open-Loop

reagieren, so daß sich das gewünschte Systemverhalten nicht einstellen kann.

Steuerungen sind meist Ereignis- oder Zeit-gesteuerte Abläufe, wie z.B. bei einer Schleuse:

1. Ein Boot steht im Unterwasser.
2. Wenn Pegelstand in der Schleusenkammer ungleich Pegelstand im Unterwasser, dann Wasser aus Schleusenkammer ablassen.
3. Wenn Pegelstand in der Schleusenkammer gleich Pegelstand im Unterwasser, dann Tore öffnen.
4. Wenn Boot in der Schleusenkammer, dann Tore schließen.
5. Wenn Tor geschlossen, dann Wasser in Schleusenkammer einlassen.
6. Wenn Pegelstand in der Schleusenkammer gleich Pegelstand im Oberwasser, dann Tore öffnen.
7. Wenn Boot aus Schleusenkammer, dann Tore schließen.
8. ENDE

In der Regel werden bei Steuerungen nur binäre Signale verarbeitet, da nur das Erreichen von bestimmten Zuständen für die Ausführung des nächsten Teilschrittes von Interesse ist. Da durch Steuerungen Prozesse nach einem bestimmten Muster beeinflusst werden sollen, ist eine genaue Kenntnis über die Prozesse genauso wichtig wie bei Regelkreisen. Daher finden die Analyseverfahren zur Bestimmung des Prozesses oder der Steuerstrecke, wie sie unter Kapitel 4.1.4 beschrieben werden, ebenfalls Anwendung.

4 Die Regelung

Man spricht von einer Regelung, wenn ein System eine Rückführung mit der Information über das Systemverhalten besitzt. Das heißt, die Reaktion eines Systems auf eine Stellgröße wird direkt überwacht und bewertet, in dem diese Reaktion mit einem Sollwert verglichen wird. Ausschlaggebend für die Struktur des Reglers und die Werte der Reglerparameter ist der zu regelnde Prozeß. Man kann die Strecken

nach verschiedenen Kriterien wie z.B. die Linearität, die Zeitvarianz, das statische und dynamische Übertragungsverhalten unterscheiden.

In der Literatur über die Grundlagen der Regelungstechnik wird in der Regel von linearen zeitinvarianten Systemen (siehe Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) ausgegangen, da nur diese Systeme mit relativ einfacher Mathematik händelbar sind.

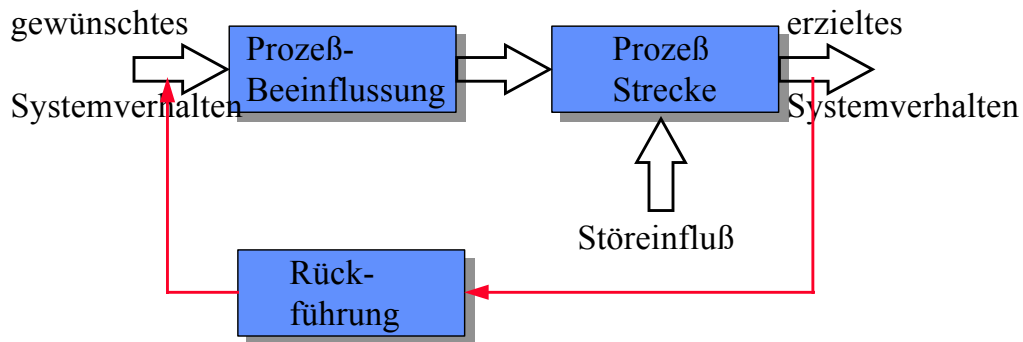


Abbildung 4.1: Regelung - Closed Loop

4.1 Grundlagen der Regelungstechnik

4.1.1 Die Linearität

Lineare Regelungsstrukturen können nur bei linearen oder um einen Arbeitspunkt linearisierbaren Strecken erfolgreich angewandt werden. Eine Strecke ist linear, wenn diese folgende zwei Bedingungen erfüllt.:

1. Überlagerungs- oder Superpositionsprinzip - Erzeugt eine Strecke mit einer Eingangsgröße u_1 eine Ausgangsgröße y_1 und eine Eingangsgröße u_2 eine Ausgangsgröße y_2 , so erzeugt die Summe der Eingangsgrößen u_1+u_2 am Ausgang die Summe der Ausgangsgrößen y_1+y_2 , und zwar für beliebige Eingangsgrößen.

$$\varphi(u_1 + u_2) = \varphi(u_1) + \varphi(u_2) = y_1 + y_2 \quad (4.1)$$

2. Verstärkungsprinzip - Erzeugt eine Strecke aus einer Eingangsgröße u eine Ausgangsgröße y , so erzeugt diese aus der um den Faktor k verstärkten Eingangsgröße u die um den Faktor k verstärkte Ausgangsgröße y .

$$\varphi(k \cdot u) = k \cdot \varphi(u) = k \cdot y \quad (4.2)$$

4.1.2 Die Zeitinvarianz

Zeitinvariant ist ein System dann, wenn die Streckenparameter keine zeitliche Abhängigkeit besitzen.

$$G_S \neq f(t) \quad (4.3)$$

Dies heißt, daß das Verhalten der Strecke G_S sich nicht in Abhängigkeit von der Zeit t verändert.

Bei zeitvarianten Systemen sind die Systemparameter der Strecke G_S von der Zeit abhängig und daher unterliegen diese einer Zeitfunktion.

$$G_S = f(t) \quad (4.4)$$

4.1.3 Der Grundregelkreis

Der Grundregelkreis besteht aus einem Regler mit dem Reglerverhalten G_r und der Strecke mit einem Übertragungsverhalten G_S . Die einzelnen Signale in einem Regelkreis werden als w - Sollwert, x - Istwert (die zu regelnde Größe), y - Stellgröße, z - Störgröße und e - Regelabweichung, die sich nach DIN 19226 $e=w-x$ berechnet. Bei einigen Universalreglern wird an Stelle der Regelabweichung e die Regeldifferenz $x_w=x-w$ genutzt.

In der Praxis besteht ein Regelkreis neben Regler und Prozeß, auch aus Steller,

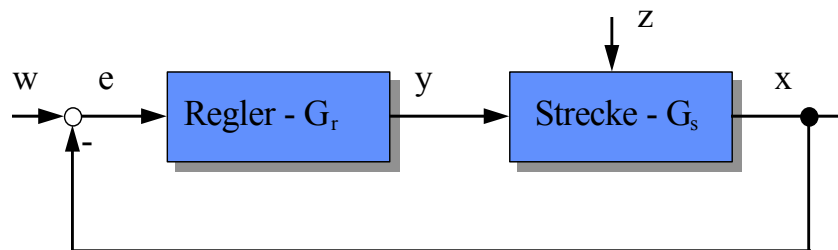


Abbildung 4.3: Struktur des Grundregelkreis

Stellglieder und Meßeinrichtung. Das Übertragungsverhalten dieser Regelkreisbestandteile hat ebenfalls einen Einfluß auf das gesamte Verhalten der Regelung.

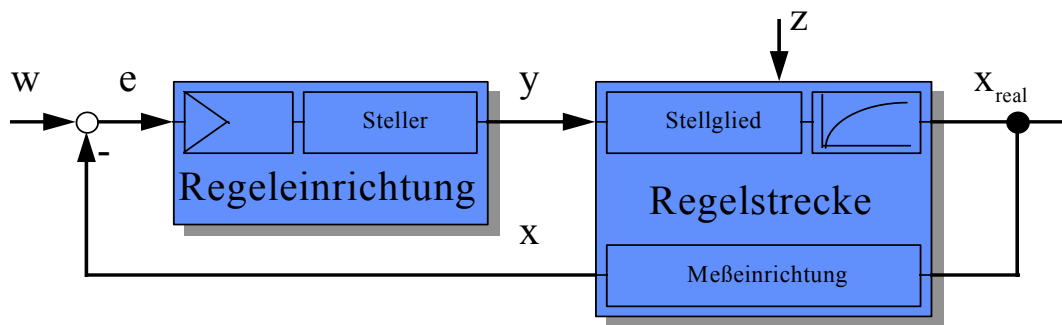


Abbildung 4.2: Regelkreisunterteilung

Aus der Richtung des Reglers betrachtet, verschmelzen der Regler und der Steller (z.B. Leistungselektronik, Motoransteuerung) zur Regeleinrichtung, so daß sich die Stellgröße y nach dem Steller ergibt. Der Istwert x existiert nach der Meßeinrichtung, was bedeutet, daß die Meßeinrichtung und das Stellglied (z.B. Ventil, Heizung) zusammen mit dem zu regelnden Prozeß die Regelstrecke ergeben (siehe Abbildung 4.2). Die einzelnen Bestandteile des Regelkreises lassen sich in der Übertragungsgleichung 3.8 zusammenfassen und wirken wie folgt.:

$$y = G_r e \quad (4.5)$$

$$e = w - x \quad (4.6)$$

$$x = G_S y + G_S^* z \quad (4.7)$$

$$x = \frac{G_S G_r}{1 + G_S G_r} w + \frac{G_S^*}{1 + G_S G_r} z = \frac{G_0}{1 + G_0} w + \frac{G_S^*}{1 + G_0} z = G_{0G} w + G_{0S} z \quad (4.8)$$

Die Übertragungsfunktion G_0 bezeichnet das Übertragungsverhalten des offenen Regelkreises und G_{0G} das Übertragungsverhalten des geschlossenen Regelkreises, das die Reaktion auf die Änderung des Sollwertes w beschreibt und daher auch Führungsverhalten genannt wird. Die Übertragungsfunktion G_{0S} bezeichnet das Übertragungsverhalten des geschlossenen Regelkreises auf eine Störgröße z und wird daher Störverhalten genannt. Aus der Gleichung 3.8 ist zu entnehmen, daß der Istwert x eines Regelkreises durch das Übertragungsverhalten der Regelstrecke und des Reglers beeinflußt wird. Anliegen einer Regelung ist es, so schnell wie möglich den Sollzustand im Prozeß herzustellen, das bedeutet, der Istwert x soll gleich dem Sollwert w sein und damit auch die Regelabweichung $e=0$.

Auch wenn nachfolgend immer von einer linearen, zeitinvarianten Regelstrecke ausgegangen wird, muß darauf hingewiesen werden, daß in der Realität eigentlich jeder Prozeß mehr oder weniger stark nichtlinear ist. Nun kann man sagen, dann ist ja die ganze Theorie sinnlos, wenn sie nicht anwendbar ist. Dies ist auch wiederum falsch, da normalerweise die Prozesse sich in einem bestimmten Bereich linear verhalten und somit um einen Arbeitspunkt linearisierbar sind, so daß die Theorien der linearen Regelungstechnik in den meisten Fällen anwendbar ist.

4.1.4 Die Regelstrecke

Bevor die verschiedenen Regelkreise vorgestellt werden, soll dieses Kapitel einen kurzen Überblick über die in der Praxis vorkommenden Regelstrecken geben. Wie in Kapitel 4 erwähnt ist die Kenntnis der Regelstrecke die Grundlage zum optimalen Einstellen der Reglerparameter. Da in der Praxis meist die lineare Regelungstechnik Anwendung findet, wird dieses Kapitel ebenfalls nur auf Regelstrecken eingehen, die ein lineares, zeitinvariantes Verhalten haben, oder die um einen Arbeitspunkt linearisiert werden können.

Regelstrecken können in Strecken mit und ohne Ausgleich unterschieden werden. Das Ausgangssignal einer Strecke mit Ausgleich wird sich als Reaktion auf einen Eingangssprung $u(t) = \mathcal{A}(t)$ nach einer endlichen Zeit auf einen festen Wert einstellen. Das Ausgangssignal einer Strecke ohne Ausgleich wird als Reaktion auf einen Eingangssprung ins Unendliche wandern. Einen weiteren wichtigen Einfluß auf die Wahl der Reglerstruktur und der Reglerparameter sind die Totzeit, die Streckenzeitkonstanten und die Systemordnung, die sich in der Anzahl der Streckenzeitkonstanten widerspiegelt (siehe Kapitel 4.3.3.1). Diese Streckenparameter können im einfachsten Fall aus einer Sprungantwort einer Regelstrecke $h(t)$ abgeleitet werden (siehe Abbildung 4.4)

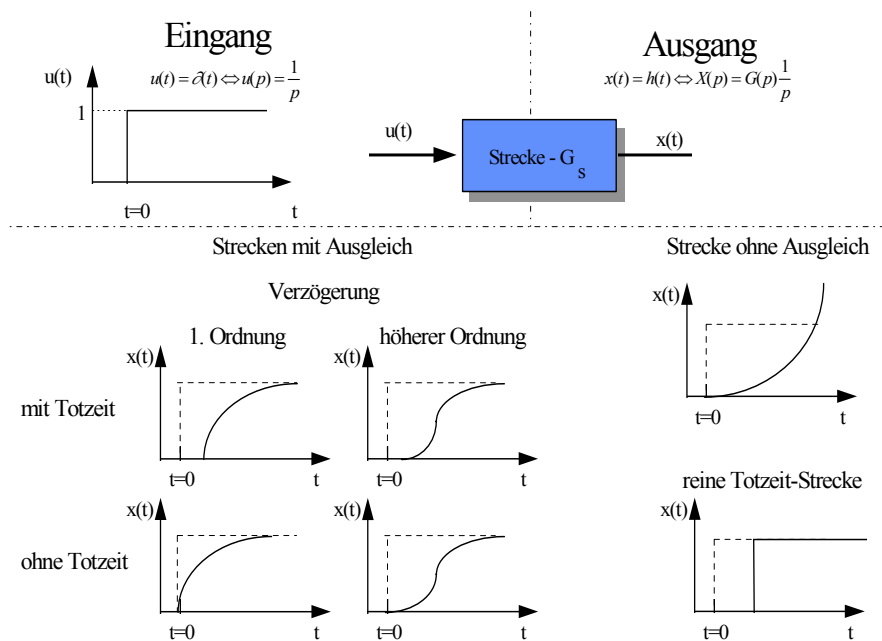


Abbildung 4.4: Beispiele von Regelstrecken

Da sich nur aus der Regelstrecke die Reglerstruktur und die Reglerparameter ableiten lassen, ist es notwendig, die Regelstrecken richtig zu analysieren. Ziel dieser Analyse ist es mehr Informationen über das Regelstreckenverhalten zu erhalten um die Reglerparameter so festzulegen, daß der geschlossene Regelkreis ein optimales Übertragungsverhalten hat und nicht instabil werden kann.

Das Ziel der Streckenanalyse ist es, das Verhalten der Regelstrecke in eine mathematische Form zu überführen, um zum einen das Regelverhalten (Bestimmung der Reglerstruktur und der Reglerparameter) und zum anderen in vielen Fällen auch das Störverhalten der Regelstrecke zu erkunden. Man unterscheidet die theoretische und die experimentelle Prozeßanalyse.

Bei der theoretischen Prozeßanalyse werden physikalische Gesetze angewandt, die eine Differentialgleichung oder ein Differenzialgleichungssystem ergeben, die das Systemverhalten beschreiben.

Bei der experimentellen Prozeßanalyse werden entsprechend Abbildung 4.4 aus einem Eingangs- und Ausgangssignal die Streckenparameter ermittelt. Zur Ermittlung der Streckenparameter mittels experimenteller Prozeßanalyse werden ebenfalls mehrere Verfahren unterschieden. Einige dieser Verfahren werden in Kapitel 4.3.3 ausführlich erläutert.

Zur mathematischen Berechnung der Reglerparameter entsprechend Kapitel 4.3.4.1 ist es notwendig, die Regelstrecke in eine mathematische Form zu überführen. Dazu hat sich die Transformation der Streckenfunktion in den Laplace-Bereich als die effektivste Vorgehensweise erwiesen. Die Laplace-Transformation kann man sich als eine Verlagerung einer Zeitfunktion in einen komplexen Frequenzbereich vorstellen, der aus einer realen und einer imaginären Richtung besteht (siehe Abbildung 4.17). Der Laplace-Operator wird in der Regel mit p oder s bezeichnet. Daher ergeben sich

für drei Übertragungsfunktionen von Regelstrecken folgende mathematischen Funktionen.:

Strecke mit Ausgleich 1. Ordnung

$$h(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{T_0}})\mathcal{A}(t) \Leftrightarrow G(p) = \frac{V}{1 + pT_0} \quad (4.9)$$

Strecke mit Totzeit

$$h(t) = V\mathcal{A}(t - T_{Tot}) \Leftrightarrow G(p) = Ve^{-pT_{Tot}} \quad (4.10)$$

Strecke ohne Ausgleich 1. Ordnung

$$h(t) = V\left(\frac{t}{T_0} - (1 - e^{-\frac{t}{T_0}})\right)\mathcal{A}(t) \Leftrightarrow G(p) = V\frac{1}{(1 + pT_0)p} \quad (4.11)$$

Diese Darstellung der Regelstrecken und Regler in der Regelungstechnik wird uns bei analytischen Berechnungsverfahren immer wieder begegnen. Weitere Transformationen zwischen Zeitbereich und Laplace-Bereich befinden sich im Anhang.

In der heutigen Zeit der Rechentechnik finden häufig auch analytische Verfahren wie die Regression Anwendung. Bei diesen Verfahren können beliebige Eingangssignalen zur Ermittlung des Ausgangssignales einer Regelstrecke genutzt werden, da aus den Daten im einfachsten Fall, mit Hilfe der linearen Regression (siehe Kapitel 4.3.3.2), ein Modell der Regelstrecke berechnet wird. Des weiteren werden immer häufiger auch iterative Schätzverfahren, wie bei der FUZZY-Logic oder der Modellbildung durch neuronale Netze eingesetzt. Da diese analytischen Verfahren einen gewissen Aufwand an Meß- und Rechentechnik erfordern, haben diese sich in der Praxis nur bei der Lösung sehr problematischer Regelungen durchgesetzt. Bei diesem Verfahren der Prozeßanalyse werden unstetige Signale verarbeitet und daraus zeitdiskrete Modelle berechnet, die nicht den Formen entsprechend den Gleichungen 3.9 bis 3.11 entsprechen (siehe Kapitel 4.3.3.2).

4.1.5 Der PID-Regler

Ein Standard-PID-Regler hat folgende Parameter.: K_p - Reglerverstärkung, T_n - Nachstellzeit, T_v - Vorhaltzeit. Die Einstellung dieser Parameter ist verantwortlich für die Güte der Regelung. Eine PID-Regler-Struktur kann entsprechend Abbildung 4.5 dargestellt werden.

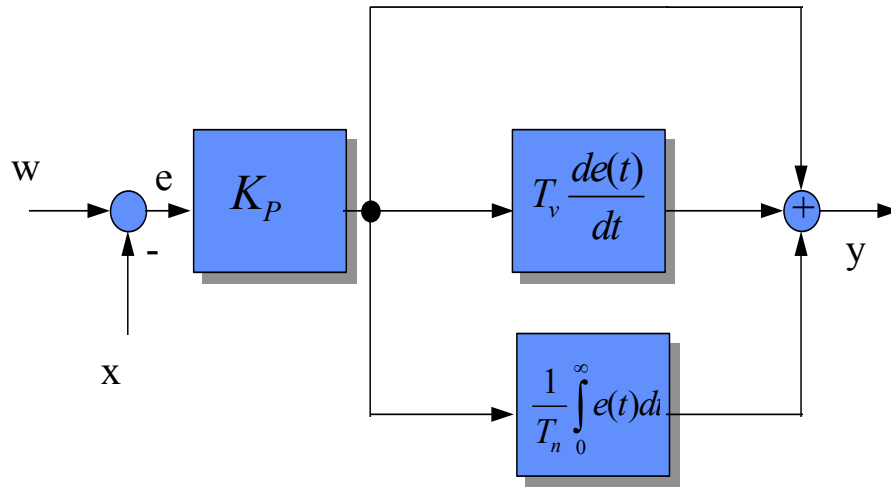


Abbildung 4.5: Struktur des Standard-PID-Reglers

Der PID Regler hat in der Laplace-Darstellung die Struktur:

$$G_r(p) = K_p + K_p T_v p + \frac{K_p}{T_n p} \quad (4.12)$$

und in der Differentialdarstellung:

$$g(t) = K_p e(t) + K_p T_v \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_n} \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (4.13)$$

Die einzelnen Reglerparameter haben folgenden Einfluß auf das Verhalten des Regelkreises.:

- Der Integralteil $\frac{K_p}{T_n} \int_0^{\infty} e(t) dt$ stellt sicher, daß die Regelabweichung bei Strecken mit Ausgleich verschwindet, das heißt $e \rightarrow 0$. Durch die Vergrößerung der Nachstellzeit T_n wird die Regelung träger, aber auch das Überschwingen kleiner.
- Der Differentialteil $K_p T_v \frac{de(t)}{dt}$ erkennt den Trend und versucht zeitig gegenzusteuern. Durch die Vorhaltezeit T_v wird die Regelung schnell gemacht und bei zu großem T_v kann die Regelung instabil werden.
- Der Proportionalteil $K_p e(t)$ macht ebenfalls die Regelung schnell und regelt besonders Störgrößen sehr gut aus. Bei zu großer Reglerverstärkung K_p kann ebenfalls die gesamte Regelung instabil werden.

4.2 Lineare Regelungsstrukturen

4.2.1 Der einfache Regelkreis

Der einfache Regelkreis besteht aus einer Strecke mit einem Regler entsprechend Abbildung 4.3. Der Regler kann als Regler mit einer P-, I-, PI-, PD- oder PID-Struktur ausgelegt werden (siehe Kapitel 4.1.5). Die Wahl der Reglerstruktur richtet sich nach dem Übertragungsverhalten der Regelstrecke (siehe Tabelle 4.1).

Regelstrecke	P-Regler	I-Regler	PI-Regler	PD-Regler	PID-Regler
reine Totzeit	--	+	++	--	--
mit Ausgleich + Totzeit + Verzögerung 1.Ordnung	--	langsam	+	--	++
mit Ausgleich + Totzeit + Verzögerung 2. Ordnung	--	langsam	+	--	++
mit Ausgleich + Verzögerung 1. Ordnung	+	langsam	++	-	+
mit Ausgleich + Verzögerung höherer Ordnung	-	+	+	--	++
ohne Ausgleich	+	instabil	-	++	++

Tabelle 4.1: Auswahl der PID-Regler-Struktur

Man kann zusammenfassend sagen, daß

1. der I-Regler bei allen Strecken mit Ausgleich das Stabilitätskriterium (siehe Kapitel 4.3.1) erfüllt.
2. Das der P- und D-Teil eines Reglers den Regelkreis schnell macht, aber wiederum zu Instabilität führen kann.
3. Der PI-Regler ist für alle Strecken mit Ausgleich der am häufigsten eingesetzte Regler, da er mit 2 Reglerparametern in der Regel ein ausreichendes Regelergebnisse liefert. Dieser Regler kann nur vom PID-Regler bei optimaler Einstellung der Reglerparameter in der Regelgüte (siehe Tabelle 4.1) übertroffen werden.

