Regelungstechnik

Ein Leitfaden für Einsteiger

Manfred Schleicher
Frank Blasinger

Regelungstechnik

Ein Leitfaden für Einsteiger

Vorwort

Diese Broschüre soll dem Praktiker eine Hilfe auf dem Gebiet der Regelungstechnik sein: Das Werk hilft bei der Auswahl und Einstellung des geeigneten Reglers für unterschiedliche Anwendungsfälle. Die verschiedenen Reglertypen und deren Einstellmöglichkeiten werden beschrieben.
Die Erklärungen und Definitionen erfolgen ohne Verwendung der höheren Mathematik und überwiegend an Temperaturregelstrecken.

In der vorliegenden, verbesserten Ausgabe wurde der Schwerpunkt der Überarbeitung auf Kapitel 3 und 5 gelegt.

Wir danken unseren Kollegen für die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung dieser Broschüre.

Fulda im Oktober 2000

Manfred Schleicher Frank Blasinger

Inhalt

1 Grundbegriffe ... 7

1.1 Einleitung ... 7

1.2 Begriffe und Bezeichnungen ... 7

1.3 Steuern und Regeln ... 7

1.4 Der Reglereingriff ... 11

1.5 Bauformen von Regelgeräten ... 12

1.6 Analoge und digitale Regler ... 18
1.6.1 Signalarten ... 18
1.6.2 Prinzipielle Unterschiede ... 20

1.7 Stellglieder ... 23

1.8 Andere Verfahren zum Konstanthalten von Größen ... 25
1.8.1 Ausnutzung physikalischer Effekte ... 25
1.8.2 Konstruktive Maßnahmen ... 25
1.8.3 Konstanthalten durch Steuern ... 26

1.9 Schwerpunkte der Regelungstechnik ... 27

1.10 Aufgaben eines Regelungstechnikers ... 28

2 Die Regelstrecke ... 29

2.1 Zeitverhalten technischer Systeme ... 29

2.2 Strecken mit Ausgleich ... 32

2.3 Strecken ohne Ausgleich ... 33

2.4 Strecken mit Totzeit ... 35

2.5 Strecken mit Verzögerung ... 37
2.5.1 Strecken mit einer Verzögerung (1. Ordnung) ... 38
2.5.2 Strecken mit zwei Verzögerungen (2. Ordnung) ... 39
2.5.3 Strecken mit mehreren Verzögerungen (höherer Ordnung) ... 41

2.6 Aufnahme der Sprungantwort ... 41

2.7 Kennwerte von Regelstrecken ... 43

2.8 Übertragungsbeiwert und Arbeitspunkt ... 44

Inhalt

3 Stetige Regler 47

3.1 Einleitung 47

3.2 P-Regler 47
3.2.1 Der Proportionalbereich 49
3.2.2 Bleibende Regelabweichung und Arbeitspunkt 52
3.2.3 Regler mit Dynamik 55

3.3 I-Regler 56

3.4 PI-Regler 57

3.5 PD-Regler 60
3.5.1 Der praktische D-Anteil - Das DT_1-Element 65

3.6 PID-Regler 66
3.6.1 Blockstruktur des PID-Reglers 67

4 Regelkreise mit stetigen Reglern 69

4.1 Allgemeines zur Arbeitsweise von Regelkreisen mit stetigen Reglern 69

4.2 Stabiles und instabiles Verhalten des Regelkreises 70

4.3 Führungs- und Störverhalten des Regelkreises 71
4.3.1 Führungsverhalten des Regelkreises 72
4.3.2 Störverhalten 73

4.4 Welcher Regler passt zu welcher Regelstrecke? 74

4.5 Optimierung 75
4.5.1 Maßstab für die Regelgüte 76
4.5.2 Einstellung nach der Schwingungsmethode 78
4.5.3 Einstellung nach der Übergangsfunktion bzw. Streckensprungantwort 80
4.5.4 Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit 82
4.5.5 Einstellung ohne Kenntnis der Regelstrecke 83
4.5.6 Kontrolle der Reglereinstellung 84

5 Schaltende Regler **87**

5.1 Unstetige und stetigähnliche Regler **87**

5.2 Der Unstetige Regler **88**
5.2.1 Verlauf der Regelgröße bei Strecken 1. Ordnung 88
5.2.2 Verlauf der Regelgröße bei Strecken höherer Ordnung 91
5.2.3 Verlauf der Regelgröße bei Strecken ohne Ausgleich 93