Abgeleitet aus dem einfachen Regelkreis haben sich in der Praxis weitere Regelungsstrukturen durchgesetzt. Zur besseren Ausregelung von meßbaren Störungen im Prozeß sind die Störgrößenaufschaltung (siehe Kapitel 4.2.2) und die Kaskadenschaltung (siehe Kapitel 4.2.3) entwickelt worden. Zur Verbesserung der Regelgüte bei Regelstrecken höherer Ordnung, die in Teilstrecken niedrigerer Ordnung zerlegt werden können, hat sich ebenfalls die Kaskadenregelung (siehe Kapitel 4.2.3) in der Praxis bewährt. Das Regelverhalten stark Totzeit behafteter Regelstrecken kann durch den Einsatz eines Reglers mit Beobachter, auch Prädiktor genannt, verbessert werden.

4.2.2 Störgrößenaufschaltung

Der Regler kann bei einfachen Regelkreisen erst korrigierend eingreifen, wenn die Störung (Störgröße) als Überlagerung des Istwertes am Eingang des Reglers anliegt. Ist die Störung direkt oder indirekt meßbar, liegt es nahe, diese auch zur Korrektur

heranzuziehen. Ein solches regelungstechnisches Verfahren ist die Störgrößenaufschaltung, bei der die Störgröße über eine Übertragungsfunktion G_{st} auf den Eingang der Regelstrecke geleitet wird. In der Abbildung 4.6 gehen wir von einer 3-geteilten Strecke $G_S=G_{S1}+G_{S2}+G_{S3}$ aus, um das Verhalten der Störgrößenaufschaltung bei verschiedenen Angriffspunkten der Störgröße zu untersuchen.

Für den geschlossenen Regelkreis einer Störgrößenaufschaltung nach Struktur 1 der Abbildung 4.6 ergibt sich, in Anlehnung an die Ausführung in Kapitel 4.1.3 folgende Übertragungsfunktion.:

$$\begin{aligned}
 x &= G_{S1} G_{S2} G_{S3} (w - x) + G_{S2} G_{S3} z1 - G_{St} G_{S1} G_{S2} G_{S3} z1 \\
 x(1 + G_{S1} G_{S2} G_{S3}) &= G_{S1} G_{S2} G_{S3} w + (G_{S2} G_{S3} - G_{St} G_{S1} G_{S2} G_{S3}) z1 \quad (4.14) \\
 x &= \frac{G_{S1} G_{S2} G_{S3}}{1 + G_{S1} G_{S2} G_{S3}} w + \frac{G_{S2} G_{S3} - G_{St} G_{S1} G_{S2} G_{S3}}{1 + G_{S1} G_{S2} G_{S3}} z1
 \end{aligned}$$

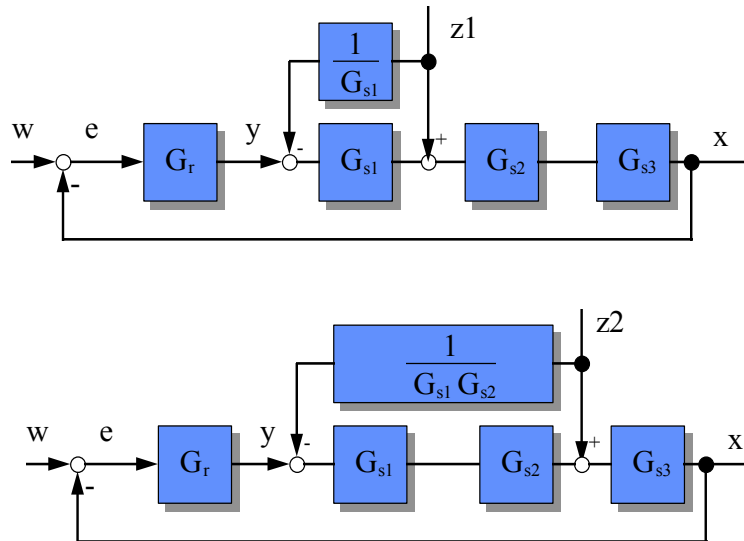


Abbildung 4.6: Regelkreis mit 2 verschiedenen Störgrößen

Das Ziel dieser Regelungsstruktur besteht darin, den Einfluß der Störgröße zu beseitigen. Dies wird erreicht, in dem die Übertragungsfunktion G_{st} so gewählt wird, daß das Störverhalten des Regelkreises $\frac{G_{S2} G_{S3} - G_{St} G_{S1} G_{S2} G_{S3}}{1 + G_{S1} G_{S2} G_{S3}}$ aus Gleichung 3.14 gleich Null wird.

$$\begin{aligned}
 G_{S2} G_{S3} - G_{St} G_{S1} G_{S2} G_{S3} &= 0 \\
 G_{S2} G_{S3} &= G_{St} G_{S1} G_{S2} G_{S3} \quad (4.15) \\
 \frac{G_{S2} G_{S3}}{G_{S1} G_{S2} G_{S3}} &= \frac{1}{G_{S1}} = G_{St}
 \end{aligned}$$

Wie der Gleichung 3.15 entnommen werden kann, sollte die Übertragungsfunktion der Störgröße G_{st} gleich dem Reziproken der von der Störgröße nicht durchlaufenen

Teilstrecke des Gesamtprozesses sein. Daher sollte das Übertragungsverhalten der Teilstrecken, die nicht von der Störgröße durchlaufen wird, genau bekannt sein. Dadurch wäre theoretisch eine optimale Eliminierung des Einfluß der Störgröße möglich. In Abbildung 4.6 sind für beide Strukturen an Stelle der Übertragungsfunktion G_{st} die Lösungen der jeweiligen Übertragungsgleichung entsprechend Gleichung 3.14 und 3.15 eingetragen.

In der Praxis wird aus Gründen der Vereinfachung, die Störgröße über ein P-Glied oder über ein P-T1-Glied entsprechend Gleichung 3.16 auf den Ausgang des Reglers geschaltet.

$$G_{st} = \frac{K_{st}p}{1 + pT_{st}} \Leftrightarrow g_{st}(t) = \frac{K_{st}}{T_{st}} e^{-\frac{t}{T_{st}}} \rightarrow h_{st}(t) = K_{st} e^{-\frac{t}{T_{st}}} \quad (4.16)$$

Wobei die Parameter K_{st} und T_{st} der Streckenverstärkung bzw. der Summenzeitkonstanten des Prozesses entsprechen.

Durch die Vereinfachung reagiert die Störgrößenaufschaltung nur auf Änderungen der Störung. Dabei werden konstante Störungen sehr gut durch den einfachen Regelkreis ausgeregelt. Diese Erweiterung des einfachen Regelkreises führt zu einer Verbesserung der Dynamik des Regelkreises.

Zusammengefaßt kann man sagen, daß die Störgrößenaufschaltung nur bei Störungen am Anfang der Regelstrecke sinnvoll ist, da der Zeitversatz zwischen Auftreten der Störung und Registrierung und daher Reaktion durch den Regler bei Störungen am Ende der Regelstrecke gering ist. Nach Gleichung 3.14 hat die Störgrößenaufschaltung G_{st} keinen Einfluß auf das Führungsübertragungsverhalten G_0 des Regelkreises und daher auch nicht auf die Stabilität des Regelkreises.

4.2.3 Kaskadenregelung

Bei folgenden Regelstrecken zeichnet sich die Kaskadenregelung als mehrschleifiger Regelkreis durch ein besseres Regelverhalten gegenüber dem einfachen Regelkreis aus.:

1. komplizierten Regelstrecken - Regelstrecken höherer Ordnung;
2. nichtlinearen Regelstrecken, wobei der Folgeregler die Nichtlinearität der Regelstrecke versucht auszugleichen;
3. Strecken mit nichtmeßbaren Störungen;

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Kaskadenregelung ist die Zerlegbarkeit des zu regelnden Prozesses in mehrere Teilstrecken. Die Kaskadenregelung besteht daher aus einem Führungsregelkreis mit dem Führungsregler G_{rFu} der mit mehreren Folgeregelkreisen mit Folgereglern G_{rFo} unterlagert sein kann. Ein einfaches Beispiel für eine Kaskadenregelung ist die Durchflußregelung mit Ventil und Stellungsregler. Dabei ist der Stellungsregelkreis mit Ventil, der die Ventilstellung überwacht, der Folgeregelkreis und die Durchflußregelung mit der Messung des Durchflusses und der Berechnung der Stellgröße für das Ventil der Führungsregelkreis (siehe Abbildung 6.1).

Die Struktur einer Kaskadenregelung mit einem Führungsregler und einem Folgeregler ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

Für die Übertragungsgleichung einer Kaskadenregelung ohne Beachtung der

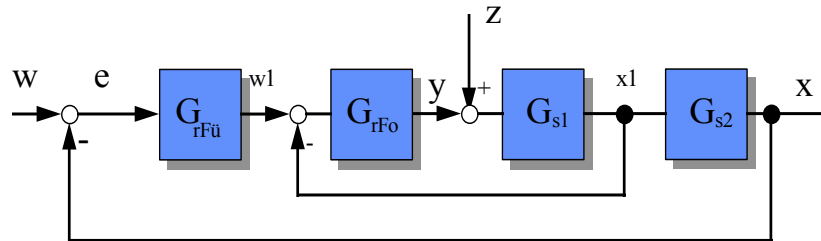


Abbildung 4.7: Die Kaskadenregelung

Störgröße z , da diese in diesem Fall nicht meßbar ist, ergeben sich entsprechend Abbildung 4.7 für die Übertragungsfunktionen die Gleichungen 3.17, 3.18.

Folgeregelkreis:

$$x1 = \frac{G_{rFo} G_{S1}}{1 + G_{rFo} G_{S1}} w1 \quad (4.17)$$

$$G_{Folge} = \frac{G_{rFo} G_{S1}}{1 + G_{rFo} G_{S1}}$$

Führungsregelkreis:

$$x = \frac{G_{rFü} G_{Folge} G_{S2}}{1 + G_{rFü} G_{Folge} G_{S2}} w \quad (4.18)$$

Es ist zu erkennen, daß die Kaskadenregelung aus zwei Regelungen besteht, wobei der Folgeregelkreis den Führungsregelkreis beeinflusst, da dieser Bestandteil der Regelstrecke des Führungsreglers ist. Daher wird die Optimierung einer Kaskadenregelung immer schrittweise von *Innen* nach *Außen* durchgeführt. Das heißt, zuerst wird der Folgeregelkreis optimiert und anschließend der Führungsregelkreis.

In der Praxis wird für den Folgeregler G_{rFo} ein schneller Regler ohne I-Anteil eingesetzt, da der Führungsregler $G_{rFü}$ für das Beseitigen der Regelabweichung e im gesamten Regelkreis zuständig ist.

4.2.4 Regler mit Beobachter (Prädiktor)

Eine weitere Struktur zur Verbesserung der Regelgüte ist der Regler mit Beobachter. Diese Regler finden Anwendung bei stark Totzeit belasteten Regelstrecken. Theoretisch haben alle Regelstrecken eine Totzeit, da der Sensor, der das Prozeßsignal in ein für den Regler verständliches Einheitssignal (z.B. 4...20 mA) wandelt, schon eine gewisse Totzeit besitzt (z.B. Temperaturmessung). Auch der Abstand zwischen Stellglied und Sensor kann z.B. bei der Durchflußmessung langsam strömender Medien zu Totzeiten führen. Vor allem chemische oder biologische Prozesse sind stark Totzeit behaftet. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die

Neutralisation (siehe Kapitel 7.1), bei der noch zusätzlich eine starke Nichtlinearität zu regelungstechnischen Problemen führt.

Wie bei allen Regelungen ist auch bei der Regelung mit Beobachter die genaue Kenntnis über die Regelstrecke das A und O. In der Abbildung 4.8 ist die Struktur eines Reglers mit Beobachter schematisch dargestellt. Verfahren zur Bestimmung von Streckenmodellen sind in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

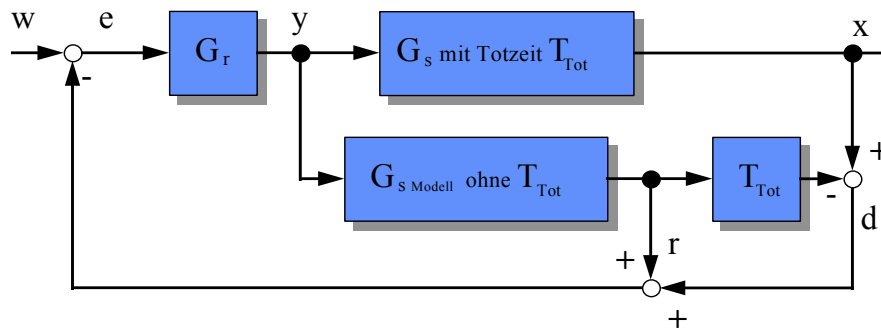


Abbildung 4.8: Regler mit Beobachter (Prädiktor)

Beim Betrachten der Regelkreisstruktur entsprechend Abbildung 4.8 wird deutlich, daß bei der Regelung mit Prädiktor eine komplette Streckenanalyse theoretisch notwendig ist, um eine optimale Regelung zu realisieren. Wie funktioniert diese Regelung und wodurch werden die Verbesserungen bei der Regelung erzielt?

Bei Nutzung der einfachen Regelungsstruktur nach Abschnitt 4.1.3, könnte die Regelstrecke mit Totzeit nur mit einem sehr langsamen I-Regler stabil geregelt werden. Warum?

Der Regler gibt auf Grund der aktuellen Regelabweichung e ein Stellsignal y über das Stellgerät solange an die Regelstrecke weiter, bis sich die Regelabweichung e durch die Änderung des Istwertes x am Eingang des Reglers ändert. Durch die Totzeit der Strecke, erhält der Regler erst nach Ablauf dieser Totzeit die Reaktion des Prozesses auf sein Stellsignal als Regelabweichung e . Dieses Verhalten kann sehr schnell zu einem instabilen Zustand der Regelung führen. Daher wird in der Praxis meist ein I-Regler eingesetzt, wodurch die Regelung sehr langsam wird (siehe Kapitel 4.1.5).

Setzt man einen Regelkreis mit Prädiktor ein, so kann an Stelle des I-Reglers auch ein PI-Regler mit einem großen Verstärkungsfaktor K_P eingesetzt werden, was wiederum zu einer schnelleren Regelung führt. Warum kann der Verstärkungsfaktor bei Einsatz eines Prädiktors vergrößert werden?

Durch den Prädiktor wird dem Regler eine Strecke ohne Totzeit "vorgegaukelt". Dies geschieht wie folgt (siehe auch Abbildung 4.8):

- Die Hilfsgröße r reagiert sofort auf die Stellgröße y , da diese aus der Strecke ohne Totzeit T_{Tot} berechnet wird.
- Der Fehler d berechnet sich aus dem wahren Istwert x minus dem berechneten Wert des Istwertes. In diesem Fehler werden der Modellfehler und der Einfluß durch Störungen berücksichtigt.

- Angenommen der Fehler d ist gleich Null, dann ist für den Regler die Hilfsgröße r der Istwert.
- Diese Hilfsgröße r zeigt den Wert des Istwertes x nach der Totzeit T_{tot} , was bedeutet $r(t)=x(t+T_{\text{tot}})$. Daher wird der Regler sozusagen von der Hilfsgröße r gesteuert.

An Hand der Übertragungsgleichungen 3.19 des Prädiktor-Regelkreises kann unter Annahme $G_{S \text{ Modell}}=G_S$ ebenfalls der Grund für die Verbesserung des Regelverhalten bei Nutzung des Prädiktors veranschaulicht werden ($e^{-pT_{\text{tot}}}$ ist die Totzeit-Verschiebung in der Laplace-Ebene).

$$\begin{aligned}
 y &= G_r e \\
 r &= G_S y = G_r G_S e \\
 d &= x - r e^{-pT_{\text{tot}}} = x - G_r G_S e^{-pT_{\text{tot}}} e \quad (4.19) \\
 e &= w - (r + d) = w - G_r G_S e - x + G_r G_S e^{-pT_{\text{tot}}} e = \frac{w - x}{1 + G_r G_S (1 - e^{-pT_{\text{tot}}})} \\
 x &= G_r G_S e^{-pT_{\text{tot}}} e = \frac{G_r G_S}{1 + G_r G_S} w e^{-pT_{\text{tot}}}
 \end{aligned}$$

Als Vergleich wird in die Gleichung 3.8 unter Annahme $z=0$, für die Streckenübertragungsfunktion G_S die Streckenübertragungsfunktion mit einer Totzeit T_{tot} eingesetzt, wodurch sich die Gleichung 3.20 ergibt.

$$x = \frac{G_r G_S e^{-pT_{\text{tot}}}}{1 + G_r G_S e^{-pT_{\text{tot}}}} w \quad (4.20)$$

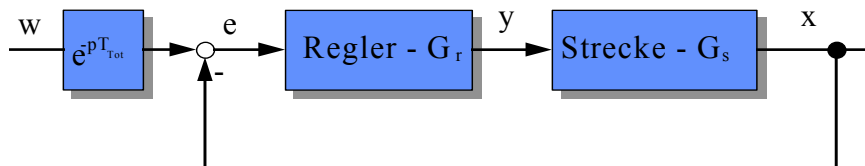


Abbildung 4.9: Darstellung der Gleichung 3.19

Rein mathematisch betrachtet besteht der Unterschied zwischen der Regelung mit und ohne Beobachter darin, daß im Führungsverhalten des Regelkreises mit Prädiktor der Einfluß der Totzeit T_{tot} aus der Übertragungsfunktion in den Sollwert verschoben wird und dadurch kein Einfluß der Totzeit mehr in der Übertragungsfunktion vorhanden ist (siehe Abbildung 4.9).

In der Praxis werden bei Universalreglern die Totzeit-freien Modelle der Strecke $G_{S \text{ Modell}}$ auf Grund der Vereinfachung der Reglereinstellung durch ein P- oder T_1 -Glied angenähert.

4.2.5 Overrideregelung

Eine Overrideregelung ist eine Begrenzungsregelung, bei der eine Regelgröße y unter Beachtung einer oder mehrerer Meßgrößen, die im Grenzwertfall zur Regelgröße werden, geregelt wird. Beispiele dafür sind die

- Durchflußregelung mit Drucküberwachung,
- Druckregelung mit Durchflußbegrenzung oder
- die Temperaturregelung mit Beachtung der Wärmeleistung.

Diese Aufgabenstellung kann durch eine Extremwertauswahl (MIN oder MAX) der Stellgrößen der einzelnen getrennten Regelungen realisiert werden (siehe Abbildung 4.10 rechts). Bei dieser Regelungsstruktur würde die nicht aktive Regelung ihre Stellgröße in den Endzustand integrieren (siehe Abbildung 4.10 rechts). Daher ist die Reaktionszeit größer und das dynamische Regelverhalten schlechter als bei der

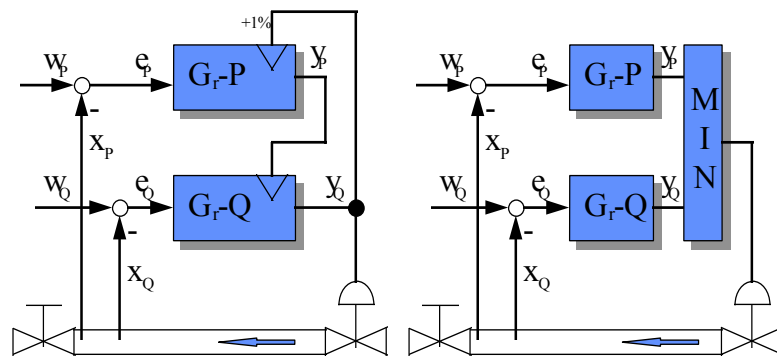


Abbildung 4.10: Begrenzungsregelung

Overrideregelung. Bei der Overrideregelung begrenzen sich die Regelkreise gegenseitig (siehe Abbildung 4.10 links). Dadurch wird neben der Verbesserung des dynamischen Verhaltens des Regelkreises auch ein stoßfreies Umschalten zwischen den einzelnen Regelkreisen realisiert. Dies geschieht durch stoppen und automatisches Nachführen des I-Teils bei Erreichen der Stellgrenzen.

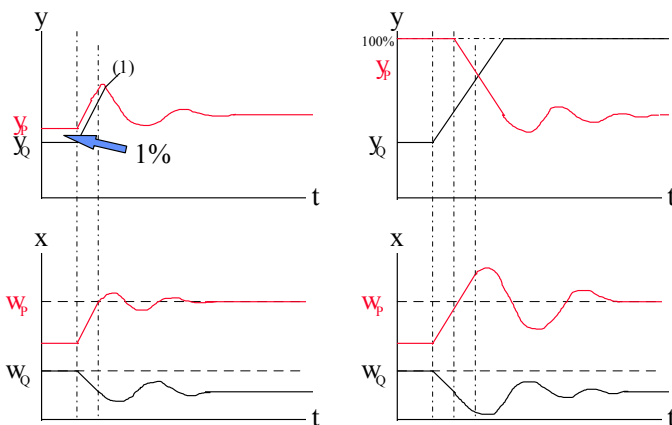


Abbildung 4.11: Übertragungsverhalten der 'Begrenzungsregelung

Wie kann man sich die Wirkungsweise dieser Regelungsstruktur vorstellen? Zum besseren Verständnis zeigt die Abbildung 4.11 die Diagramme mit den Verläufen von y_p , y_Q , x_p , x_Q , w_p und w_Q für die Prozeßgröße Druck (p), die den Durchfluß (Q) entsprechend
Abbildung 4.10

begrenzt. Es ist zu erkennen, daß durch die Rückführung der Stellgröße y_Q auf den Begrenzungsregler die maximale Differenz zwischen y_P und y_Q 1% beträgt. Daher kann der Begrenzungsregler schneller die Regelung übernehmen als bei der Struktur entsprechend Abbildung 4.10 rechts. Im Diagramm der Abbildung 4.11 ist folgender Zustand dargestellt:

Auf Grund einer Verstopfung der Rohrleitung verringert sich der Durchfluß. Der Durchflußregler versucht durch Öffnen des Regelventils dem entgegen zu wirken. Dies führt zu einer Erhöhung des Druckes in der Rohrleitung und daher sinkt die Regelabweichung e_p am Druckregler. Die Verkleinerung der Regelabweichung e_p führt wiederum zum Absinken der berechneten Stellgröße y_p . Ist die berechnete Stellgröße y_p so weit gesunken, daß der Grenzwert des Druckreglers ($y_Q + 1\%(y_Q)$) unterschritten wird, dann ist der Grenzwert des Durchflußreglers gleich der Stellgröße y_p (1). Dies hat zur Folge, daß die Stellgröße y_p auch kleiner ist als die berechnete Stellgröße des Durchflußreglers y_Q . Dadurch ist die Stellgröße des Durchflußreglers y_Q gleich dem Grenzwert und damit der Stellgröße y_p . Damit hat der Druckregler die Regelung des Prozesses übernommen.

Diese Regelungsstruktur findet Einsatz bei Regelungsaufgaben, bei denen sich zwei oder mehr physikalische Größen in einem Prozeß gegenseitig beeinflussen und dadurch zu kritischen Zuständen im Prozeß führen können.

4.2.6 Verhältnisregelung

Die Verhältnisregelung dient zur Mischung von zwei oder mehreren Medien nach einem bestimmten Verhältnis. Der Sollwert des Verhältnisreglers ist das Mischungsverhältnis, welches fest vorgegeben sein kann, entsprechend Abbildung 4.12, oder von einem Führungsregler vorgegeben wird, wie bei der Verbrennungsregelung mit Analysenkorrektur nach Abbildung 4.13.

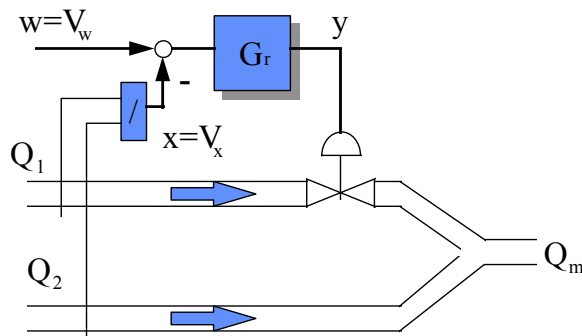


Abbildung 4.12: Verhältnisregelung

Bei der in Abbildung 4.12 dargestellten Regelung wird das Verhältnis zwischen den beiden Durchflußmengen Q_1 und Q_2 durch Nachführen der Durchflußmenge Q_1 entsprechend dem Verhältnis V_w geregelt.

Ein Sonderfall der Verhältnisregelung ist die Verbrennungsregelung mit Analysenkorrektur. Bei dieser Regelung wird der

Verhältnissollwert durch den Restsauerstoff- oder CO-Gehalt im Abgas vorgegeben. Dadurch wird die reine Verhältnisregelung mit einer Kaskadenregelung kombiniert.

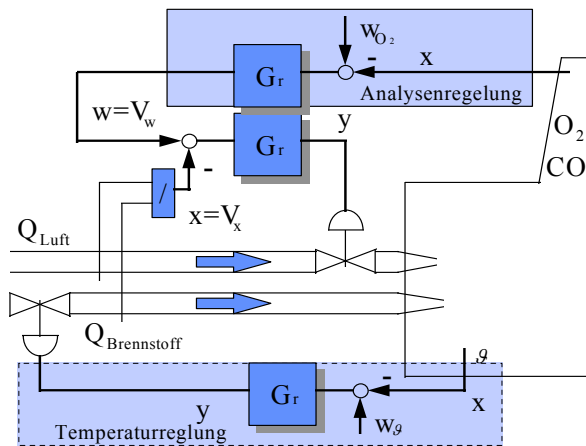


Abbildung 4.13: Analysenkorigierte Verhältnissregelung

Die in Abbildung 4.13 dargestellte Verhältnissregelung mit Analysenkorrektur hat folgende Wirkungsweise. Die Temperatur im Brenner wird über den Temperaturregler geregelt. Die Stellgröße der Temperaturregelung ist die Brennstoffmenge $Q_{\text{Brennstoff}}$. Der Analysenregler (Führungsregler), dessen Istwert x der O_2 - oder CO -Gehalt im Abgas ist, gibt dem eigentlichen Verhältnissregler (Folgeregler) das Verhältnis von Brennstoff und Luft als

Sollwert V_w vor. Der Verhältnissregler regelt den Luftstrom so, daß die O_2 - oder CO -Werte im Abgas den gewünschten Sollwerten, die auch vom Gesetzgeber vorgeschriebene Normwerte sein können, entsprechen. Dadurch kann eine optimale Verbrennung realisiert werden, bei der die Einflüsse wie unterschiedlicher Sauerstoffgehalt in der Luft oder unterschiedlicher Heizwert des Brennstoffes berücksichtigt werden.

4.3 Einstellkriterien

In diesem Kapitel werden einige wichtige Kriterien für einen Regelkreisentwurf erläutert und anschließend einige theoretische und in der Praxis häufig angewandte Einstellverfahren vorgestellt.

4.3.1 Die Stabilität

Die entscheidende Bedingung für eine Regelung ist die Erfüllung der Stabilität. Dies bedeutet, daß ein Prozeß sich immer auf einen festen Zustand einstellen muß. Da häufig in der Regelungstechnik zur Definition der Strecken die Auswertung der Streckenantwort auf einen Einheitssprung genutzt wird, liegt es nahe, auch für die Beschreibung der Stabilität den Einheitssprung $\delta(t)$ als Eingangssignal zu nutzen und die Streckenantwort $h(t)$ auszuwerten (siehe Abbildung 4.4).

Das bedeutet, eine Regelung ist stabil, wenn die Sprungantwort $h(t)$ für $t \rightarrow \infty$ einem endlichen Wert zustrebt. Dies ist in Gleichung 3.21 als mathematische Gleichung im Zeit- und Laplace-Bereich dargestellt.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} g(t)\delta(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} H(p) = \lim_{p \rightarrow 0} pH(p) = \lim_{p \rightarrow 0} G(p) = G(0) = V \quad (4.21)$$

In Kapitel 4.1.4 sind einige Größen der Gleichung 3.21 kurz erläutert. In Abbildung 4.14 sind zwei Formen der Instabilität darstellt.

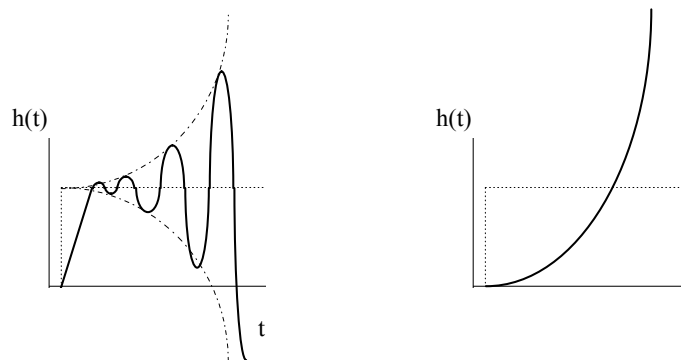


Abbildung 4.14: Die Instabilität

4.3.2 Die Regelgüte

Eine weitere Bedingung für eine Regelung ist die Regelgüte, die durch ein Gütekriterium ausgedrückt wird. Es gibt in der Praxis verschiedene Gütekriterien, nach denen eine Regelung bewertet werden kann.

Ein Gütekriterium besteht aus einer Menge von Teilkriterien, wie sie in Gleichung 3.22 zusammengefaßt sind. Diese lassen sich am Besten an der Auswertung der Sprungantwort $h(t)$ darstellen und erklären.

Die Sprungantwort $h(t)$ kann in der Zeitebene durch die Größen Überschwingweite Δh , bleibende Regelabweichung e_B , Überschwingzeit T_m , Eigenfrequenz des gedämpften Systems ω_e , Abklingkonstante δ_e , Dämpfung D und Eigenfrequenz des ungedämpften Systems ω_0 charakterisiert werden (siehe Abbildung 4.15).

Die einzelnen Teilkriterien geben entsprechend Abbildung 4.15 Aufschluß über das Verhalten der Regelung als Reaktion auf einen Einheitssprung $\delta(t)$ und stehen untereinander entsprechend Gleichungen 3.23 in mathematischen Beziehungen.

Zur Vereinfachung kann der Reglerentwurf, bei dem das Gütekriterium entsprechend Gleichung 3.23 bestimmte Grenzen einhalten soll, mit Hilfe verschiedener

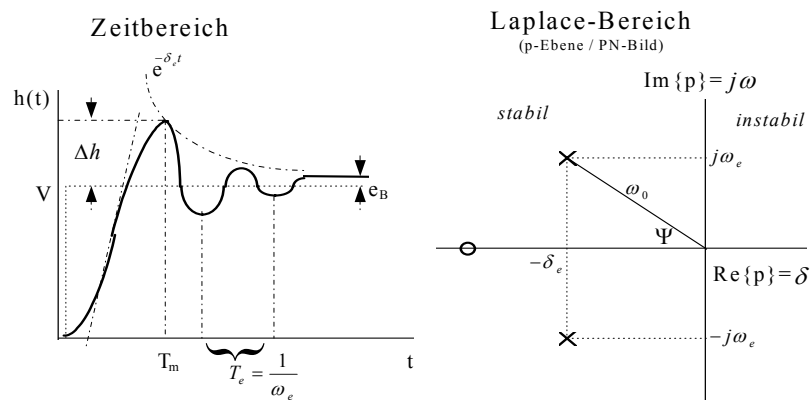


Abbildung 4.15: Charakteristika der Sprungantwort

Darstellungsformen, wie dem Bodediagramm, dem Nyquistdiagramm oder dem PN-Bild (Pole/Nullstellen), wie in Abbildung 4.15 dargestellt, durchgeführt werden. In das PN-Bild, welches sich in der Laplace-Ebene (siehe Kapitel 4.1.3) befindet, werden die Polstellen und Nullstellen einer Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises G_0 (siehe Gleichung 3.22) eingetragen. Die Polstellen und Nullstellen verschieben sich in der dargestellten Ebene im geschlossenen Regelkreis nach festgelegten Regeln in Abhängigkeit der Anzahl und Lage der Pol- und Nullstellen sowie der Reglerparameter.

$$G_0(p) = G_s G_r = \frac{N_0(p)}{P_0(p)} = V_0 \frac{\prod_i (n_i + p)}{\prod_j (p_j + p)} \quad (4.22)$$

Im PN-Bild lassen sich die Reglerparameter entsprechend der festgelegten Gütekriterien einfach bestimmen, da nur die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises notwendig ist. Es können die Reglerparameter sicher so festgelegt werden, daß der geschlossene Regelkreis nicht instabil wird. Wie mit einem PN-Bild oder auch Wurzel-Ortskurve (WOK) genannt, gearbeitet wird, ist in Kapitel 4.3.4.1 beschrieben.

$$\begin{aligned} \delta_e &= \frac{D}{T_0} \\ \omega_e &= \frac{1}{T_0} \sqrt{1 - D^2} \\ \omega_0^2 &= \omega_e^2 + \delta_e^2 \\ D = \cos \Psi &= \frac{\delta_e}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{-\pi}{\ln \Delta h}\right)^2}} \\ T_m &= \frac{\pi}{\omega_e} = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - D^2}} \\ \Delta h &= e^{-\pi \frac{\delta_e}{\omega_e}} \\ e_B &= \lim_{p \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G_0} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Ein weiteres Gütekriterium, welches bei der Reglerparameterbestimmung und der Streckenanalyse (siehe Kapitel 4.1.4) durch analytische Verfahren angewandt wird, ist für den geschlossenen Regelkreis das quadratische Gütekriterium Δ_2 nach Gleichung 3.24. In ähnlicher Form wird dieses Gütekriterium nach Gleichung 3.25 für die experimentelle Prozeßanalyse zur Bestimmung einer Regelstrecke genutzt (x_j - Ausgangssignal der realen Strecke; \bar{x}_j - Ausgangssignal des Modells der Strecke).

$$\Delta_2 = \text{MIN} \left(\sum_i e_i^2 \right) = \text{MIN} \int e(t)^2 dt = \text{MIN} \left(\sum_i (w_i - x_i)^2 \right) \quad (4.24)$$

$$\Delta_2 = \text{MIN}(\sum_i e_i^2) = \text{MIN}(\sum_i (x_j - \bar{x}_i)^2) \quad (4.25)$$

Im Kapitel 4.3.3 wird kurz auf das Verfahren der linearen Regression eingegangen, welches das beschriebene quadratische Gütekriterium Δ_2 nach Gleichung 3.25 zur Bestimmung eines optimalen Modells einer Regelstrecke nutzt. Dieses und weitere Verfahren sind in fertigen Software-Programmen, wie der Mathematiksoftware MATLAB verfügbar. Voraussetzung zur Nutzung dieser Modellbildungsverfahren ist das Vorhandensein von Eingangs- und Ausgangssignalen der Regelstrecke, was in vielen Fällen das Hauptproblem darstellt.

Für bestimmte Regelungsaufgaben, wie z.B. Stellgrößenüberwachung (Energiebedarf) haben sich weitere Gütekriterien in der Praxis bewährt. Diese können dem Anhang entnommen werden.

4.3.3 Die experimentelle Prozeßanalyse zur Streckenmodellbildung

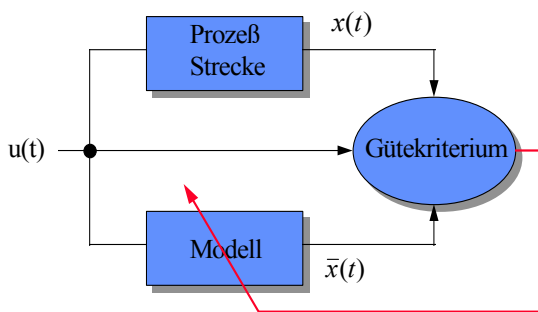


Abbildung 4.16: Die Modellbildung

die Nutzung des Bodediagramms sind z.B. in [10] erläutert.

Mit Hilfe der Verfahren der experimentellen Prozeßanalyse wird versucht, ein Modell von einem Prozeß oder einer Regelstrecke zu bestimmen, für die das Gütekriterium nach Gleichung 3.25 ein absolutes Minimum besitzt. Die ermittelten Streckenmodelle dienen zur Berechnung der Reglerparameter nach verschiedenen Verfahren. Eines dieser Verfahren ist in Kapitel 4.3.4.1 beschrieben. Weitere Verfahren, wie

4.3.3.1 Graphische Verfahren

Dieses Kapitel wird nur auf die Verfahren der experimentellen Prozeßanalyse eingehen, bei denen die Reaktion einer Strecke auf einen Eingangssprung $\delta(t)$, siehe Abbildung 4.4 oder einen Eingangsimpuls $\zeta(t)$ genutzt wird.

Bei diesen Verfahren werden aus den Ausgangssignalen einer Regelstrecke die Parameter eines Modells dieser Regelstrecke durch Nutzung experimentell ermittelter Rechenvorschriften bestimmt. Die Gütekriterien sind in den Rechenvorschriften enthalten, da zur Festlegung dieser Algorithmen der Beweis erbracht werden mußte, daß die entstehenden Modelle hinreichend genau die Prozesse abbilden. Zur Überprüfung der Modellstruktur kann entsprechend Abbildung 4.16 ein Ausgangssignal des Modells $\bar{x}(t)$ berechnet werden und der Fehler Δ_2 entsprechend Gleichung 3.25 bestimmt werden.

Durch die Vielzahl der strukturell unterschiedlichen Prozesse müssen verschiedene Modellstrukturen unterschieden werden, denen bestimmte Modellbildungsverfahren zuzuordnen sind. Im Anhang befinden sich die Bildungsvorschriften der in Tabelle 4.2 genannten Verfahren.:

Verfahren	Struktur der Strecken	Modellansatz	Eingangssignal
nach Strejc	mit Ausgleich - 2 Zeitkonstanten mit Ausgleich - n gleiche Zeitkonstanten	$G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{(1+pT_1)(1+pT_2)}$ $G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{(1+pT_0)^n}$	Eingangssprung $\delta(t)$
nach Radtke	mit Ausgleich - gestaffelte Zeitkonstanten	$G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{\prod_{j=1}^n (1+p\frac{T_0}{j})}$	Eingangssprung $\delta(t)$
nach Sponer	mit Ausgleich - n gleiche Zeitkonstanten	$G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{(1+pT_0)^n}$	Eingangssprung $\delta(t)$
Impuls (1)	mit Ausgleich - n gleiche Zeitkonstanten	$G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{(1+pT_0)^n}$	Eingangsimpuls $\zeta(t)$
Impuls (2)	mit Ausgleich - gestaffelte Zeitkonstanten und reale Impulsbreite ΔT	$G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{\prod_{j=1}^n (1+p\frac{T_0}{j})}$	Eingangsimpuls $\zeta(t)$
I-T _n -Glieder	ohne Ausgleich - n gleiche Zeitkonstanten ohne Ausgleich - gestaffelte Zeitkonstanten	$G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{p(1+pT_0)^n}$ $G(p) = \frac{Ve^{-pT_{Tot}}}{p\prod_{j=1}^n (1+p\frac{T_0}{j})}$	Eingangssprung $\delta(t)$

Tabelle 4.2: Streckenanalyseverfahren

Die Modellansätze in Tabelle 4.2 zeigen Verfahren, mit denen sechs verschiedene Modellstrukturen von Prozessen abgeleitet werden können. Da diese Prozeßmodelle nur aus Streckenantworten von Eingangssprüngen oder Eingangsimpulsen abgeleitet werden können, ergeben sich gewisse Grenzen bei der Anwendbarkeit bei bestimmten realen Prozessen. Ein anderer Weg bei der Modellbildung realer linearer Prozesse und Signale ist die lineare Regression, wie sie in Kapitel 4.3.3.2 vorgestellt wird.

4.3.3.2 Die lineare Regression

Mit Hilfe der linearen Regression können lineare Prozesse und einfache nichtlineare Prozesse durch Zerlegung in einen linearen dynamischen und einen nichtlinearen statischen Teil als mathematisches Modell abgebildet werden. Die lineare Regression ist ein direktes mathematisches Verfahren, welches das quadratische Gütekriterium nach Gleichung 3.25 zur Berechnung der Parameter eines Modells \bar{a} entsprechend Gleichung 3.28 nutzt. Die effektive Berechnung der Modellparameter ist nur mit Hilfe von Rechentechnik möglich, wobei die Theorie schwieriger aussieht, als die Lösung mit der entsprechenden Software in der Praxis ist.

Wie bekannt ist, wandeln in der Regel die Sensoren die kontinuierliche Signale der Prozeßgröße $x(t)$ in digitale Signale in der diskreten Form $x(kT)$. Die so abgetastete Signalfolge $x(kT)$ enthält Meßwerte eines kontinuierlichen Signals $x(t)$, die zu den kT -ten Zeitpunkten gemessen werden. Dabei ist die Abtastzeit T der Abstand

zwischen den Meßpunkten kT und $(k+1)T$ und k eine Variable (laufende Nummer der Meßprobe), die von 0 bis unendlich laufen kann.

Da die Abtastzeit T bei normalen Signalen von Meßgeräten sehr klein ist, können diese als quasikontinuierliche Signale betrachtet werden, wodurch die Modellbildungsverfahren des Kapitels 4.3.3.1 anwendbar sind. Bei den in diesem Kapitel genannten und vorgestellten Verfahren hat die Abtastzeit T einen bedeutenden Einfluß auf die richtige Bestimmung der Modellparameter.

Um ein kontinuierliches Signal $x(t)$ eindeutig im zeitdiskreten Bereich als Signal $x(kT)$ darzustellen, muß das Abtasttheorem von Shannon nach Gleichung 3.26 erfüllt sein. Die Frequenz f_{\max} ist die größte Signalfrequenz, die durch die abgetastete Signalfolge $x(kT)$ eindeutig dargestellt werden kann. Das bedeutet je kleiner die Abtastzeit T um so genauer wird das Signal $x(t)$ durch die Signalfolge $x(kT)$ wiedergegeben.

$$T \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad (4.26)$$

Um mit Hilfe von zeitdiskreten Werten die Modellparameter berechnen zu können, ist es notwendig, daß die Signalfolge $x(kT)$ das kontinuierliche Signal $x(t)$ so genau wie möglich wiedergibt. Man könnte denken, daß auch die Systemparameter g mit kleiner werdender Abtastzeit T immer genauer in den Modellparametern \bar{a} abgebildet werden. Es hat sich aber gezeigt, daß dies nicht der Fall ist. Bei einer Abtastzeit T entsprechend der empirisch gefunden Gleichung 3.27, die den Zusammenhang zwischen Summenzeitkonstante des Systems T_{Σ} , Modellordnung n und Abtastzeit T ausdrückt, ist der Fehler zwischen Modell \bar{a} und Realität a in vielen Fällen am geringsten.

$$T \approx \frac{T_{\Sigma}}{5 \cdot n} \dots \frac{T_{\Sigma}}{10 \cdot n} \quad (4.27)$$

$$\bar{a}^T = [a_0 \dots a_n] \quad (4.28)$$

Ein wesentlicher Unterschied zu den Verfahren in Kapitel 4.3.3.1 ist die Möglichkeit der Modellbildung aus beliebigen Meßsignalverläufen. Aus dem Modellansatz in Gleichung 3.28 kann folgendes Modellausgangssignal $\bar{x}(kT)$ für den Zeitpunkt kT berechnet werden.

$$\bar{x}(kT) = \sum_{i=0}^n \bar{a}_i u((k-i)T) \quad (4.29)$$

Unter der Annahme, daß der reale Prozeß in der Form nach Gleichung 3.30 beschreibbar ist, wird bei dieser Modellbildung angestrebt, daß die Ausgangssignalverläufe des realen Prozesses und des Modells gleich sind. Daraus läßt sich ableiten, das auch die Parameter des Modells hinreichend genau den Parametern des Prozesses $\bar{a} = a$ entsprechen.

$$x(kT) = \sum_{i=0}^n a_i u((k-i)T) \quad (4.30)$$

Aus dem quadratischen Gütekriterium nach Gleichung 3.25 läßt sich die Berechnungsvorschrift nach Gleichung 3.31 für die Modellparameter \bar{a} ableiten.

$$\bar{a} = (M(m)^T M(m))^{-1} \cdot M(m)^T x(m) \quad (4.31)$$

Die Bestandteile der Gleichung 3.31 lassen sich wie folgt erläutern.:

- $M(m)$ ist die Meßwertmatrix von der Größe Meßwertanzahl m mal Modellordnung n , die das Eingangssignal $u(kT)$ n mal um 1 versetzt beinhaltet.

$$M(m) = \begin{bmatrix} u(kT) & \dots & u((k-n)T) \\ \dots & & \dots \\ u((k+m)T) & \dots & u((k-n+m)T) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

- $x(m)$ ist das Ausgangssignal des Prozesses mit m Meßwerten.
- $M(m)^T$ ist die transponierte Matrix von $M(m)$ siehe [11].
- $M(m)^{-1}$ ist die inverse Matrix von $M(m)$ siehe [11].

Aus den errechneten Modellparametern \bar{a} und der Meßwertmatrix $M(m)$ kann das Ausgangssignal des Modells $\bar{x}(kT)$ für $k=0\dots m$ in Anlehnung an die Gleichung 3.29 wie folgt berechnet werden.

$$\bar{x}(m) = M(m)\bar{a} \quad (4.33)$$

Bei richtiger Anwendung liefern die Verfahren der Regression wesentlich genauere Ergebnisse für das statische und dynamische Verhalten eines Prozesses als graphischen Verfahren. Um diese Ergebnisse erzielen zu können, sind aber mathematische und regelungstechnische Grundkenntnisse oder die richtige Software (z.B. MATLAB/SIMULINK) notwendig. Da die richtige Modellordnung n und die richtige Abtastzeit T einen bedeutenden Einfluß auf das gesamte Modellverhalten haben, ist die richtigen Festlegung dieser Größen erforderlich. Dies kann durch mehrmalige Anwendung der Gleichung 3.31 mit variierter Abtastzeit T und Modellordnung n geschehen. Die Bewertung der nach Gleichung 3.33 berechneten Modellausgangssignale kann durch Nutzung des Gütekriteriums entsprechend Gleichung 3.25 erfolgen. Auch die Gütekriterien, die im Anhang aufgeführt sind, können zur Bewertung herangezogen werden. Die Wahl des Gütekriteriums richtet sich nach den Forderungen, die die Verfahrenstechnik an die Regelgüte des Regelkreises stellt.