5.3 Stetigähnliche Regler: Der Proportionalregler **94**

5.4 Stetigähnliche Regler: Der Regler mit Dynamik **97**
5.4.1 Besonderheit der Schaltstufe 97
5.4.2 Bemerkungen zu unstetigen und stetigähnlichen Reglern mit einem Ausgang 98

5.5 Regler mit zwei Ausgängen: Der Dreipunktregler **99**
5.5.1 Unstetiger Regler mit zwei Ausgängen 99
5.5.2 Stetigähnlicher Regler mit zwei Ausgängen als Proportionalregler 101
5.5.3 Stetigähnlicher Regler mit zwei Ausgängen und Dynamik 102
5.5.4 Bemerkung zu Reglern mit zwei Ausgängen 102

5.6 Der Dreipunktschrittregler **103**

5.7 Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler für Motorstellglieder **106**

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen **109**

6.1 Grundlast **109**

6.2 Leistungsumschaltung **111**

6.3 Störgrößenaufschaltung **112**

6.4 Hilfsregelgrößenaufschaltung **115**

6.5 Grob-/Fein-Regelung **115**

6.6 Kaskadenregelung **116**

6.7 Verhältnisregelung **118**

6.8 Mehrkomponentenregelung **119**

Inhalt

7 Sonderfunktionen von Reglern 121

7.1 Leitgerät/Handbetrieb 121

7.2 Rampenfunktion 122

7.3 Stellgradbegrenzung 122

7.4 Programmregler 123

7.5 Selbstoptimierung 124

7.6 Parameterumschaltung/Strukturumschaltung 126

7.7 Fuzzy-Logik 126

8 Normen, Formelzeichen, Literatur 129

1 Grundbegriffe

1.1 Einleitung

Im Zeitalter der Automatisierung kommt der selbsttätigen Regelung eine steigende Bedeutung zu. Sie sorgt im Ablauf der Fertigungsprozesse dafür, dass bestimmte Größen wie Temperaturen, Drücke, Drehzahlen, Spannungen, bestimmte, als günstig erkannte, konstante Werte annehmen oder in bestimmten Abhängigkeiten von anderen Größen gehalten werden. D. h., Aufgabe der Regelungstechnik ist es, die genannten Größen auf vorgeschriebene Werte (Sollwerte) zu bringen und diese entgegen allen Störeinwirkungen konstant zu halten. Diese so einfach aussehende Aufgabe beinhaltet aber in sich eine Fülle von Problemen, wie man sie auf den ersten Blick nicht vermuten würde.

Die heutige Regelungstechnik hat Verknüpfungsobjekte mit fast jedem technischen Gebiet. Ihr Anwendungsspektrum reicht von der Elektrotechnik über die Antriebstechnik, den Maschinenbau bis hin zur Verfahrenstechnik. Will man nun die Regelungstechnik anhand von fachlichen Regeln dieser einzelnen Gebiete erklären, so müsste man von einem Regelungstechniker verlangen, jedes Fachgebiet, in dem er Regelungen vornehmen will, fundiert zu beherrschen. Dies ist aber bei dem heutigen Stand der Technik nicht möglich.

Es zeigt sich jedoch, dass hinter den fachlichen Aufgaben gemeinsame Grundgedanken liegen. Man erkennt bald, dass beispielsweise bei der Regelung einer Antriebsaufgabe und einer Druck- oder Temperaturregelung Gemeinsamkeiten auftauchen, die man mit einer einheitlichen Vorgehensweise beschreiben kann. Die Grundgesetze der Regelungstechnik gelten in gleicher Weise für alle Regelkreise, ganz unabhängig davon, wie verschieden sie im Einzelnen auch apparativ aufgebaut sein mögen.

Der Praktiker, der etwas gründlicher in die Regelungstechnik eindringen möchte, gewinnt beim Durchblättern von Büchern über dieses Thema leicht den Eindruck, dass ein Eindringen in die Regelungstechnik ohne umfangreiche mathematische Kenntnisse ausgeschlossen ist. **Dieser Eindruck ist aber falsch.** Wenn man sich hinreichend um die Form der Darstellung bemüht, ist es möglich, auch Zusammenhänge, die scheinbar nur auf Grund umfangreicher mathematischer Kenntnisse zu begreifen sind, verständlich darzustellen.

Worauf es bei der Lösung von Regelungsaufgaben eigentlich ankommt, ist nicht die Kenntnis vieler Formeln und Rechenverfahren, sondern das **Erfassen der wirkungsmäßigen Zusammenhänge** im Regelkreis.

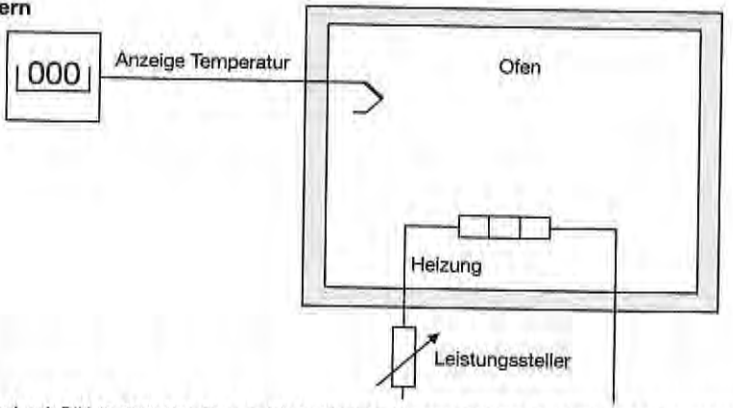
1.2 Begriffe und Bezeichnungen

Auf dem Gebiet der Regelungstechnik stehen heute dank der Normung feste Begriffe und Bezeichnungen zur Verfügung. Diese sind in dem bekannten Normblatt DIN 19 226 (Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Grundlagen, Begriffe und Benennungen) niedergelegt. Die hier verwendeten Begriffe haben sich in Deutschland durchgesetzt. Die internationale Harmonisierung der Bezeichnungsextreme führte dann zum Normblatt DIN 19 221 (Formelzeichen der Regelungs- und Steuerungstechnik). Diese Norm lässt die meisten der in den vorausgegangenen Normen festgelegten Bezeichnungen zu, so dass sich diese Broschüre weitgehend an die in DIN 19 226 niedergelegten Bezeichnungen und Begriffe hält.

1.3 Steuern und Regeln

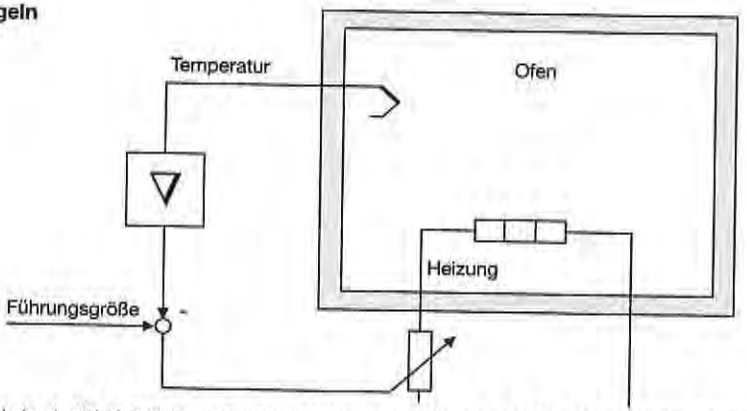
In vielen Prozessen soll ein physikalischer Wert, wie eine Temperatur, ein Druck oder eine Spannung, einen festgelegten Wert annehmen und möglichst genau einhalten. Ein einfaches Beispiel dafür ist ein Ofen, dessen Temperatur konstant gehalten werden soll. Ist die Energiezufuhr, z. B. elektrische Energie, variierbar, so lassen sich dadurch verschiedene Ofentemperaturen realisieren (Abbildung 1). Nimmt man an, dass sich die äußeren Bedingungen nicht ändern, wird sich zu jedem

Steuern



Steuern (nach DIN 19 226): Das Steuern ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgröße, andere Größen als Ausgangsgröße auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.
Kennzeichen für das Steuern ist der offene Wirkungsablauf über das einzelne Übertragungsglied oder die Steuerkette.

Regeln



Regeln (nach DIN 19 226): Das Regeln ist ein Vorgang, bei dem eine Größe, die Regelgröße, fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.
Der sich dabei ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis, statt.