Da die Streckenparameter nicht im Zeitbereich t , sondern im abgetasteten Zeitbereich kT berechnet wurden, können die Reglerparameter ebenfalls nur mit Verfahren, die in diesem Bereich anwendbar sind, berechnet werden. Hier ist die z -Transformation zu nennen, die ähnlich der Laplace-Transformation ist. Bei diesen Verfahren lassen sich ebenfalls Reglerparameter berechnen, die an einem PID-Regler eingestellt werden können.

Das Verfahren der linearen Regression ist das einfachste Verfahren zur mathematischen Bestimmung der Modellparameter. Weitere Verfahren der direkten Modellbildung sind die Markov-Schätzung, Kammlinienregression und die Schätzung mit Gleichungsbeschränkungen [2],[6]. Zur Modellbildung komplexer nichtlinearer Prozesse haben sich die FUZZY-Modelle und neuronalen Netzen in der

Regelungstechnik etabliert. Diese Modellbildungsverfahren nutzen zur Optimierung der Modellparameter iterative Verfahren, wie Evolutionsstrategien oder Zufallssuchverfahren [2],[4]. Die Modelle dieser Verfahren haben wiederum eigene Strukturen, die der Fachliteratur entnommen werden können.

Die analytische Bestimmung von Prozessen wird in der Regel genutzt, um durch rechnergestützte Programme eine Optimierung von Regelkreisen vorzunehmen. Des Weiteren können mit Hilfe dieser Verfahren auch komplizierte Störeinflüsse evaluiert und Kompensationsmaßnahmen erarbeitet werden. Weitere Informationen dazu kann der Fachliteratur entnommen werden.

4.3.4 Berechnung der Reglerparameter

4.3.4.1 Mathematische Bestimmung der Reglerparameter

In dem Kapitel 4.3.3.1 haben wir Verfahren kennengelernt, mit denen wir das Übertragungsverhalten eines Prozesses oder einer Strecke in eine mathematische Form G_S überführen können. Um aus den Streckenparametern die Reglerparameter zu berechnen, werden auch Kriterien benötigt, die den gewünschten Verlauf des Istwertes $x(t)$ beschreiben. Dazu eignet sich ebenfalls die Auswertung der Sprungantwort $h(t)$ des geschlossenen Kreises entsprechend den Gleichungen 3.23 unter Nutzung des PN-Bildes entsprechend Abbildung 4.15. Folgende Regeln sind bei Anwendung des PN-Bildes zu beachten.:

- Pole laufen in die Nullstelle.
- Der am weitesten rechts liegende Pol läuft in die nächstgelegene Nullstelle.
- Ein Pol läuft ins unendliche, wenn keine passende Nullstelle vorhanden ist. Sie bewegen sich an Asymptoten verschiedenster Formen, die z.B. durch den Scheitelpunkt S , den Winkel γ oder den Radius r charakterisierbar sind.

$$S = \frac{\sum_{j=0}^n p_j - \sum_{i=0}^m n_i}{n - m} \quad (4.34)$$

$$\gamma = \frac{180^\circ + k360^\circ}{n - m} \quad k=0\dots n-m-1 \quad (4.35)$$

- Bewegung der Pole im geschlossenen Kreis durch Setzen von Nullstellen (Reglerparameter) und Festlegen der Regelkreisverstärkung V_0 .
- Polstellen des geschlossenen Kreises, die auf der positiven Seite des PN-Bildes liegen, führen zur Instabilität.
- Berechnung der Regelkreisverstärkung V_0 (siehe Gleichung 3.22) aus den Produkten der Abstände des Pol's im geschlossenen Kreis von den Polen und Nullstellen im geöffneten Kreis. Siehe dazu auch Abbildung 4.17.

$$V_0 = \frac{\prod_{j=1}^n |r_j|}{\prod_{i=1}^m |r_i|} \quad (4.36)$$

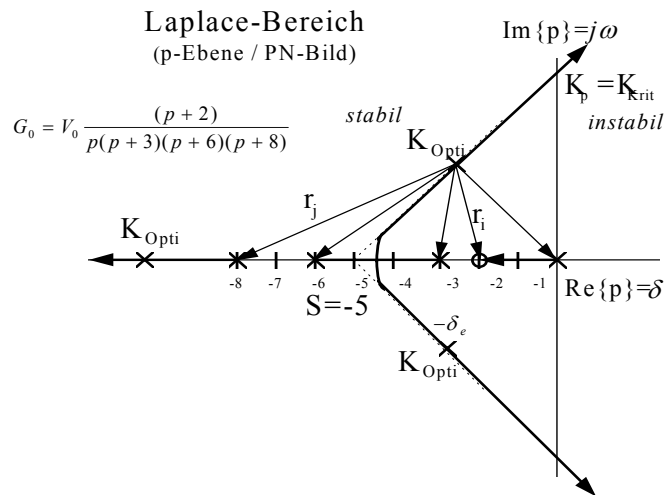


Abbildung 4.17: Beispiel für ein PN-Bild

Die Berechnung der Reglerparameter bei bekannter Strecke G_S mit Hilfe der Gleichung 3.23 erfolgt nach folgendem Ablauf.:

1. Entsprechend Tabelle 4.1 Festlegen der Reglerstruktur.
2. Festlegen der Überschwingweite Δh , bleibende Regelabweichung e_B und Überschwingzeit T_m entsprechend Gleichungen 3.23.
3. Bestimmung des Übertragungsverhaltens des offenen Regelkreises G_0 .
4. Umwandlung des Übertragungsverhaltens G_0 in die PN-Form entsprechend Gleichung 3.22.
5. Eintragen der Pole und Nullstellen in das PN-Bild entsprechend Abbildung 4.15 und Abbildung 4.17.
6. Festlegen und Eintragen der Nullstellen, die sich durch den Integral- und Differentialteil des PID-Reglers ergeben, in das PN-Bild.
7. Entsprechend den Regeln Festlegen der Wege, auf denen sich die Pole im geschlossenen Regelkreis bewegen können.
8. Bestimmung der Lage der Polstellen, die einer gewünschten Übertragungsfunktion unter Nutzung der Gleichungen 3.23 entsprechen.
9. Aus der Lage der Polstellen kann mit Gleichung 3.36 die Regelkreisverstärkung V_0 abgeleitet werden.
10. Berechnung der Reglerverstärkung K_p aus der Regelkreisverstärkung V_0 und den Zeitkonstanten der Strecke T_x .

Die unter Punkt 6. vorzunehmende Festlegung der Reglerparameter kann zum einen dazu genutzt werden, die Polstellen mit der größten Zeitkonstante zu beseitigen, da diese den stärksten Einfluß auf das Streckenverhalten haben. Dies geschieht, indem die Nullstellen gleich den Polstellen gesetzt werden. Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Regelgüte ist die Festlegung der Nullstellen so, daß die Wege auf denen die Pole des geschlossenen Regelkreises laufen können so verzerrt werden, das durch die Reglerverstärkung K_p ein Punkt festgelegt wird, an dem der Regelkreis das angestrebte Gütekriterium erfüllt.

In Abbildung 4.18 ist das Ausgangssignal des geschlossenen Regelkreises für unterschiedliche Werte der Verstärkung K_p dargestellt.

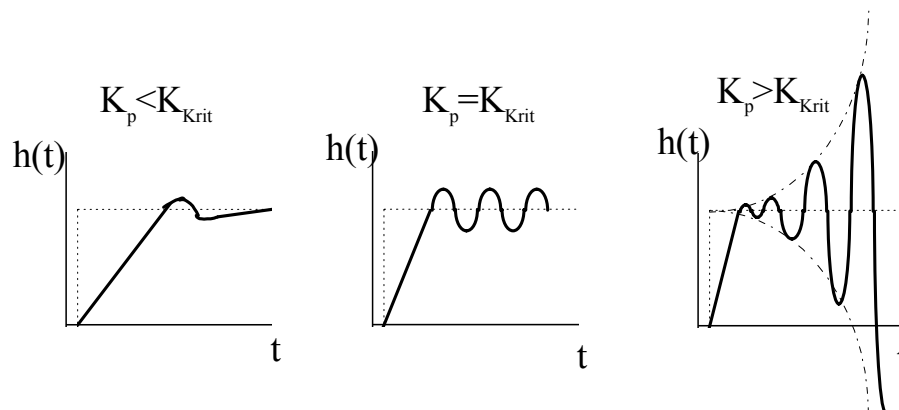


Abbildung 4.18: Ausgangssignal für unterschiedliche Verstärkungen K_0

Auch mit Hilfe des Bodediagramms oder des Nyquistkriteriums lassen sich stabile Regelkreise berechnen.

4.3.4.2 Reglerparameterbestimmung mittels Faustformeln

Streckentyp	Reglertyp	$X_p=100/K_p$	T_n
Temperatur	PID	10...50%	1...10 min
Druck	PI	10...30%	10...60 s
Durchfluß	PID	100...200%	10...30 s
Analyse	PID	200...500%	10...20 min
Niveau	P	100%	-
	PI	50%	10 min

Tabelle 4.3 : Erfahrungswerte für Reglereinstellung

Der in Kapitel 4.3.4.1 beschriebene Weg der Berechnung der Reglerparameter liefert zwar sehr gute Ergebnisse, ist aber in der Anwendung sehr aufwendig. Daher haben sich in der Praxis sogenannte Faustformeln als Einstellkriterien durchgesetzt. Auch für diesen Weg der Reglerparameterbestimmung, besser gesagt Abschätzung, haben sich verschiedene Verfahren in der Praxis bewährt. Für das einfachste Verfahren, bei dem aus Erfahrungswerten für verschiedene Streckentypen bestimmte Bereiche für die Parameterwerte vorgeschlagen werden, sind in Tabelle 4.3 aufgezeigt.

Bei anderen Verfahren werden direkt aus der graphischen Analyse die Reglerparameter über empirisch gefundene Formeln bestimmt. Für die nachfolgend aufgeführten Verfahren sind unterschiedliche Hilfsgrößen aus den Sprungantworten $h(t)$ der Strecken abzuleiten.

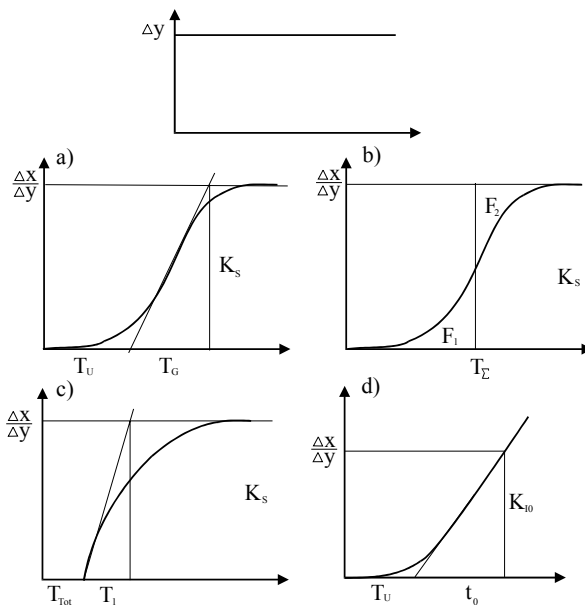


Abbildung 4.19: Streckenparameter

Diese Hilfsgrößen wie Verzugszeit T_U , Streckenverstärkung K_S , Anstiegszeit T_G , T-Summe $T_Σ$ und verschiedene Zeitkonstanten T_x sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

Für die Berechnung der Reglerparameter unter Nutzung von Hilfsgrößen, die von realen Istwerten x und

Stellgrößen y abgeleitet wurden, müssen Normierungsfaktoren x_H und y_H eingefügt werden. x_H bezeichnet den Meßbereich des Istwertes und y_H den Stellbereich des Reglers in realen Größen (z.B. 10...20 mbar oder 0...10 mm).

Regler	T_n	T_V	X_P
P	-	-	$K_S \frac{T_U}{T_G} \frac{y_H}{x_H} 100\%$
PD	-	$(0,25...0,5)T_U$	$0,83K_S \frac{T_U}{T_G} \frac{y_H}{x_H} 100\%$
PI	$3T_U$	-	$1,25K_S \frac{T_U}{T_G} \frac{y_H}{x_H} 100\%$
PID	$2T_U$	$0,42T_U$	$0,83K_S \frac{T_U}{T_G} \frac{y_H}{x_H} 100\%$

Tabelle 4.4: Einstellkriterien nach Ziegler und Nichols

Ein sehr gebräuchliches Einstellverfahren für Strecken mit Ausgleich sind die Einstellregeln nach Ziegler und Nichols, welche in Tabelle 4.4 aufgelistet sind. Die Bestimmung der Streckenparameter kann Diagramm a der Abbildung 4.19 entnommen werden.

Ein weiteres Einstellverfahren für Strecken mit Ausgleich ist die T-Summen-Regel, deren Einstellregeln in Tabelle 4.5 aufgelistet sind. Die T-Summe $T_Σ$ befindet sich an der Stelle, an der die Flächen F_1 und F_2 entsprechend Diagramm b der Abbildung 4.19 gleich groß sind.

Ein weiteres Einstellverfahren für Strecken mit Ausgleich ist die T-Summen-Regel, deren Einstellregeln in Tabelle 4.5

	Regler	X_p	T_N	T_V
normale Einstellung	P	$K_S 100\%$	-	-
	PD	$K_S 100\%$	-	$0,33 T_\Sigma$
	PI	$2K_S 100\%$	$0,5 T_\Sigma$	-
	PID	$K_S 100\%$	$0,66 T_\Sigma$	$0,167 T_\Sigma$
schnelle Einstellung	PI	$K_S 100\%$	$0,7 T_\Sigma$	-
	PID	$0,5K_S 100\%$	$0,8 T_\Sigma$	$0,194 T_\Sigma$

Tabelle 4.5: T-Summen-Regel

Ein Einstellverfahren für Strecken erster Ordnung mit Totzeit und Ausgleich ist des Verfahren nach Chien, Hrones und Reswick. Da dieses Verfahren für Strecken erster Ordnung mit Totzeit ausgelegt ist, wird die Verzugszeit T_U zur Totzeit T_{tot} und die Anstiegszeit T_G zur Zeitkonstanten erster Ordnung T_1 . Die

Regler	Aperiodischer Regelvorgang		20% Überschwingen	
	Führung	Störung	Führung	Störung
P	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,3 T_1} 100\%$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,3 T_1} 100\%$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,7 T_1} 100\%$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,7 T_1} 100\%$
PI	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,35 T_1} 100\%$ $T_n = 1,2 T_{Tot}$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,6 T_1} 100\%$ $T_n = 4 T_{Tot}$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,6 T_1} 100\%$ $T_n = 1 T_{Tot}$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,7 T_1} 100\%$ $T_n = 2,3 T_{Tot}$
PID	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,6 T_1} 100\%$ $T_n = 1 T_{Tot}$ $T_v = 0,5 T_{Tot}$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,95 T_1} 100\%$ $T_n = 2,4 T_{Tot}$ $T_v = 0,42 T_{Tot}$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{0,95 T_1} 100\%$ $T_n = 1,35 T_{Tot}$ $T_v = 0,47 T_{Tot}$	$X_p = \frac{K_S T_{Tot}}{1,2 T_1} 100\%$ $T_n = 2 T_{Tot}$ $T_v = 0,42 T_{Tot}$

Tabelle 4.6: Einstellkriterien nach Chien, Hrones und Reswick

Reglerparameter errechnen sich entsprechend Tabelle 4.6 aus den entsprechend Diagramm c der Abbildung 4.19 abgeleiteten Streckenparametern. Eine Besonderheit dieses Verfahrens besteht in der Unterscheidung der Einstellregeln nach Strecken mit und ohne Störung.

Regler	T_n	T_v	X_p
P	-	-	$2 \frac{K_{I0} T_U y_H}{t_0 x_H} 100\%$
PD	-	$0,5 T_U$	$2 \frac{K_{I0} T_U y_H}{t_0 x_H} 100\%$
PI	$5,8 T_U$	-	$2,4 \frac{K_{I0} T_U y_H}{t_0 x_H} 100\%$
PID	$3,2 T_U$	$0,8 T_U$	$2,5 \frac{K_{I0} T_U y_H}{t_0 x_H} 100\%$

Tabelle 4.7: Einstellkriterien für Strecken ohne Ausgleich

Ein Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen mit Strecken ohne Ausgleich ist in [5] näher beschrieben. Die Einstellregeln, die an Hand der Streckenparameter entsprechend Diagramm d der Abbildung 4.19 zu bestimmt werden, sind in Tabelle 4.7 aufgelistet.

Ein Verfahren, welches die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises auswertet, ist ein weiteres Verfahren nach Ziegler und Nichols. Dieses basiert auf der Auswertung der Reglerverstärkung

$K_p = K_{p\text{ krit}}$ bei der der geschlossene Regelkreis stabil mit der Periodendauer T_{krit} schwingt. Voraussetzung dafür sind, daß die Vorhaltezeit auf Null und die Nachstellzeit auf Unendlich gesetzt werden.

Aus der $K_{p\text{ krit}}$ lassen sich entsprechend Gleichung 3.38 die Reglerparameter berechnen.

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{10}{17} K_{p\text{krit}} \\ T_n &= 0,5 T_{\text{krit}} \\ T_v &= 0,125 T_{\text{krit}} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die beschriebenen Einstellregeln für die Mehrzahl aller Regelaufgaben zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Bei komplizierten Regelstrecken werden diese Verfahren aber versagen, da die Strecke zu ungenau beschrieben wird. Daher werden bei solchen Regelstrecken bessere Ergebnisse mit Hilfe der experimentellen Prozeßanalyse erzielt. Trotz allem muß in der Praxis entschieden werden, ob es für den Gesamtprozeß nützlich ist, die Regelgüte mit einem erhöhten Aufwand bei der Einstellung der Reglerparameter zu verbessern.

4.4 Nichtlineare Regelungskonzepte

Nichtlineare Regelungskonzepte finden Anwendung, bei Strecken oder Prozessen, deren Regelbereich nicht linearisierbar ist. Dies tritt bei der Regelung nichtlinearer Strecken auf, die über einen großen Sollwert- und Istwertbereich geregelt werden sollen.

Bei Nutzung von linearen Regelungsstrukturen wird, damit über den gesamten Regelbereich kein instabiler Zustand auftritt, der Regler in der Regel nach dem "worst case" Prinzip eingestellt. Dadurch ist der Regelkreis in bestimmten Regelbereichen sehr träge und in anderen erfüllt er die vorgeschriebene Regelgüte. Angestrebt wird aber eine gleichmäßig gute Regelung im gesamten Regelbereich. Um dies zu erreichen, müssen die klassischen PID-Reglerparameter an die Strecke ständig angepaßt werden, oder es werden neue Regelungskonzepte entwickelt.

In diesem Abschnitt werden einige nichtlineare praxisnahe Regelungsstrukturen vorgestellt. Ein Beispiel für eine stark nichtlineare Regelung ist die Neutralisation (siehe Kapitel 7.1), bei der kein Arbeitspunkt festgelegt werden kann, um den die Strecke linearisierbar ist.

4.4.1 Der FUZZY-Regler

Ende der 90-iger Jahre war der FUZZY-Regler in aller Munde und auch heute noch sprechen viele Leute von einem solchen Regler, aber kaum einer setzt ihn ein. Es wird in vielen Publikationen davon geredet, daß durch den FUZZY-Regler nichtlineare Strecken oder Prozesse, die verbal beschreibbar sind, geregelt werden können. Wenn dies so einfach zu realisieren wäre, dann hätte der FUZZY-Regler den PID-Regler schon abgelöst. Dies ist aber nicht der Fall. Warum?

Der FUZZY-Regler versucht über linguistische Verknüpfungen der bewerteten Eingangsgrößen eine Stellgröße zu ermitteln. Daher besteht der FUZZY-Regler aus der Bewertung der Eingangsgrößen (Fuzzyfizierung), den linguistischen Verknüpfungen (Regelwerk-Inferenz) und der Berechnung einer Stellgröße (Defuzzyfizierung). Bei Betrachtung der Abbildung 4.20 fällt auf, daß über eine mindestens 3-teilige Fuzzyfizierung eine Eingangsgröße in mindestens 2 unscharfe Eingangsmengen gewandelt wird, wobei zur Bestimmung dieser einfachen Fuzzyfizierung die Festlegung von Grenzen der 3 Eingangsmengen notwendig ist. Über das Regelwerk werden aus diesen Eingangsmengen mehrere Ausgangsmengen bestimmt. Diese wiederum werden über die Defuzzyfizierung, bei der ebenfalls mehrere Parameter festgelegt werden müssen und über die Schwerpunktbildung nach Gleichung 3.39, in eine Stellgröße $y(kT)$ umgerechnet.

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_{Si}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \begin{array}{l} n - \text{Anzahl der Attribute} \\ A_i - \text{Flächeninhalt des Attributes } i \\ y_{Si} - \text{Schwerpunkt des Attributes } i \end{array} \quad (4.38)$$

Es ist zu erkennen, daß für einen einfachen P-Regler mit einer Einstellvariablen mindestens 5 Parameter und 3 Regeln festgelegt werden müssen (entsprechend Abbildung 4.20). Für kompliziertere Reglerstrukturen, würde die Anzahl der Parameter sehr stark steigen.

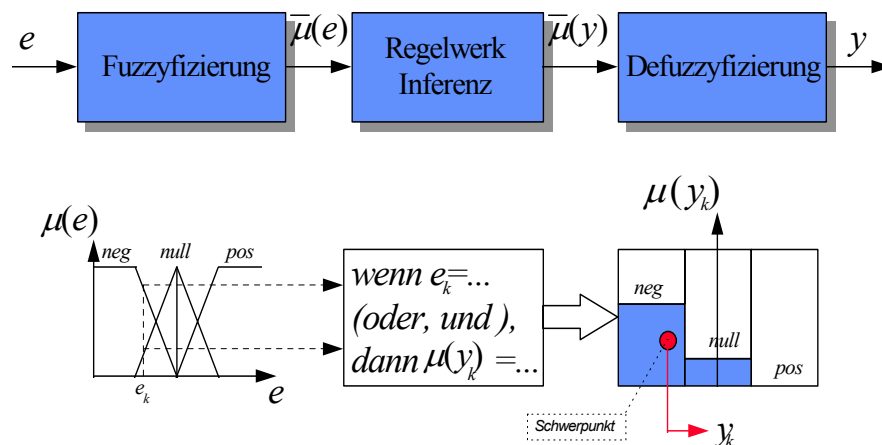


Abbildung 4.20: FUZZY-Algorithmus

In Abbildung 4.20 ist ein FUZZY-Regler dargestellt, der ein P-, I- oder D-Regler sein könnte, da für die Regelabweichung e entsprechend Gleichung 3.40 der aktuelle Wert, 3.41 der integrale Wert oder 3.42 der differenzielle Wert der Regelabweichung eingesetzt werden kann. Für die Abbildung eines PID-Reglers werden daher aus der Regelabweichung drei Eingangsgrößen des FUZZY-Reglers entsprechend Gleichung 3.40, 3.41, 3.42 erzeugt. Zu jeder Eingangsgröße gehört entsprechend Abbildung 4.20 auch eine Fuzzyfizierung. Über ein gemeinsames Regelwerk und eine Defuzzyfizierung wird die Stellgröße $y(kT)$ berechnet.

$$\text{bei P-Regler } e = e(kT) \quad (4.39)$$

$$\text{bei I-Regler } e = \sum_{i=0}^k e((k-i)T) \quad (4.40)$$

$$\text{bei D-Regler } e = e(kT) - e((k-1)T) \quad (4.41)$$

Für eine solche Reglerstruktur ist die Optimierung der vielen Reglerparameter nur mit Hilfe von Software möglich, da es keine Einstellkriterien entsprechend Kapitel 4.3.4.2 gibt. Die regelungstechnische Betrachtung dieser Regler wird im zeitdiskreten Bereich (kT) vorgenommen, da nur zeitdiskrete Signale verarbeitet werden können. Siehe dazu auch das Kapitel 4.3.3.2, in dem die Berechnung von Modellen im zeitdiskreten Bereich beschrieben wurde. Diese Modelle können zur Optimierung von FUZZY-Reglern genutzt werden.

Durch den hohen Aufwand bei der Bestimmung der Reglerparameter sollten diese Regler nur zur Regelung nichtlinearer Systeme genutzt werden. Bei Einsatz des FUZZY-Reglers zur Regelung nichtlinearer Prozesse würden die Graphen $\mu(e)$ bei der Fuzzyfizierung und $\mu(y_k)$ bei der Defuzzyfizierung nach Abbildung 4.20 nicht symmetrisch, sondern verzerrt sein. Das bedeutet, daß der in Abbildung 4.20 strukturell angedeutete FUZZY-Regler einen linearen Regler darstellt.

4.4.2 Veränderliche Regler

Veränderliche Regler sind Regler, die nach dem PID-Algorithmus mit gesteuerten oder adaptierten Reglerparameter arbeiten. Dies kann auf verschiedene Weise geschehen.:

1. durch binäre Signale (siehe Kapitel 4.4.2.1)
2. durch Steuerung mit Prozeßsignalen über Umrechnungsgleichungen (siehe Kapitel 4.4.2.1)
3. durch Prozeßanalyse mit Hilfe von bestimmten Stellsignalen (siehe Kapitel 4.4.2.2)
4. durch FUZZY-Algorithmen (siehe Kapitel 4.4.2.2)
5. durch Neuronale Netze

4.4.2.1 Der gesteuerte PID-Regler

Bei den gesteuerten PID-Reglern können zwei verschiedene Arten der Steuerung der Reglerparameter unterschieden werden. Zum einen die Steuerung der Parameter oder der gesamten Reglerstruktur durch binäre Signale (siehe Abbildung 4.21), die z.B. durch Grenzwerte des Sollwertes oder Istwertes erzeugt werden. Dieses Verfahren findet Anwendung bei Programmgeber-gesteuerten Regelungen, bei der für jeden Sollwertbereich eine andere Struktur des Reglers hinterlegt werden kann. Die Umschaltung kann durch Auswertung des Sollwertes oder dem jeweiligen Programmabschnitt erfolgen.

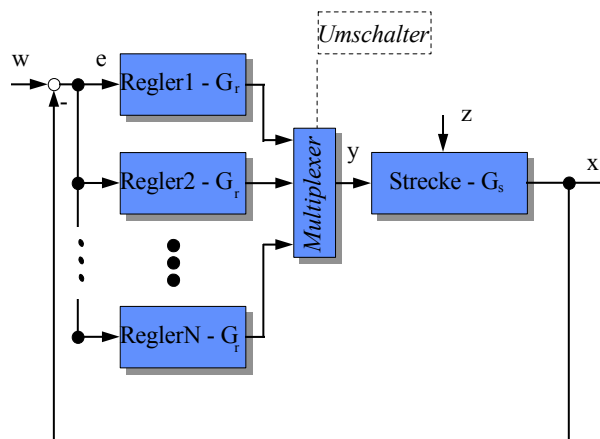


Abbildung 4.21: binärgesteuerter PID-Regler

Parameter bestimmt werden muß, treten ähnliche Schwierigkeiten bei der Optimierung wie bei den FUZZY-Reglern auf.

Als ein Sonderfall kann eine nichtlineare Strecke angenommen werden, die durch sich linear ändernde Reglerparameter geregelt werden kann. In diesem Fall können alle notwendigen Parameter, die zur Verbesserung der Regelgüte beitragen, wie folgt bestimmt werden.:

1. Berechnung von Reglerparametersätzen in Abhängigkeit einer Prozeßgröße u bei einem oberen und unteren Grenzwert des Sollwertes w.
2. Erstellung eines Diagramms mit linearer Verbindung zwischen den Reglerparametern beider Reglerparametersätze.
1. Durch die Prozeßgröße u werden in der laufenden Regelung über das festgelegte Diagramm die gerade aktuellen Reglerparameter online berechnet.

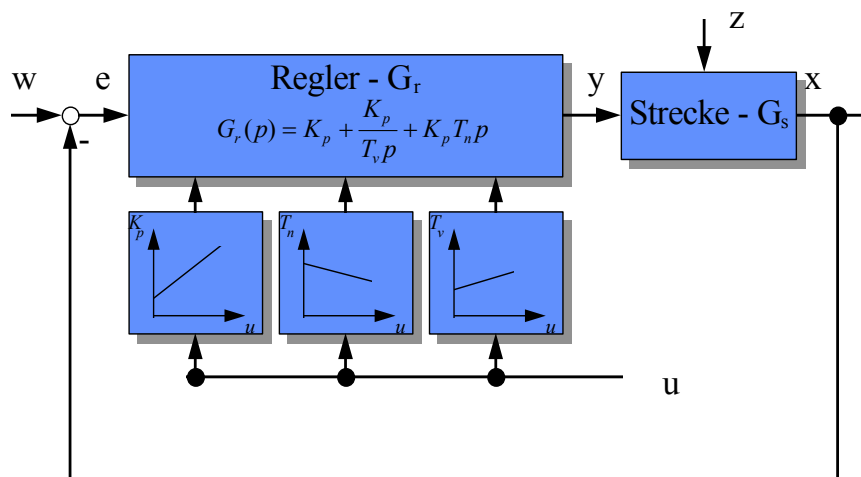


Abbildung 4.22: analoggesteuerter PID-Regler

Eine solche Struktur ist in Abbildung 4.22 dargestellt. In Kapitel 7.1 wird beschrieben, wie für die pH-Wert-Regelung, die häufig in der Praxis durch lineare I-

Zum anderen die analoge Steuerung der Reglerparameter durch die Umwandlung von Prozeßgrößen über ein Diagramm oder ein Modell, in denen die Abhängigkeit der Streckenparameter von diesen Prozeßgrößen hinterlegt ist (siehe Abbildung 4.22). Auf diesem Weg kann ein PID-Regler eine ähnlich hohe Regelgüte an nichtlinearen Regelstrecken erzielen, wie ein FUZZY-Regler. Da bei diesem Verfahren ebenfalls eine hohe Anzahl an

Regler oder nichtlineare FUZZY-Regler realisiert wird, durch die beschriebene Reglerstruktur eine wesentliche Verbesserung der Regelgüte erzielt werden kann.

4.4.2.2 Der adaptive PID-Regler

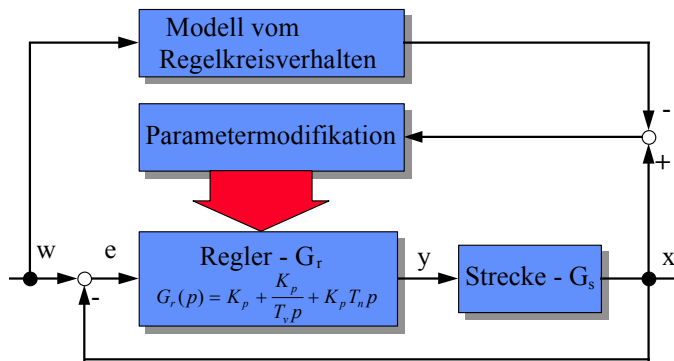


Abbildung 4.23: Adaptiver Regler

Ein adaptiver Regler ist ein Regler, bei dem die Reglerparameter, regelmäßig online über Streckenanalyse oder Prozeßsimulation an einem Prozeßmodell, an die Regelstrecke angepaßt werden.

Die online-Streckenanalyse wiederum ist mit einer zeit- oder ereignisgesteuerten Selbstparametrierung vergleichbar. Dazu wird auf

die Regelstrecke ein Signal gegeben, welches z.B. entsprechend Kapitel 4.3.4 ausgewertet wird.

Bei dem Verfahren der Reglerparameterberechnung an Hand eines Streckenmodells ähnlich dem Verfahren unter Kapitel 4.2.4 sind komplizierte Untersuchungen zur Robustheit der Regelung notwendig.

Eine besondere Form des adaptiven PID-Reglers ist der FUZZY-adaptive PID-Regler, der die Vorteile des FUZZY-Algorithmus bei nichtlinearen Strecken mit dem leicht handhabbaren linearen PID-Regler verbindet [3]. Bei diesem Verfahren wird durch ein FUZZY-Modell die Parametermodifikation entsprechend Abbildung 4.23 vorgenommen.

5 Die Stellgröße einer Regelung

Die Stellsignale einer Regelung können kontinuierliche Signale wie z.B. 4...20 mA oder zeitdiskrete Signale wie beim Grenzwertregler, Zweipunktregler (Z), doppelten Zweipunktregler (ZZ) oder Schrittreger sein. Welches dieser verschiedenen Stellsignale bei einer Regelung genutzt wird, ist abhängig von der erforderlichen Regelgüte und damit von der Art des Stellgliedes. Regler mit kontinuierlichem Ausgangssignal z.B. zur Ansteuerung von I/p-Stellgliedern werden auch als stetige Regler und Regler mit diskretem Ausgangssignal z.B. zur Ansteuerung von elektrischen Stellventilen (Schrittreger) als unstetige Regler bezeichnet.

Beim stetigen Regler wird die Stellgröße $y = 0...100\%$ in die physikalische Ausgangsgröße Strom 4...20mA oder 0...20mA bzw. Spannung 2...10V oder 0...10V gewandelt.

Anders ist das bei den unstetigen Reglern. Hier wird die Stellgröße $y = 0...100\%$ in ein pulsbreitenmoduliertes EIN/AUS oder EIN+/AUS/EIN- Signal gewandelt und Binärkontakte schalten das Stellgerät (siehe Kapitel 6).

Der Grenzwertregler ist eigentlich kein Regler, sondern nur ein Schalter mit bedienbaren Grenzwert, Anzeige und Hand/Automatik-Betrieb. Der Grenzwertregler schaltet einen Ausgang, wenn der festgelegte Grenzwert überschritten wird. Dieser Grenzwert kann z.B. ein Grenzwert des Sollwertes w oder der Regelabweichung e sein.

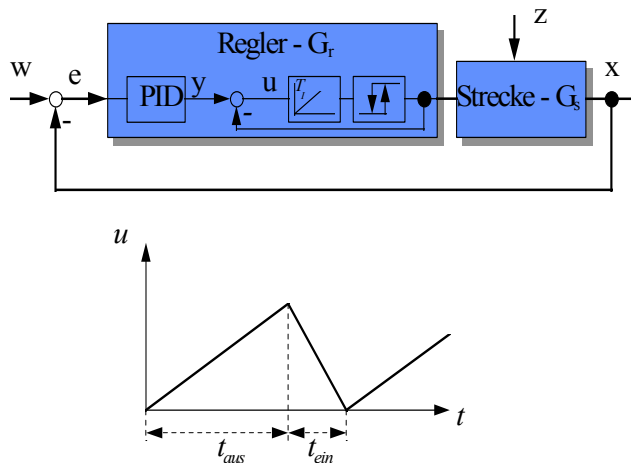


Abbildung 5.1: Der Zweipunktregler im Universalregler

Abbildung 5.1 realisiert. Die Stellgröße $y = 0 \dots 100\%$, die ein PID-Regler berechnet, wird über einen Integrator mit der Integrationskonstanten T_I in eine pulsbreitenmodulierte Impulsfolge entsprechend dem Diagramm in Abbildung 5.1 gewandelt. Dabei kann immer eine minimale Impulsbreite t_{ein} , die Integrationskonstante T_I und damit auch die Schaltperiodendauer bei 50 % entsprechend Gleichung 4.1 eingestellt werden. Bei den doppelten Zweipunktreglern und den Schrittreglern kann zusätzlich eine Totzone t_{tot} um den Wert $y = 0\%$ eingestellt werden.

$$\begin{aligned}
 t_{\text{ein}} &= \frac{T_I \cdot 100\%}{(100\% - y)} \\
 t_{\text{aus}} &= \frac{T_I \cdot 100\%}{y} \\
 T &= t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}} = T_I \frac{100\%^2}{y(100\% - y)}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Der doppelte Zweipunktregler besteht aus zwei getrennten Reglern, die über zwei verschiedene Stellglieder, auf den gleichen Prozeß wirken. Ein Beispiel für einen doppelten Zweipunktregler ist die Anordnung Heizen-AUS-Kühlen. Durch die unterschiedlichen Verhaltensweisen der Heizung und der Kühlung, die entsprechend Abbildung 4.3 Bestandteil der Regelstrecke sind, ergeben sich unterschiedliche Streckenparameter, obwohl der zu regelnde Prozeß der Gleiche ist. Daher ist es notwendig, daß die Reglerparameter des Heizregelkreises und des Kühlregelkreises getrennt einstellbar sind. Weitere Regelaufgaben für die doppelten Zweipunktregler sind die pH-Neutralisation mit Säure und Lauge oder die Regelungen mit Grund- und Regellast.

Anders sieht das beim Zweipunktregler bzw. doppelten Zweipunktregler und Schrittreger, auch als 3-Punkt-Schrittreger bezeichnet, aus.

Die Zweipunktregler können als Schaltverstärker mit Hysterese ohne Rückführung (P-Regler), mit verzögerter Rückführung (PD-Regler) oder verzögert-nachgebender Rückführung (PID-Regler) dargestellt werden (siehe [1]).

In Universalreglern wird der Zweipunktregler entsprechend

Den Schrittreger kann man sich ebenfalls bildlich als einen doppelten Zweipunktregler vorstellen, der sich aber durch folgende Merkmale unterscheidet.:

- Wirkt über das gleiche Stellgerät auf den Prozeß
- Schaltet nicht mehr, wenn er ausgeregelt hat.
- Beide Regler sind gekoppelt, so daß keiner wegläuft.
- Stoßfreie Umschaltung

Der Schrittreger wird bei Stellgeräten mit elektrischen Stellantrieben, die entweder nach rechts oder links drehen, eingesetzt. Daher wird sichergestellt, daß nur einer der beiden Zweipunktregler aktiv ist. Da einem Schrittreger immer ein Stellantrieb mit integrierender Wirkung nachgeschaltet ist, sollte bei einem solchen Regelkreis immer die gesamte Regeleinrichtung entsprechend Abbildung 4.3 betrachtet werden. Daher wird die Stellzeit des elektrischen Stellantriebes G_M , die der Integrationszeit T_M entspricht, zur Berechnung der Reglerparameter herangezogen werden. In der Vergangenheit (vor der DDC-Regler - Ära) wurde der Regler als PD-Regler G_r ausgelegt, da die gesamte Regeleinrichtung G_{RE} durch den nachgeschalteten Stellantrieb dann PDI-Verhalten hatte.

$$\text{PD-Regler} - G_r = K_p(1 + T_V p) \quad (5.2)$$

$$\text{Stellantrieb} - G_M = \frac{1}{T_M p} \quad (5.3)$$

$$\text{Regeleinrichtung} - G_{RE} = G_r G_M = \frac{K_p T_M}{T_V} \left(1 + \frac{1}{T_V p}\right) = K_{PRE} \left(1 + \frac{1}{T_{nRE} p}\right) \quad (5.4)$$

Aus den Gleichungen 4.2 bis 4.4 können die Reglerparameter unter Beachtung der Stellzeit des Stellantriebes entsprechend Gleichung 4.5 abgeleitet werden.

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{K_{PRE} T_V}{T_M} \\ T_V &= T_{nRE} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Da die gesamte Regeleinrichtung G_{RE} quasikontinuierliches Übertragungsverhalten hat, können die Parameter des Schrittreger nach den gleichen Verfahren entsprechend Kapitel 4.3 berechnet werden.

In der Zeit der DDC-Regler ist dieses Herangehen hinfällig geworden. Heutzutage wird auch im Schrittregerbetrieb das PID-Regelverhalten gewählt, wobei das analoge Stellsignal über ein Drei-Punkt-Schritt-Glied als 2 binäre Ausgangssignale auf das Stellglied wirken. Der analoge PID-Regelalgorithmus berechnet eine Stellgröße y von -100% bis +100%, die für den Bereich $y = -100...0\%$ und den Bereich $y = 0...100\%$ in zwei getrennte EIN-AUS-Signale zerlegt wird.

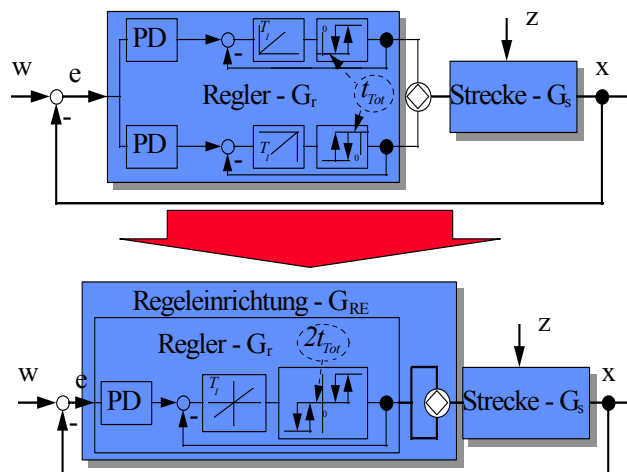


Abbildung 5.2: Schrittregler

liegt neben der richtigen Einstellung der Reglerparameter K_P , T_n , T_v auch in der richtigen Wahl der minimalen Impulsbreite Totzeit. Wie schon mehrfach in dieser Abhandlung beschrieben, ist der Prozeß oder die Strecke die bestimmende Größe für alle einzustellenden Parameter, so auch in diesem Fall. Man kann sagen, je träger die Strecke, um so größer können die minimale Einschaltdauer und die Totzeit sein, ohne das es zu einem Schwingen des Istwertes mit einer Frequenz und einer Amplitude um den Sollwert kommt. An dieser Stelle zeigt sich auch die Grenze des Einsatzbereiches eines un stetigen Reglers, die durch die Größe der Summenzeitkonstante der Regelstrecke und damit der Einschalthäufigkeit des Reglers bestimmt wird. Die Einschalthäufigkeit ohne Istwerteschwingungen verhält sich zur Summenzeitkonstante umgekehrt proportional.

Häufiges Schalten, EIN-Signal (maximale Kraft) und AUS-Signal (Stop), führt zu einer sehr hohen Belastung des Stellgerätes (Steller und/oder Stellglied). Eine hohe Schaltfrequenz hätte bei schaltenden Stellgeräten einen starken Verschleiß zur Folge. Daher ist es wichtig, schon in der Planungsphase zu entscheiden, ob ein Prozeß über eine un stetige oder stetige Regelung zu beherrschen ist. Das entscheidende Kriterium sollte die gewünschte Regelgüte sein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei sehr hoher Schalthäufigkeit der Einsatz einer stetigen Regelung ratsam ist, da durch den geringeren Verschleiß der Stellgeräte bei gleicher oder besserer Regelgüte sich die höheren Anschaffungskosten im Betrieb sehr schnell amortisieren. Diese Überlegung sollte bei jeder Durchfluß- oder Druckregelung mit elektrischen Antrieben überdacht werden, da das häufige Ein- und Ausschalten des Antriebes, wie bei jedem Motor, zu sehr großen Belastungen und damit zu einem starken Verschleiß der Bremsen, Kupplung, Endschalter und Bürsten, führt.

Bei Heizungsregelungen mit Heizpatronen ist auf Grund der Triac-Technik dies heutzutage kein Problem mehr.

Unstetige Regler werden in der Praxis sehr häufig, vor allem bei Temperaturregelungen, eingesetzt. Die notwendige Technik, vor allem die Stellgeräte sind einfacher und damit preiswerter als die der analogen Regelungstechnik. Rein theoretisch wird der Istwert immer um den Sollwert schwanken, da der Regler durch Impulse auf das Stellgerät wirkt. Die Praxis hat gezeigt, daß dies nicht so sein muß. Der Grund dafür

6 Das Stellgerät

Das Stellgerät ist die Verbindungsstelle zwischen Regler bzw. Steuerung und Prozeß. Im Stellgerät wird in der Regel das Ausgangssignal des Reglers unter Nutzung einer Hilfsenergie verstärkt und die eigentliche Beeinflussung der Prozeßgröße z.B. über eine Heizung oder ein Ventil vorgenommen. Nach folgenden Kriterien kann die richtige Wahl des Stellgerätes vorgenommen werden.

1. Art der zu regelnden Prozeßgröße

- Druckregelung, Durchflußregelung - durch Ventil mit Stellantrieb und Leistungselektronik
- Temperaturregelung - durch Heizung oder Brenner über Relais, Thyristorsteller oder Verstärker
- Pumpenregelung, Drehzahlüberwachung - durch Thyristorsteller oder Verstärker

2. Technologie der Regelstrecke

- stetiger oder unstetiger Regler

3. Nutzbare Hilfsenergie und erforderliche Antriebskraft

- Antriebe mit elektrischer, pneumatischer oder hydraulischer Hilfsenergie

4. Sicherheitsphilosophie

5. Investitionssumme

Von entscheidender Bedeutung für die richtige Wahl des Stellgerätes ist die zu beeinflussende Prozeßgröße. Das Stellgerät, welches sich in Stellglied und Steller unterteilt, wird durch die in der Regel immer bekannte zu regelnde Prozeßgröße bestimmt. Die Auswahl des Stellgliedes ist von der Verfahrenstechnik abhängig und bestimmt gleichzeitig die Art des Stellers. Ein weiteres Kriterium für die Wahl des Stellgerätes, die eine Heizung, Brenner oder Ventil mit Antrieb sein kann, ist die gewünschte Regelgüte, die der gesamte Regelkreis erzielen soll. An dieser Stelle muß Klarheit bestehen, ob die gewünschte Regelgüte mit einem unstetigen oder nur durch Nutzung eines stetigen Reglers erzielt werden kann. Aus der Festlegung der Stellglieder und der Regelgüte ergibt sich der Leistungsbedarf der Steller bzw. Stellantriebe. Dieser Leistungsbedarf führt bei Überdimensionierung auf jeden Fall zu der gewünschten Regelgüte, wobei sich die Investitionssumme der Regelung stark erhöhen kann, da genau die Steller bzw. Stellantriebe einen starken Einfluß auf den Gesamtpreis der Regelung haben können. Zum anderen würde eine zu kleine Auslegung der Steller bzw. Stellantriebe zur Verfehlung der gewünschten Regelgüte führen. An Hand der aufgeführten Kriterien kann der richtige Steller bzw. Stellantrieb zur Ansteuerung des Stellgliedes ausgewählt werden.

Im einfachsten Fall wird durch ein Relais oder Triac, welches mit einem Signal von $U=24V$, $I=100mA$ einen Steller mit einer Leistung von $U=220V$ bzw. $380V$, $I=0,1...20A$ geschaltet. Für die kontinuierliche Ansteuerung von Wechselstromheizungen bzw. -motoren eignen sich im Leistungsbereich von $U=220V$ bzw. $380V$ und $I=15...260A$ die Thyristorsteller mit Phasenanschnittsteuerung oder Frequenzmodulation. Diese Geräte benötigen in der

Regel ein Eingangssignal 0/4...20mA oder 0...5/10V, wie es von jedem Universalregler bereitgestellt wird. Bei Gleichstrommotoren oder -heizungen, werden wiederum Leistungsverstärker eingesetzt.

6.1 Stellgeräte für Durchfluß und Druck

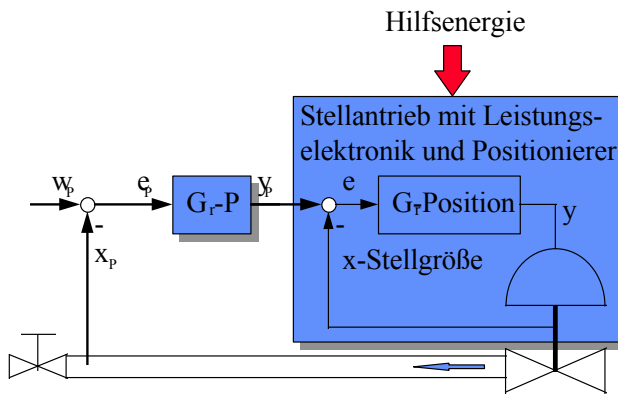


Abbildung 6.1: Druckregelung

Zur Regelung von Durchflüssen und Drücken werden Regelventile, Stellhähne, Schieber und Drosselklappen, mit den dazugehörigen hydraulischen, pneumatischen oder elektrischen Antrieben (siehe Abbildung 6.1) eingesetzt. Die Auslegung dieser Stellgeräte ist ebenfalls von der gewünschten Regelgüte und den Prozeßbedingungen abhängig. Nachfolgend sind

einige für die Auslegung der Stellglieder notwendige Kriterien aufgelistet.

6.1.1 Kriterien für die Stellglieder

Aus folgenden Prozeßgrößen können die Kriterien, die ein Stellglied erfüllen soll, abgeleitet werden.

- maximaler Durchfluß (mit steigendem Durchfluß - Auswahl von Regelventil, Stellhahn, Schieber oder Klappe)
- Druckdifferenz
- Medientemperatur und Medienbesonderheiten (z.B. Viskosität, Festkörperbestandteile)
- Leckdurchfluß
- Sonderanforderungen (z.B. Schallentwicklung, Werkstoffauskleidung)

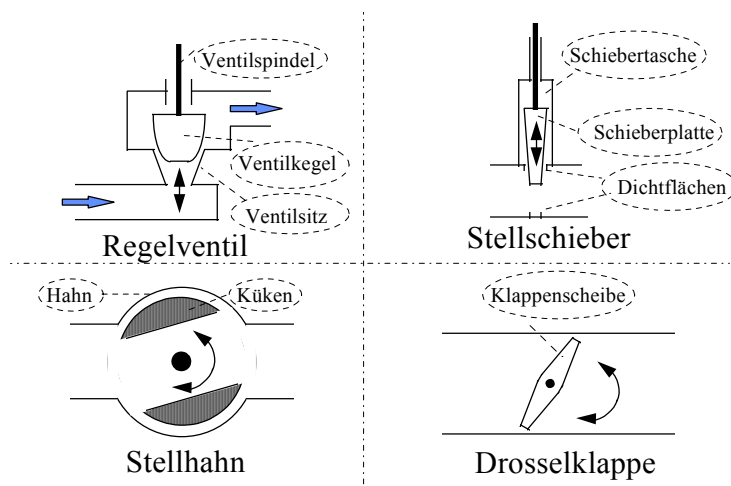


Abbildung 6.2: Stellglieder für Durchfluß und Druck

In Abbildung 6.2 sind die 4 Arten der Stellglieder für die Durchfluß- oder Druckregelung schematisch dargestellt. Für jede dieser 4 Stellglieder können unzählige verschiedene Bauformen unterschieden werden, die wiederum spezielle Eigenschaften besitzen und sich daher für besondere Einsatzfälle eignen. In den nachfolgenden Kapiteln

werden die wichtigsten Kriterien, die bei der Auslegung von Stellgliedern zu beachten sind, vorgestellt und erläutert.

6.1.1.1 Die k_V -Werte des Stellgliedes

Der k_V -Wert kann als veränderlicher Rohrwiderstand betrachtet werden und beschreibt die Durchflußeigenschaften des Stellgliedes in Abhängigkeit vom Stellhub. Der k_V -Wert wird nach VDI/VDE 2173 bestimmt und entspricht dem Durchfluß von Wasser unter Normbedingungen (Temperatur 5...30°C; Differenzdruck über Ventil 1 bar; Einlaufstrecke 20D; Auslaufstrecke 15D). Die Ventilparameter K_{VS} und K_{VR} entsprechen dem Durchfluß beim größten bzw. kleinsten Nennhub, bei denen der k_V -Wert die festgelegten Toleranzen der Ventilkennlinie einhält. Die so bestimmten k_V -Werte beschreiben die strömungstechnischen Eigenschaften des realen Stellgliedes.

Aus dem K_{VS} - und K_{VR} -Wert läßt sich das Stellverhältnis eines Stellgliedes ableiten, welches den Stellbereich des Durchflusses darstellt und vergleichbar ist mit dem Meßbereich eines Sensors. Das Stellverhältnis entspricht dem Verhältnis von K_{VS} - zu K_{VR} -Wert.

Zwischen dem k_V -Wert und dem Hub bzw. Drehwinkel (bei Hahn oder Klappe) besteht ein Zusammenhang, der spezifisch für jedes Stellglied in Kennlinien hinterlegt ist. In der Praxis haben sich zwei Grundkennlinien durchgesetzt. Dies sind die lineare und die gleichprozentige Kennlinie, wie sie in Abbildung 6.3 für die Stellverhältnisse von 25 bzw. 50 dargestellt sind.

Bei linearen Stellgliedern ändert sich der Durchfluß linear in Abhängigkeit vom Stellhub. Dies hat zur Folge, daß sich kleine Durchflüsse schlecht einstellen lassen. Daher werden häufig Stellglieder mit einer gleichprozentigen Kennlinie eingesetzt. Bei diesen Stellgliedern führt eine prozentuale Änderung des Stellhubs zur gleichen prozentualen Änderung des Durchflusses.

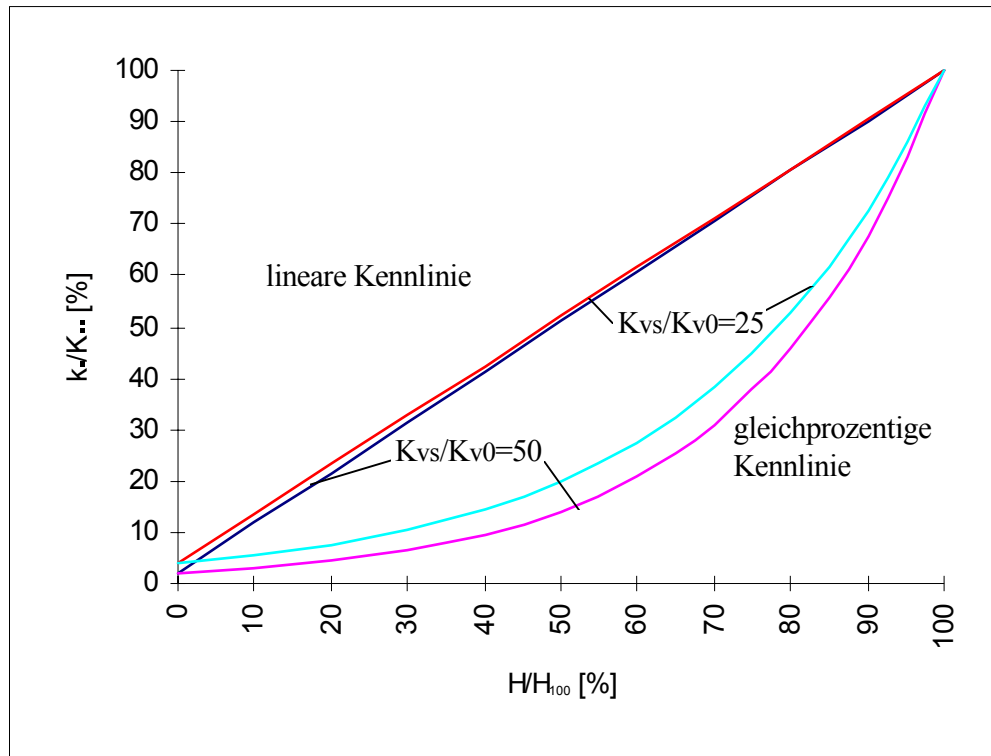


Abbildung 6.3: Ventilkennlinie

6.1.1.2 Strömungstechnische Kenngrößen

Neben dem k_v -Wert sind folgende Gesichtspunkte bei der richtigen Auswahl des Stellgliedes zu berücksichtigen.:

- Kavitation - führt zu einer verstärkten Geräuschemission, mechanischen Beanspruchung und Durchflußbegrenzung im Stellglied und kann durch Wahl des geeigneten Stellgliedes verhindert werden;
- Schallgeschwindigkeit im Stellglied - gleiche Wirkung wie bei Kavitation, tritt bei Gasen auf;
- Erosion und Abrasion - Abtragen der Oberfläche im Stellglied, verursacht durch Feststoffteile oder Wassertropfen in gasförmigen Medien;
- Vibrationen im Stellglied - Geräuschemission und mechanische Beanspruchung, verursacht durch oszillierende Strömungen;

- Wasserschlag - Zerstörung der Stellglieder durch zu schnelles Absperrn schnell fließender Medien (Faustformel aus der Chemie: $\text{Absperrzeit[s]}=1,4 \cdot \text{Strömungsgeschwindigkeit[m/s]}$);

Die aufgezählten Einflußfaktoren sind stellgliedspezifisch und bilden die Grundlage für die richtige Auswahl eines Stellgliedes entsprechend den Anforderungen, die durch die Regelaufgabe an das Stellglied gestellt werden. Über diese Daten der Stellglieder kann der Stellgliedproduzent genaue Angaben machen.

Der Anlagenprojektant benötigt Hilfsmittel, um aus den Anlagendaten die Werte zu bestimmen, mit denen der Stellgliedproduzent unter Beachtung der oben genannten Einflußfaktoren das richtige Stellglied auswählen kann.

6.1.2 Bestimmung von Kenngrößen aus Anlagendaten

Wie in Kapitel 6.1.1.1 beschrieben, bestimmt der Hersteller für jedes Stellglied die k_v -Werte und die dazugehörige Kennlinie. Welche k_v -Werte die MSR-Aufgabe erforderlich macht, muß aus den Anlagendaten über Näherungsformeln bestimmt werden.

Da bei Ventilen Sitz und Kegel gewechselt werden können, ist es oft einfacher, zu erst die Ventilauslegung mit Hilfe der Formeln 5.1 bis 5.6 abzuschätzen und falls die Stellglieder nicht das gewünschte Regelverhalten haben, diese zu wechseln. Anders sieht das bei Klappen und Hähnen aus. Diese Stellglieder müssen schon in der Planungsphase richtig ausgelegt werden, da sonst die gesamte Armatur mit Antrieb gewechselt werden muß.

Es werden Näherungsformeln für inkompressible Medien (Flüssigkeit) und kompressible Medien (Gas und Dämpf) unterschieden. Bei inkompressiblen Medien werden folgende Anlagendaten zur Bestimmung der k_v -Werte benötigt.:

- q - Durchfluß [m^3/h] (für den K_{VS} -Wert den maximalen Durchfluß q_v)
- Δp - Druckabfall bei Durchfluß q [bar] (für den K_{VS} -Wert den minimalen Druckabfall Δp_M)
- ζ_n - Dichte des Mediums bei Normzustand [kg/m^3]

Bei kompressiblen Medien sind zusätzlich noch folgende Daten zur Bestimmung der k_v -Werte notwendig.:

- p_1 - Vordruck [bar Abs.] (für den K_{VS} -Wert der minimale Vordruck)
- p_2 - Nachdruck [bar Abs.] (für den K_{VS} -Wert der maximale Nachdruck)
- T - absolute Temperatur des Mediums [$^{\circ}\text{K}$]

Mit Hilfe der Näherungsformeln nach VDI/VDE 2173 und den beschriebenen Anlagendaten lassen sich wie folgt die k_v -Werte und der K_{VS} -Wert für inkompressible Medien abschätzen.:

$$k_v = 0,032q \sqrt{\frac{\zeta_n}{\Delta p}} \quad (6.1)$$

$$K_{VS} = 0,032q_v \sqrt{\frac{\zeta_n}{\Delta p_M}} \quad (6.2)$$

Bei kompressiblen Medien müssen bei der Abschätzung der k_V -Werte bzw. dem K_{VS} -Wert zwei Zustände unterschieden werden, die durch die unterkritische und überkritische Entspannung des Mediums hinter dem Drosselgerät entstehen. Diese Entspannungen können zum Erreichen der Schallgeschwindigkeit des Mediums im Drosselgerät führen, was bei der Auslegung der Stellglieder verhindert werden muß (siehe Kapitel 6.1.1.2.). Die Unterscheidung nach unterkritischer und überkritischer Entspannung kann durch das Druckverhältnis p_2/p_1 vorgenommen werden (Stellgliedern mit unterkritischer Entspannung - Druckverhältnis p_2/p_1 größer 0,5). Daher ergeben sich für die kompressiblen Medien folgende Formeln.:

- unterkritische Entspannung

$$k_v = 0,002q \sqrt{\frac{\zeta_n T}{\Delta p p_2}} \quad (6.3)$$

$$K_{VS} = 0,002q_v \sqrt{\frac{\zeta_n T}{\Delta p_M p_2}} \quad (6.4)$$

- überkritische Entspannung

$$k_v = \frac{q}{260 p_1} \sqrt{\zeta_n T} \quad (6.5)$$

$$k_v = \frac{q_v}{260 p_1} \sqrt{\zeta_n T} \quad (6.6)$$

Sollte es notwendig sein, die Durchflußkapazität der Stellglieder genauer zu berechnen, so können der internationalen Norm nach DIN IEC 534, in der ebenfalls nach kompressiblen und inkompressiblen Medien unterschieden wird, die entsprechenden Formeln entnommen werden. In dieser Norm werden bei der Berechnung der k_V -Werte auch die Einflüsse der Zähigkeit der Medien in Form des Reynoldsfaktors F_R , der unterschiedlichen Nennweiten von Stellglied und Rohrleitung als Rohrleitungsfaktor F_P , die Durchflußbegrenzung durch die Kavitation bzw. Flashing durch die Faktoren F_L und F_F , die Erhöhung des Strömungswiderstandes durch die Ausdehnung der Gase bei Entspannung durch den Expansionsfaktor Y und dem Realgasfaktor Z berücksichtigt. Nähere Informationen zu dieser Norm können [7 bis 9] entnommen werden.

Bei der Berechnung der k_V -Werte müssen des weiteren die Auslegung der Pumpen und die Druckabfälle an der Regelstrecke mitberücksichtigt werden. Wir können Regelstrecken mit statischem und dynamischen Druckverlust unterscheiden. Regelstrecken mit statischem Druckverlust sind z.B. Strecken mit reiner Füllstandsregelung, siehe Abbildung 7.6. Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust sind z.B. Strecken mit Wärmetauscher, siehe Abbildung 7.8. Beispiele zur Berechnung von Stellgliedern an Strecken mit statischem und dynamischem Druckverlust sind in Kapitel 7.2.2 beschrieben.

7 Applikationen

7.1 Die Neutralisation

Eine sehr schwierige Regelung in der Wasseraufbereitung stellt die Neutralisation dar, da diese sehr stark nichtlinear ist. Eine weitere Schwierigkeit bei der pH-Wert-Regelung ist die große auftretende Totzeit, die durch die chemischen Reaktionszeit und Durchmischungszeit entsteht. Da der pH-Wert und der Pufferfaktor α der wäßrigen Lösung im Betrieb stark unterschiedlich sein können, ist eine Linearisierung um einen Arbeitspunkt nicht möglich.

Normalerweise ist die Neutralisation ein Bestandteil einer komplexen Wasseraufbereitungsanlage, die als weitere Anlagenteile Filter, Ionenabscheider, Dosieranlagen u.s.w. enthalten kann. In diesem Kapitel wird nur für den Anlagenteil Neutralisation und da speziell für die pH-Wert-Regelung eine innovative Lösung vorgestellt, die durch Anwendung eines steuerbaren PI-Reglers (siehe Kapitel 4.4.2.1) mit Smith-Prädiktor (siehe Kapitel 4.2.4) die Regelgüte dieser schwierigen Regelung verbessert. In der gesamten Anlage der Neutralisation werden neben der pH-Wert-Regelung folgende Größen ebenfalls überwacht und gesteuert.:

- der Füllstand im Neutra-Behälter;
- die Füllstände in den Behältern der Neutralisationsmittel;
- Ansteuerung und Überwachung von Pumpen für die Neutralisationsmittel und die Umwälzung des aufzubereitenden Wassers;
- Ansteuerung und Überwachung von Notabschaltventilen für die Neutralisationsmittel;
- Ansteuerung und Überwachung des Notabschaltventils im Umlaufkreislauf;
- Steuerung des Ablaßventils;
- Ansteuerung und Überwachung des Notabschaltventils bei pH-Grenzwertüberschreitung im Ablaßkanal

Da nachfolgend nur die pH-Wert-Regelung ohne Notabschaltungen und Auswertung von Statussignalen beschrieben werden soll, ist in Abbildung 7.1 eine Neutralisation, wie sie in der Industrie (z.B. Kraftwerke) eingesetzt wird, schematisch ohne Berücksichtigung der Notabschaltventile dargestellt. Für die eigentliche pH-Wert-Regelung der Neutralisationsanlage werden nur der pH-Wert als Eingangsgröße und zwei binäre Ausgänge eines doppelten Zweipunktregler betrachtet. Die Auslegung der Stellglieder ist in diesem Fall kein großes Problem, da die eingesetzten Stellglieder nur AUF-ZU-Funktionen erfüllen. Auf die Steuerung der Pumpen bzw. der Ablaß- und Umlaufventile, die Füllstandsüberwachungen, die Verbindung der einzelnen Wasseraufbereitungsbestandteile untereinander und die Buskopplung an die übergeordnete Leittechnik wird am Ende dieses Kapitels kurz eingegangen.

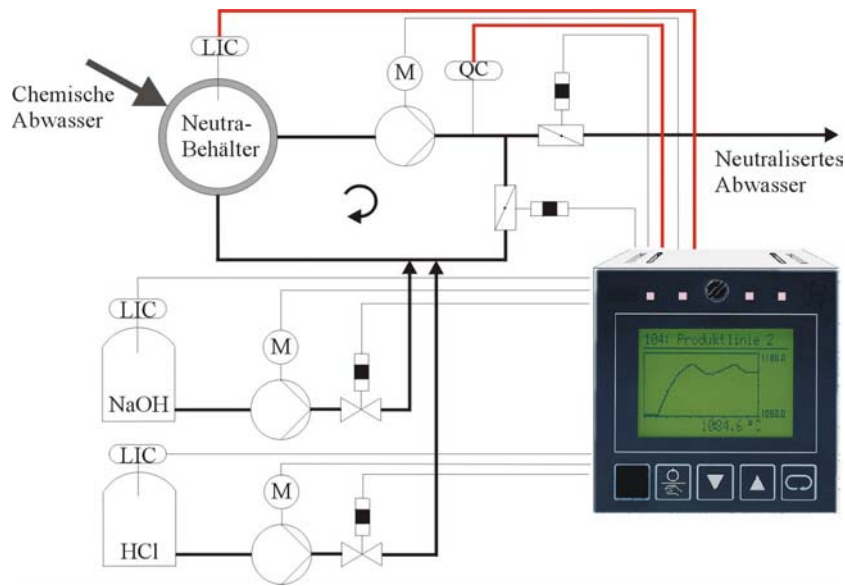


Abbildung 7.1: Neutralisationsanlage

In der Regel wird eine solche Anlage komplett durch eine SPS gesteuert und geregelt. Teilweise wird die Regelung der Neutralisation an einen langsamen I-Regler ausgelagert. Viele wissenschaftliche Arbeiten haben sich mit dieser schwierigen Regelaufgabe befaßt und häufig wurde eine Verbesserung der Regelung

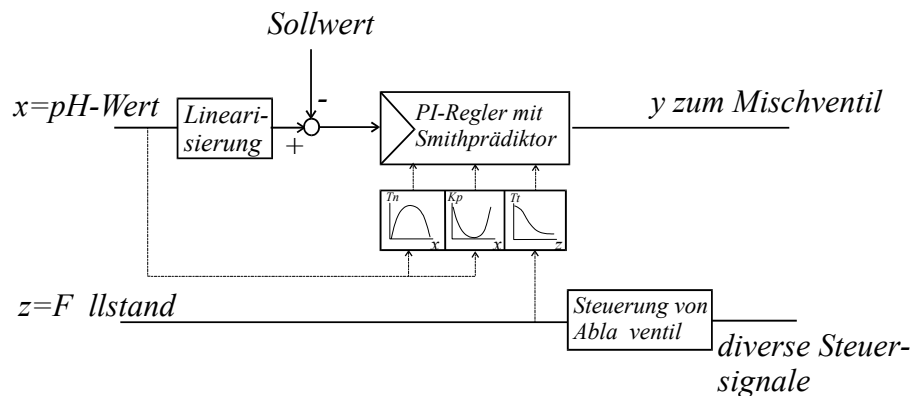


Abbildung 7.2: Regelungsstruktur einer Neutralisation

durch den Einsatz von FUZZY- oder FUZZY-adaptiven Regelungen erzielt [3].

In Abbildung 7.2 ist die Regelung des pH-Wertes mittels steuerbaren PI-Regler mit Smith-Prädiktor dargestellt. Die Hauptprobleme dieser Regelung besteht in der Festlegung der Funktionen der Abhängigkeit der Nachstellzeit T_n und der Reglerverstärkung K_p vom pH-Wert, sowie der Festlegung der Parameter der Linearisierung. Diese Linearisierung rechnet den pH-Wert entsprechend der Titrationskurve nach Abbildung 7.3 und Gleichung 6.1 in die Konzentration c_{diff} um. Dadurch wird eine gewisse Linearisierung der Regelung vorgenommen.

$$c_{diff} = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{\text{pH}_{Grenz}} (\text{pH} - 7)\right)}{\alpha} \quad (7.1)$$

Wobei pH_{Grenz} der Spanne des pH-Wertes entsprechend Gleichung 6.2 entspricht.

$$pH_{\text{Grenz}} = pH_{\text{Max}} - pH_{\text{Min}} \quad (7.2)$$

Der Abbildung 7.3 und der Gleichung 6.1 ist zu entnehmen, daß sich auch die Form

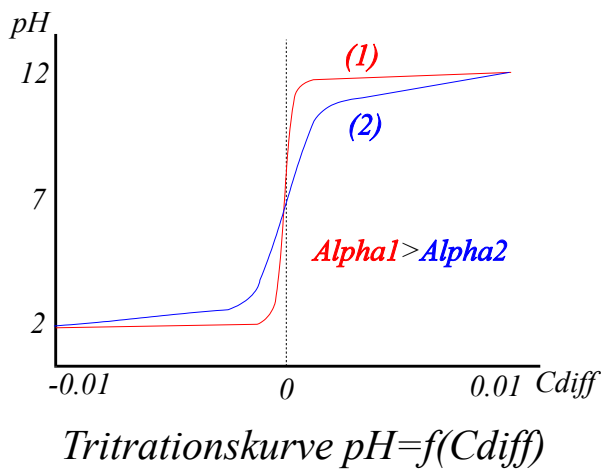


Abbildung 7.3: Tritrationskurve

der Tritrationskurve in Abhängigkeit vom Pufferfaktor α ändert, wobei aber dieser Pufferfaktor nicht meßbar ist. Daher sollte vom „worst case“-Fall ausgegangen werden, der den steilsten Verlauf und damit den am geringsten gepufferten Zustand der Lösung beschreibt. Dieser Zustand ist der regelungstechnisch schwierigste, da der pH-Wert der Neutra-Lösung sehr schnell von Basisch in Sauer und umgekehrt umschlagen kann.

Eine weiteres Problem ist die Festlegung der Steuerung der Totzeit

T_{tot} des Smith-Prädiktors, da verschiedene Faktoren darauf Einfluß haben. Diese Faktoren können in Abhängigkeit von der Anlage folgende Einflußgrößen sein. :

- Durchmischungsgeschwindigkeit v_M im Behälter (z.B. mit und ohne Rührwerk)
- Chemische Reaktionszeit t_R
- Füllstand h im Behälter
- Meßzeit des Sensors t_M

Diese Einflußfaktoren müssen je nach Intensität und Meßbarkeit zur Korrektur der Totzeit T_{tot} herangezogen werden, da es einen direkten Zusammenhang nach der Formel $T_{\text{Tot}}=f(h, v_M, t_R, t_M)$, der aus Meßreihen experimentell entsprechend Abschnitt 4.3.3.2 ermittelt werden kann, gibt. Eine Vereinfachung ist dahingehend möglich, daß der Einfluß der Reaktionszeit t_R , Meßzeit t_M und der Durchmischungsgeschwindigkeit v_M einer Anlage als Konstante K angenommen wird. Dadurch ist die Totzeit T_{tot} nur noch von der veränderlichen Größe Füllstand nach der Formel $T_{\text{tot}}=f(h)$ abhängig, da die Durchmischung der Lösung mit dem Neutralisationsmittels in einem kleinen Volumen schneller erfolgt als in einem großen Volumen.

Die optimale Bestimmung einer solchen Reglerstruktur ist genauso wie die Optimierung einer FUZZY-Struktur nur über die Bestimmung eines Regelstreckenmodells an Hand von Meßreihen und anschließender Berechnung der Reglerparameter entsprechend Abbildung 7.4 möglich. [4]

Eine Verbesserung der Regelgüte der pH-Wert-Regelung läßt sich schon entsprechend Kapitel 4.4.2.1 nach folgenden Einstellungen wesentlich verbessern.:

1. Umrechnung des Meßwertes pH-Wert in die Konzentration c_{diff} durch Nutzung eines Linearisierungsbausteines im Universalregler entsprechend der Tritrationskurve.

2. Festlegung der linearen Veränderung der Reglerparameter K_P und T_n entsprechend Kapitel 4.4.2.1, Abbildung 4.22.
3. Festlegung der Veränderung der Totzeit T_{tot} , abgeleitet aus den Erfahrungswerten des Anlagenfahreres oder ausgewerteter Meßreihen.

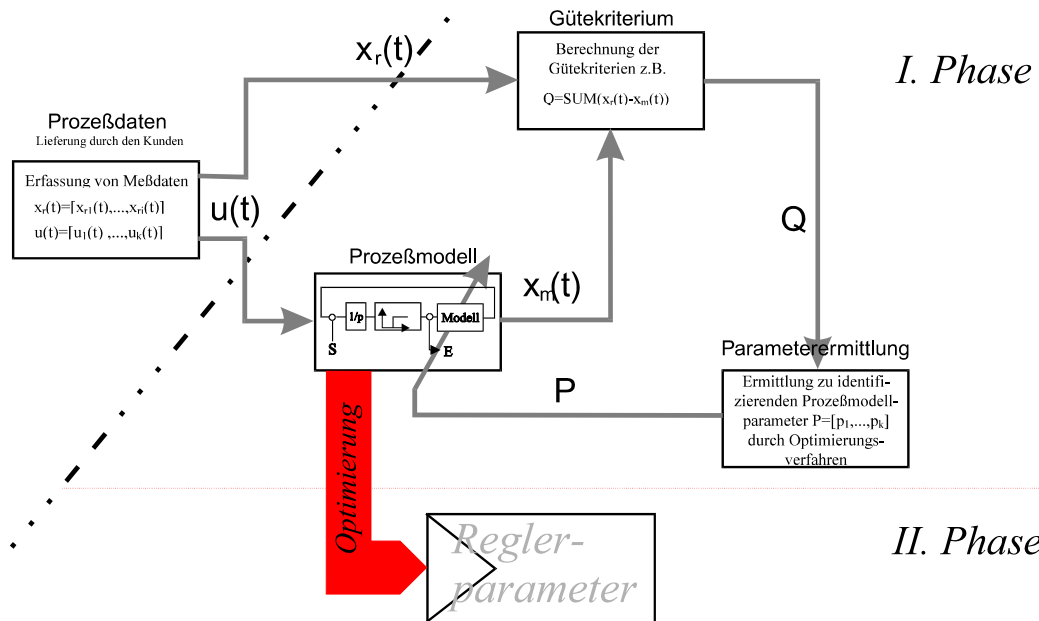


Abbildung 7.4: Vorgehensweise bei der Optimierung

Ähnlich lassen sich diese Regelalgorithmen auch auf die pH-Wert-Regelung im Überlaufbecken nach Abbildung 7.5 anwenden. Dieser Aufbau wird in der Regel in Kläranlagen eingesetzt und auf Grund des überdimensionierten Beckens ist eine optimale Regelung der Neutralisation in Altanlagen nicht notwendig. Anders sieht das bei der Neukonzeption aus, bei der viel Beton, durch den Einsatz verbesserter Regelungstechnik, gespart werden könnte.

Durch den Einsatz solcher Regelungen, kann die Neutralisationszeit um den Wert 2 bis 10 verringert werden.

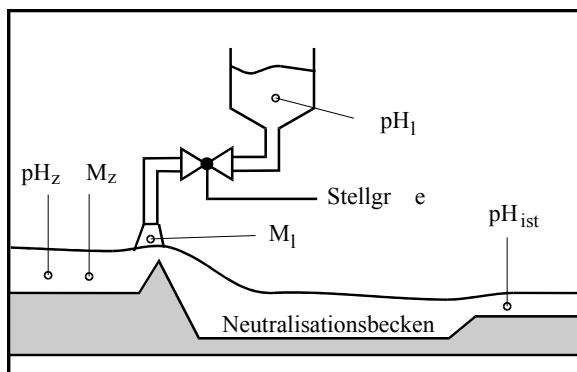


Abbildung 7.5: Durchflußneutralisation

bis 10 verringert werden. Durch die Verringerung der Neutralisationszeit kann auch die Durchlaufzeit des Abwassers verkürzt werden. Daher ist kein so großes Staubecken für das Abwasser notwendig, wodurch wiederum die Größe der Neutralbehälter kleiner ausgelegt werden kann.

Diese Maßnahmen führen für den Anlagenbetreiber in der Investitionsphase und vor allem in der

Betriebsphase zu enormen Kosteneinsparungen.

Oft kommt der Einwand "Warum soll ich einen Regler zur Steuerung der Neutralisation einsetzen, ich habe eine SPS und DIE KANN ALLES". Eine SPS hat

nur kein Bedienpanel und der gesamte Regelkreis muß komplett programmiert werden. In der heutigen Zeit gibt es Regler mit SPS-Funktionen, die das SPS-Konzept Steuerung mit Reglerbaustein umkehren. Dadurch ergeben sich gegenüber einer SPS folgende Vorteile:

- Bedienung und Visualisierung wie bei einem Universalregler (reglertypische Bedienbarkeit);
- Vorkonfigurierte Regelungsstrukturen (Zeiteinsparungen bei Inbetriebnahme);
- Verarbeitung von bis zu 160 analoge oder 240 binäre I/O-s (SPS-Charakter);
- Konfigurierung aller Steuerungsaufgaben wie bei SPS (Funktionsbausteinplan);
- Kopplung über Bussysteme, wie PROFIBUS DP, CAN oder Interbus S;

Daher sind solche Geräte in der Lage, komplexe Regelungs- und Steuerungsaufgaben mit Überwachung und Notabschaltung, wie bei der beschriebenen Neutralisation oder sogar in einem gesamten Wasserwerk oder einer Wärmeübergabestation, zu beherrschen. Durch das vorhandene Bedienpanel ist eine Vorortüberwachung der gesamten Anlage möglich. Durch den Einsatz von Bussystemen ist auch die Fernüberwachung der gesamten Anlage realisierbar. Ein solches Gerät ist im Anhang näher beschrieben.

Die beschriebene Lösung ist mit einem Gerät der Firma PMA Prozeß- und Maschinen- Automation GmbH ohne spezielle Compiler oder große Softwareprogrammierung realisierbar (siehe Anhang).

7.2 Stellglieder an Regelstrecken mit statischem oder/und dynamischem Druckverlust

Wie schon in Kapitel 6.1.2 beschrieben, sind zur Festlegung des optimalen Differenzdrucks am Stellglied neben den Anlagendaten auch die Auslegung der Pumpen von Bedeutung. In der Regel werden in verfahrenstechnischen Anlagen Pumpen oder Verdichter zur Durchflußerzeugung genutzt. Die so bewegten Medien durchströmen Regelstrecken mit statischem-, dynamischen- oder statischen und dynamischen Druckverlust. Dieses Kapitel soll zeigen, daß die Auslegung eines Regelventils für eine Regelstrecke mit statischen Druckverlust wesentlich einfacher ist, als für Regelstrecken mit dynamischen- oder statischen und dynamischen Druckverlust. Bei der Berechnung der Parameter eines Stellgliedes für Regelstrecken mit statischem und dynamischem Druckverlust wird man feststellen, daß die statischen Druckabfälle keinen Einfluß auf das Berechnungsergebnis haben.

7.2.1 Stellglieder an Regelstrecken mit statischem Druckverlust^[1]

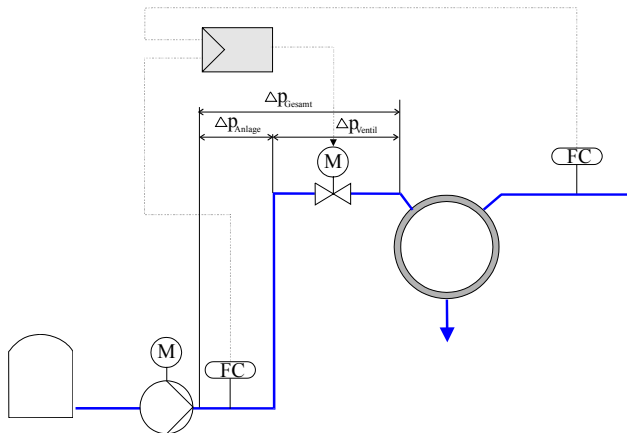


Abbildung 7.6: Regelstrecke mit statischem Druckverlust

Regelstrecken mit statischem Druckverlust zeichnen sich dadurch aus, daß der auftretende Druckverlust über der Strecke vom Durchfluß unabhängig ist. Eine solche Strecke ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Das dargestellte Regelventil dient zur Durchflußregelung bei einer Verhältnisregelung. Wichtig für die Auslegung der Regelarmatur ist neben der Förderhöhe auch die Förderleistung der eingesetzten

Pumpe. Die Förderleistung der Pumpe bestimmt wesentlich den auszulegenden K_{VS} -Wert, hat aber keinen Einfluß auf das Stellverhältnis.

Da der Druckabfall über der Regelstrecke über den gesamten Durchflußbereich konstant ist und die Pumpenleistung als konstant angenommen werden kann, ergibt sich über dem Stellglied ebenfalls ein konstanter Druckabfall. Die Größe des Druckabfalls kann über die Pumpenleistung in einer vorhandenen Anlage variiert werden.

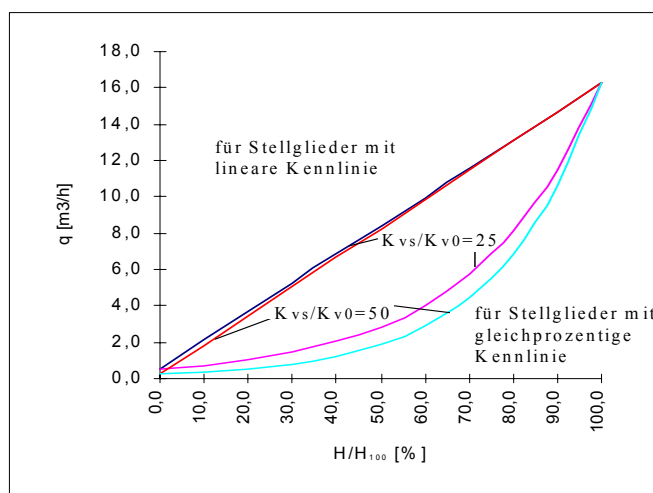


Abbildung 7.7: Betriebskennlinie bei Regelstrecken mit statischem Druckabfall

Ausgehend vom theoretisch am Regelventil auftretenden Druckverlust und der Dichte des Mediums kann der K_{VS} -Wert, für den maximalen Durchfluß entsprechend Gleichung 5.2 bzw. der K_{V0} -Wert, für den minimalen Durchfluß entsprechend Gleichung 5.1 berechnet werden. Die Kenngrößen des zu wählenden Regelventils müssen diesen beiden K_V -Werten und damit dem sich daraus ergebende Stellverhältnis, entsprechen. Normalerweise wählt man den K_{VS} -Wert eine Nummer

höher als den berechneten K_{VS} -Wert. Daher kann aus der Ventilkennlinie $k_V=f(H)$ direkt die Betriebskennlinie $q=f(H)$ entsprechend Abbildung 7.7 in normierter Form abgeleitet werden.

Da die so ermittelten Betriebskennlinien der Stellglieder häufig nichtlinear sind, sollte der Stellungsregler oder Universalregler in der Lage sein, diesen Einfluß mit Hilfe von Linearisierungstabellen zu kompensieren.

7.2.2 Stellglieder an Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust[1]

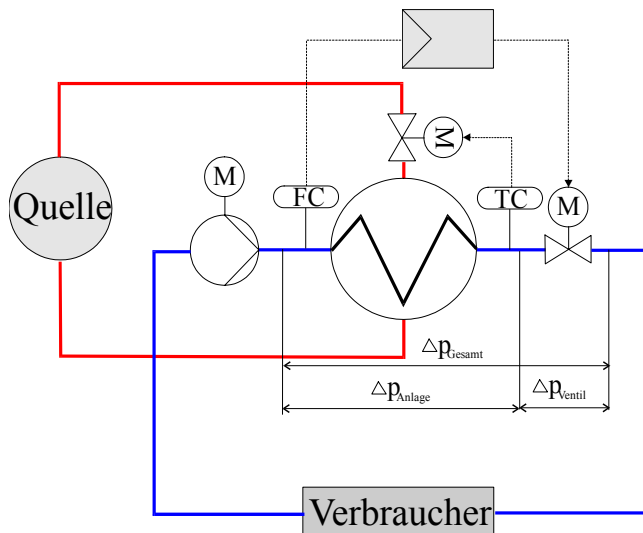


Abbildung 7.8: Regelstrecke mit dynamischem Druckabfall

Wie in Kapitel 7.2.1 gezeigt, ist die Bestimmung des Stellgliedes bei Regelstrecken mit statischem Druckverlust relativ problemlos, da der Druckabfall über dem Stellglied unabhängig vom Durchfluß ist. Anders sieht dies bei den Regelstrecken mit dynamischen Druckverlust aus. Der dynamische Druckverlust an Regelstrecken entstehen, wenn Flüssigkeiten oder Gase gegen einen Strömungswiderstand

gefördert werden. Ein solcher Strömungswiderstand kann ein

Wärmetauscher, wie in Abbildung 7.8 dargestellt, sein. Die Änderung des Druckabfalles über dem Wärmetauscher in Abhängigkeit vom Durchfluß $\Delta p = f(q)$, führt zu einem veränderlichen Druckabfall über dem Regelventil. Dies hat zur Folge, daß sich die Betriebskennlinien $q=f(H)$ in Abhängigkeit von der Pumpenleistung entsprechend Abbildung 7.9 stark verzerren.

In Tabelle 7.1 sind für die Regelstrecken mit statischem Druckabfall entsprechend Abbildung 7.6 und dynamischem Druckabfall entsprechend Abbildung 7.8 zur besseren Erläuterung eine Beispielberechnung von theoretischen Stellgliedparametern für folgende Anlagenparameter dargestellt.:

- Durchflußbereich 1...10 m³/h
- Förderhöhen Δp_{Gesamt} der Pumpe bei Regelstrecke mit statischem Druckverlust gleich 3bar und bei Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust zusätzlich 2,2bar und 2,4bar.
- Dichte der Flüssigkeit 1000 kg/m³
- $\Delta p_{Anlage} = 2bar$ bei Regelstrecke mit statischem Druckverlust und
 $\Delta p_{Anlage} = 2 \frac{q^2}{q_{max}^2}$ bei Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust.

		statisch	dynamisch		
q[m ³ /h]		$\Delta p_{Gesamt} = 3bar$	$\Delta p_{Gesamt} = 2,2bar$	$\Delta p_{Gesamt} = 2,4bar$	$\Delta p_{Gesamt} = 3bar$
10	Δp_{Anlage}	2	2	2	2
	Δp_{Ventil}	1	0,2	0,4	1
	k_V	10	22,4	15,8	10
	$K_{VS} (gewählt)$	16	35	25	16
	k_V / K_{VS}	0,63	0,64	0,63	0,63
3	Δp_{Anlage}	2	0,18	0,18	0,18
	Δp_{Ventil}	1	2,02	2,22	2,82
	k_V	3	2,1	2	1,8
	k_V / K_{VS}	0,1875	0,06	0,08	0,11
2	Δp_{Anlage}	2	0,08	0,08	0,08
	Δp_{Ventil}	1	2,12	2,32	2,92
	k_V	2	1,4	1,3	1,2
	k_V / K_{VS}	0,125	0,04	0,05	0,08
1	Δp_{Anlage}	2	0,02	0,02	0,02
	Δp_{Ventil}	1	2,18	2,38	2,98
	k_V	1	0,7	0,65	0,6
	k_V / K_{VS}	0,063	0,02	0,026	0,04
	K_{VS} / K_{V0}	16	50	39	27

Tabelle 7.1: k_V -Werte und Stellverhältnisse für Stellglieder entsprechend obigen Anlagendaten [1]

Die Tabelle 7.1 zeigt, wie stark der Einfluß der Förderleistung der Pumpe auf das Stellverhältnis der Stellglieder ist. In Abbildung 7.9 sind die Betriebskennlinien für ein gleichprozentiges und ein lineares Stellglied mit einem Stellverhältnis von 50 bei einer Förderleistung von 2,2bar bzw. 3bar dargestellt.

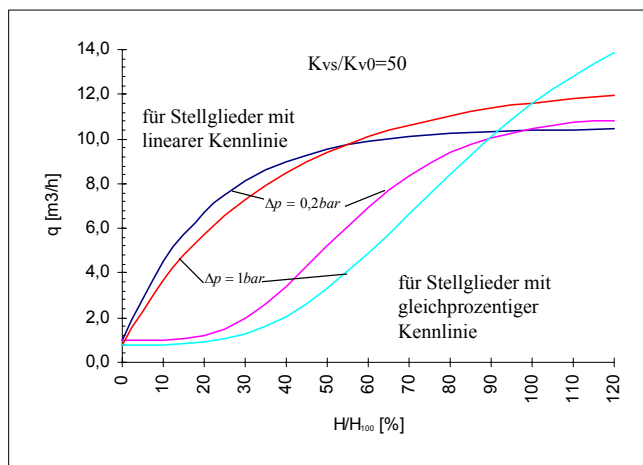


Abbildung 7.9: Betriebskennlinie des Stellgliedes an Regelstrecke mit dynamischem Druckabfall

Es ist zu erkennen, dass sich die Betriebskennlinien bei Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust sehr stark von denen mit statischem Druckverlust unterscheiden. Die Betriebskennlinien sind bei Regelstrecken mit dynamischem Druckverlust entsprechend Abbildung 7.8 sehr stark vom Druckabfall über dem Ventil und damit von der Pumpenauslegung abhängig. Natürlich haben auch die Grundkennlinien der

Stellglieder einen bedeutenden Einfluß auf die Betriebskennlinie.

In dem dargestellten Beispiel flachen im oberen Durchflußbereich die Betriebskennlinien für Druckabfälle von 0,2 bar an den Stellgliedern sehr stark ab, so daß der Durchfluß nur wenig über den Auslegungsdurchfluß überhöht werden kann. Besonders stark tritt dies bei Stellgliedern mit linearer Grundkennlinie auf. Das beste Stellverhalten ergibt sich für ein Stellglied mit einer gleichprozentigen Grundkennlinie und einem Stellverhältnis von 50, bei einem Druckabfall über dem Stellglied von einem bar.

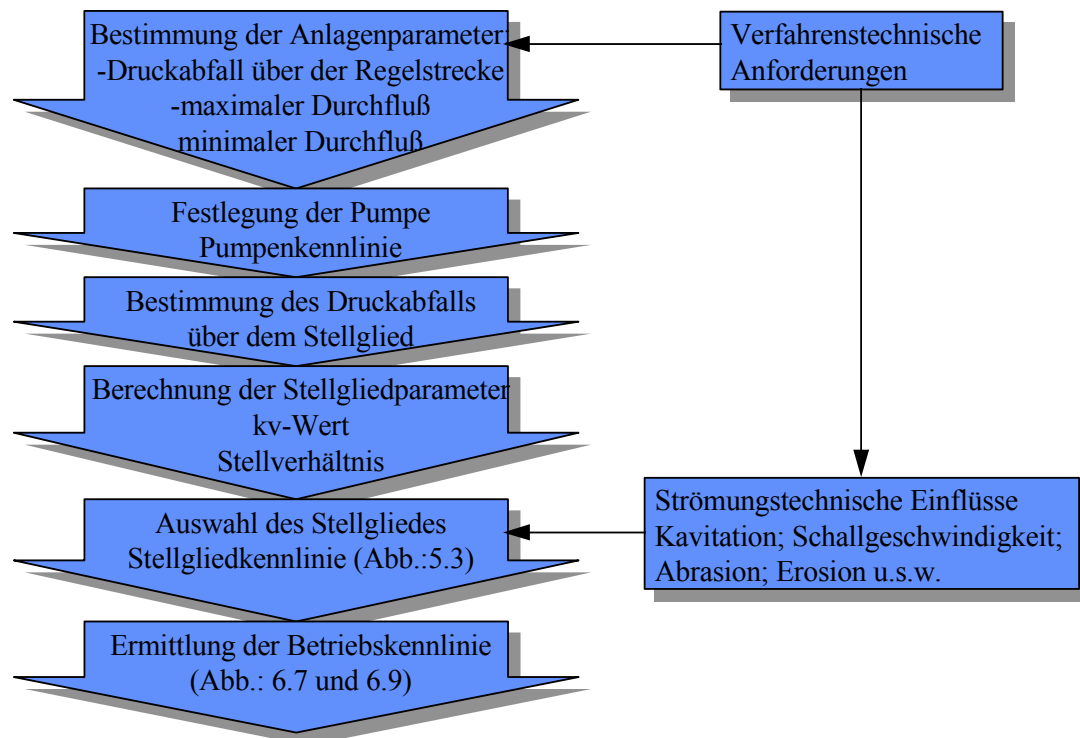


Abbildung 7.10: Ablauf bei der Festlegung des Stellgliedes

In Abbildung 7.10 ist die Vorgehensweise bei der Bestimmung des richtigen Stellgliedes aus den Anlagenparametern.

Zur Vereinfachung der Stellgliederauslegung sind wir von einer konstanten, vom Durchfluß unabhängigen Vorderleistung der Pumpe ausgegangen, was in der Praxis leider nicht der Fall ist. Dies wiederum führt zu einer weiteren Abflachung der Betriebskennlinien der Stellglieder im oberen Durchflußbereich.

8 Literaturverzeichnis

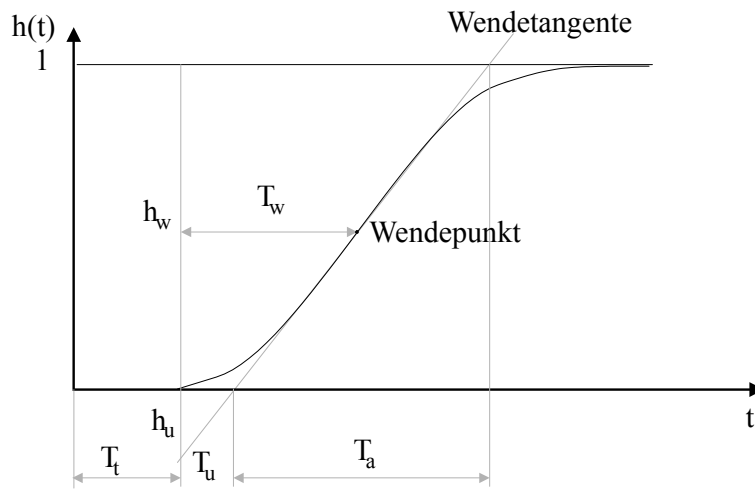
- [1] Strohmann, G.: *Automatisierungstechnik*. 1991:Oldenburgverlag
- [2] Prof. Wernstedt, J.: *Experimentelle Prozeßanalyse*. 1989: VEB Verlag Technik
- [3] Schmoranzner, St.: *FUZZY-Regelung der Neutralisation von chem. Abwässern in einem Heizkraftwerk*. 1997: Diplomarbeit TU Ilmenau
- [4] Eichhorn, M.: *Gütekriterien und Suchverfahren für Optimierung von FUZZY-Systemen*. 1994: Diplomarbeit TU Ilmenau
- [5] Fieger, K.: *Regelungstechnik, Grundlagen und Geräte*. Hartmann & Braun AG
- [6] Nehring, T.: *Modellbildung für die Temperaturkompensation einer Präzisionswaage*. 1994: Diplomarbeit TU Ilmenau
- [7] Meffle, K.: *Grundlagen zur optimalen Auslegung von Stellventilen*. atp- 29 1987: Oldenburg Verlag
- [8] DIN-IEC-Norm 534-2-1: *Stellventile für die Prozeßregelung, Durchflußkapazität, Bemessungsgleichungen für inkompressible Fluide*. Beuth Verlag
- [9] DIN-IEC-Norm 534-2-2: *Stellventile für die Prozeßregelung, Durchflußkapazität, Bemessungsgleichungen für kompressible Fluide*. Beuth Verlag
- [10] Lunze, J.: *Regelungstechnik I*. Springer Verlag
- [11] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Nauka

9 Anhang

1. Auswertung der Übertragungsfunktion - nach Strejc

Modellansätze: I) $G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$

II) $G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{(1 + pT_0)^n}$



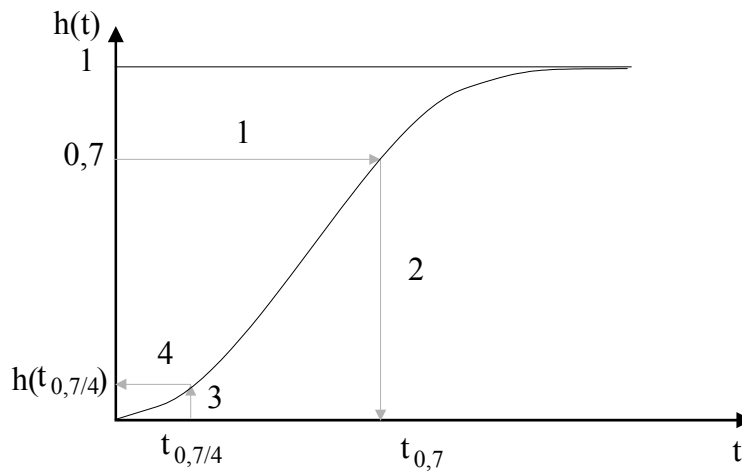
Bestimmung von: T_w, h_w, h_u, T_u, T_a

Wahl des Modelltyps:

Modell	h_w	h_u
I	$\leq 0,264$	$\leq 0,104$
II	$> 0,264$	$> 0,104$

Modellansatz I: $G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}$

Bestimmung von: T_1, T_2

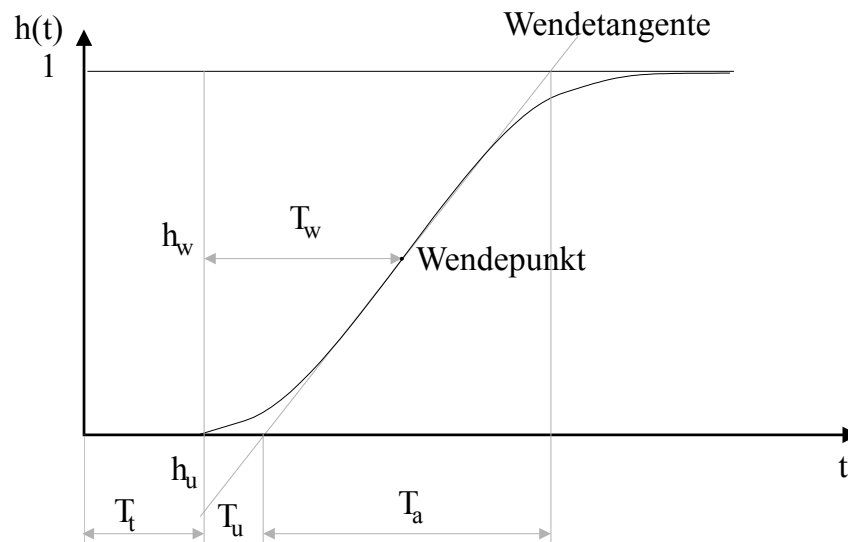


- aus $t_{0,7}=1,2(T_1+T_2)$ mit Fehler $\leq 1,7\%$ folgt $T_1 = \frac{t_{0,7}}{1,2(1 + \frac{T_2}{T_1})}$
- Verhältnis T_2/T_1 aus Tabelle
- Ermitteln von T_2

Tabelle:

$h(t_{0,7/4})$	T_2/T_1
0,260	0
0,200	0,1
0,174	0,2
0,150	0,3
0,1350	0,4
0,131	0,5
0,126	0,6
0,125	0,7
0,124	0,8
0,123	0,9
0,123	1

Modellansatz II:
$$G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{(1 + pT_0)^n}$$



Bestimmung von: n, T_0

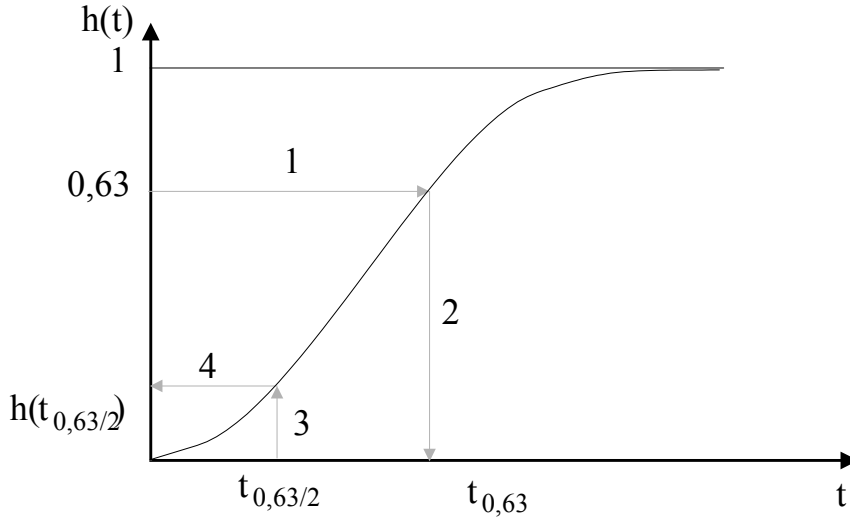
- Ermittlung von n aus Kennwerten h_u, h_w mittels Tabelle
- Ermittlung von T_0 bei bestimmten n aus den Werten T_w/T_0 oder T_u/T_0 oder T_a/T_0 mittels Tabelle

Tabelle:

n	h_u	h_w	T_w/T_0	T_u/T_0	T_a/T_0
1	0	0	0	0	1
2	0,104	0,264	1	0,282	2,718
3	0,218	0,323	2	0,805	3,695
4	0,319	0,353	3	1,425	4,463
5	0,410	0,371	4	2,100	5,119
6	0,493	0,384	5	2,811	5,699
7	0,570	0,394	6	3,549	6,226
8	0,642	0,401	7	4,307	6,711

2. Auswertung der Übertragungsfunktion - nach Radtke

Modellansatz:
$$G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{\prod_{j=1}^n (1 + p \frac{T_0}{j})}$$



Bestimmung von: n, T_0

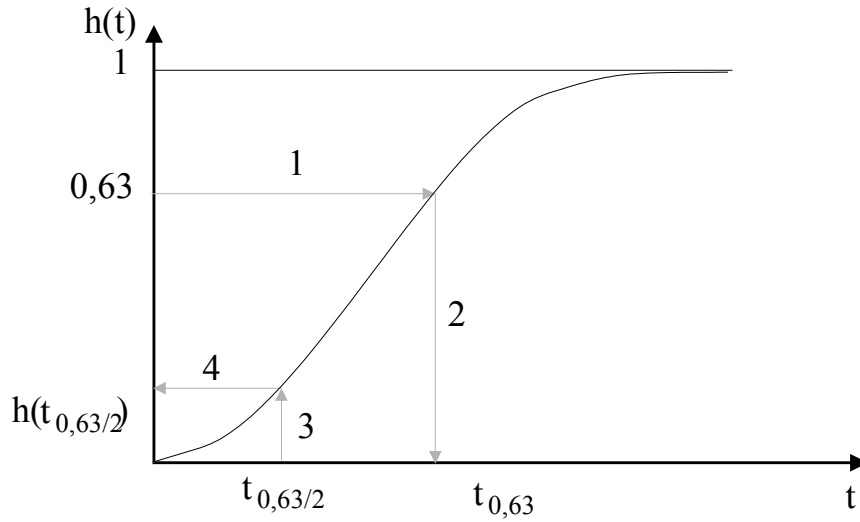
- n aus $h(t_{0,63/2})$ nach Tabelle
- $T_0 = D(n) \cdot t_{0,63}$ mit $D(n)$ aus Tabelle für n

Tabelle:

n	$h(t_{0,63/2})$	$D(n)$
1	0,392	0,957
2	0,299	0,638
3	0,242	0,522
4	0,202	0,459
5	0,173	0,419
6	0,149	0,391
7	0,129	0,368
8	0,116	0,352
9	0,103	0,338
10	0,093	0,326

3. Auswertung der Übertragungsfunktion - nach Sponer

Modellansatz:
$$G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{(1 + pT_0)^n}$$



Bestimmung von: n, T_0

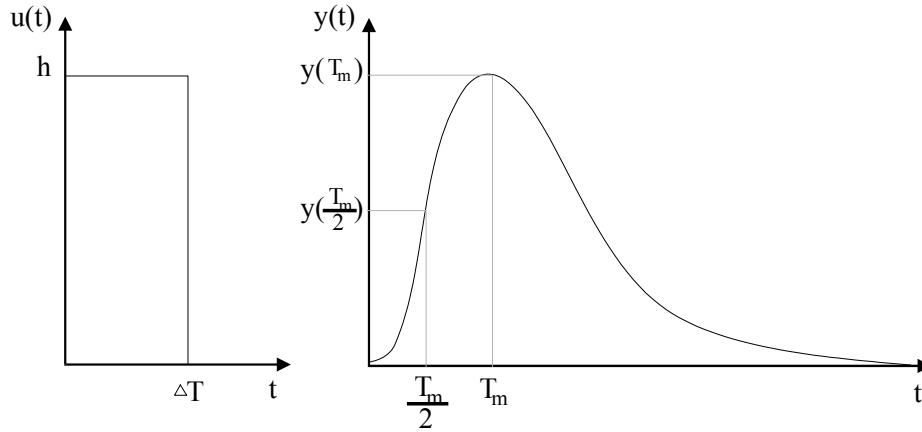
- n aus $h(t_{0,63/2})$ nach Tabelle
- $T_0 = D(n) \cdot t_{0,63}$ mit $D(n)$ aus Tabelle für n

Tabelle:

n	$h(t_{0,63/2})$	$D(n)$
1	0,392	0,957
2	0,291	0,478
3	0,224	0,319
4	0,176	0,239
5	0,139	0,191
6	0,112	0,159
7	0,089	0,137
8	0,072	0,119
9	0,058	0,106
10	0,047	0,095

4. Auswertung der Impulsantwort - Impuls (1)

Modellansatz:
$$G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{(1 + pT_0)^n}$$



Bestimmung von: n, T_0, V

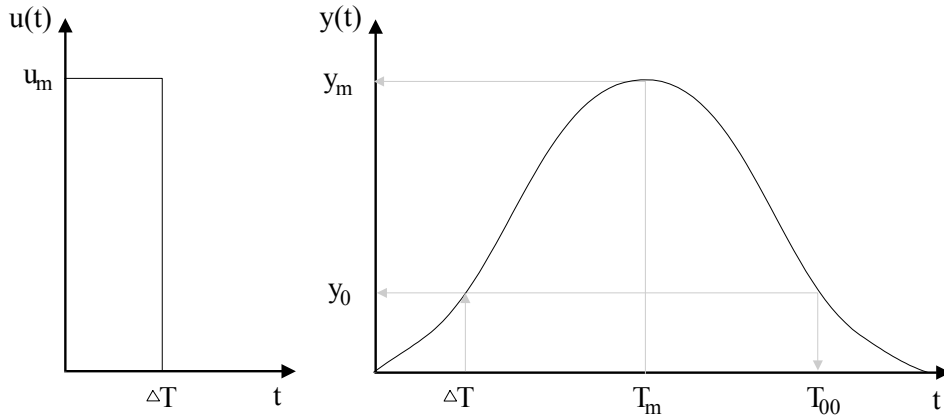
- n aus $y(T_m) / y(T_m/2)$ mit Tabelle
- T aus Verhältnis T_m/T_0 bei Vorgabe der Ordnung n aus Tabelle
- aus $c(n) = \frac{T_0 y(T_m)}{u_0 V}$ mit $u_0 = \Delta T \cdot h$ folgt aus Tabelle $V = \frac{T_0 y(T_m)}{u_0 c(n)}$

Tabelle:

$y(T_m) / y(T_m/2)$	n	T_m/T_0	$\frac{T_0 y(T_m)}{u_0 V}$
1,213	2	1	0,368
1,471	3	2	0,271
1,785	4	3	0,224
2,165	5	4	0,196
2,623	6	5	0,175
3,185	7	6	0,159

5. Auswertung der Impulsantwort - Impuls (2)

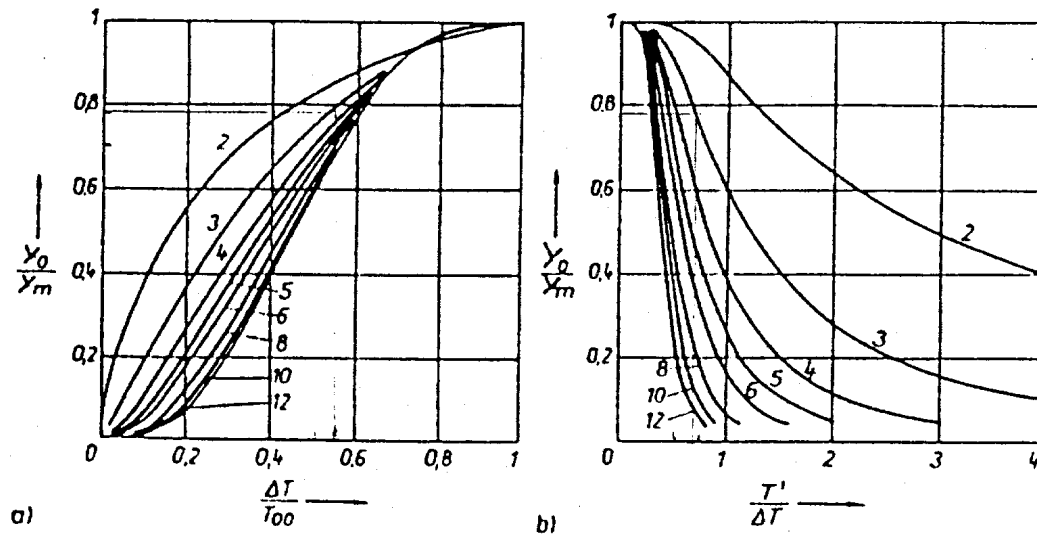
Modellansatz:
$$G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{\prod_{j=1}^n (1 + p \frac{T_0}{j})}$$



Bestimmung von: n, T_0, V

- n aus den Kennwerten y_0/y_m und $\Delta T/T_{00}$ in Diagramm a
- T_0 aus Kennwerten y_0/y_m und n (n aus Verhältnis $T_0/\Delta T$ aus Diagramm b)
- V aus $V = \frac{y_0}{h \cdot \tilde{y}_0}$ mit $\tilde{y}_0 = (1 - e^{-\frac{\Delta T}{T_0}})^n$

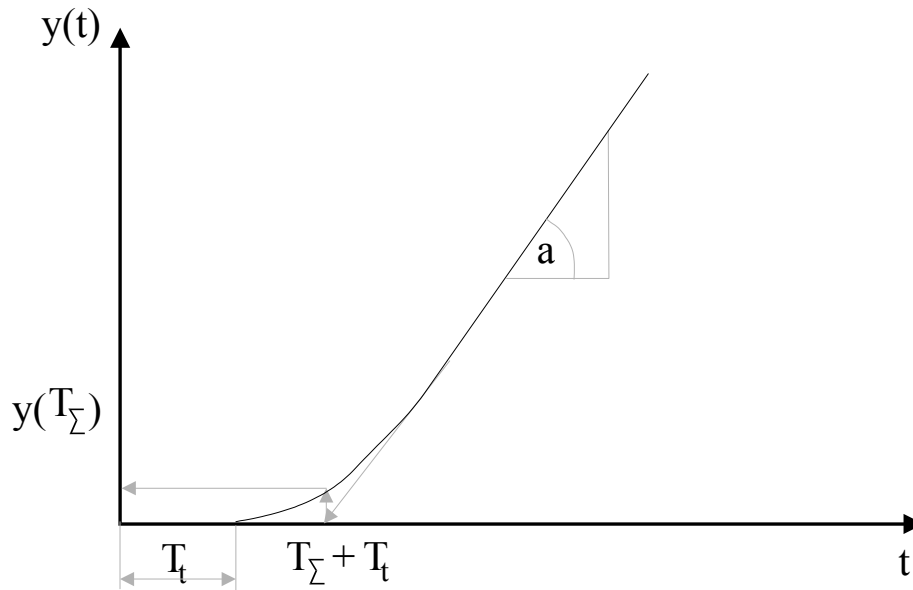
Diagramm:



6. Auswertung der Sprungantwort - I-T_n-Glieder

Modellansätze: I) $G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{p(1 + pT_0)^n}$

II) $G(p) = \frac{V e^{-pT_{Tot}}}{p \prod_{j=1}^n (1 + p \frac{T_0}{j})}$



Modellansatz I

Bestimmung von n, V:

- $V = \tan(a)/u_0$; $T_\Sigma = T_0 \cdot n$ (u_0 - Sprunghöhe)
- n aus $\frac{y(T_\Sigma)}{VT_\Sigma u_0}$ aus Tabelle
- $T_0 = D(n) \cdot T_\Sigma$; D(n) aus Tabelle

Tabelle:

n	$\frac{y(T_\Sigma)}{VT_\Sigma u_0}$	D(n)
1	0,368	1
2	0,271	0,500
3	0,224	0,333
4	0,195	0,250
5	0,174	0,200
6	0,161	0,167

Modellansatz II

Bestimmung von n , V :

- $V = \tan(\alpha) \cdot u_0$; $T_\Sigma = T_0 \cdot \sum_{j=1}^n \frac{1}{j}$ (u_0 - Sprunghöhe)
- n aus $\frac{y(T_\Sigma)}{VT_\Sigma u_0}$ aus Tabelle
- $T_0 = D(n) \cdot T_\Sigma$; $D(n)$ aus Tabelle

Tabelle:

n	$\frac{y(T_\Sigma)}{VT_\Sigma u_0}$	D(n)
1	0,368	1
2	0,281	0,666
3	0,241	0,545
4	0,218	0,480
5	0,202	0,438
6	0,190	0,408