Abb. 1: Steuern und Regeln

Grad der Energiezufuhr eine bestimmte Temperatur einstellen. Durch eine derartige Steuerung der Energiezufuhr lassen sich also bestimmte Ofentemperaturen erreichen.
Ändern sich jedoch die äußeren Bedingungen, wird sich ein anderer Wert als erwartet einstellen. Solche Störungen bzw. Änderungen können sehr unterschiedlicher Natur sein und an unterschiedlichen Orten in den Prozess eingreifen. Sie können in Schwankungen der Außentemperatur oder des Heizstromes bzw. einer geöffneten Ofentür begründet sein. Da bei der erwähnten Steuerung der tatsächliche Temperaturwert des Ofens unbeachtet bleibt, wird ein falscher Wert vom Bediener eventuell nicht bemerkt.

Soll die Ofentemperatur ihren Wert auch dann beibehalten, wenn sich die äußeren Bedingungen ändern und die Störgrößen nicht konstant und in ihrer Wirkung nicht vorhersehbar sind, so ist eine Regelung erforderlich. Dies kann im einfachsten Fall durch ein Thermometer geschehen, mit dem der Temperatur-Istwert des Ofens erfasst wird. Der Bediener kann nun die Ofentemperatur erkennen und bei einer Abweichung die Energiezufuhr entsprechend ändern (Abbildung 1).
Die Energiezufuhr wird nun nicht mehr starr vorgegeben, sondern ist mit der Temperatur des Ofens verknüpft. Durch diese Maßnahme ist aus der Steuerung eine Regelung geworden, wobei der Bediener als Regler arbeitet.

Zum Zweck der Regelung wird der Istwert mit dem Sollwert verglichen. Eine eventuelle Abweichung vom Sollwert nimmt dann eine Änderung der Energiezufuhr vor. Sie ist daher nicht - wie im Fall einer Steuerung - fest eingestellt, sondern vom tatsächlichen Istwert abhängig. Man spricht von einem geschlossenen Regelkreis (Abbildung 2).

Wird die Leitung des Temperaturfühlers unterbrochen, ist der Regelkreis offen. Wegen der nun fehlenden Rückmeldung des Istwertes, liegt bei einem offenen Regelkreis nur noch eine Steuerung vor.

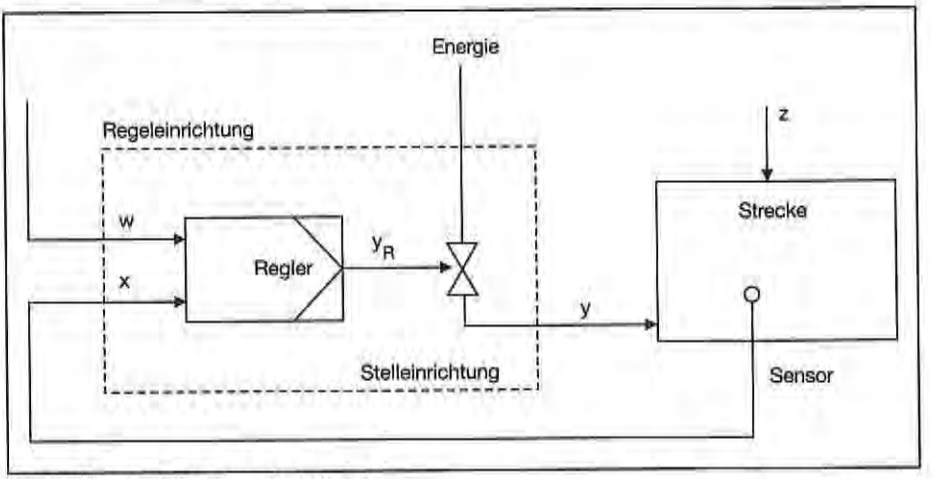


Abb. 2: Der geschlossene Regelkreis

Der Regelkreis hat folgende regelungstechnische Größen, mit den nach DIN 19 226 verwendeten Abkürzungen :

Regelgröße (Istwert) x: Die Regelgröße ist die Größe in der Regelstrecke, die zum Zweck des Regelns erfasst und dem Regler zugeführt wird. Sie soll durch das Regeln dauernd gleich der Führungsgröße gemacht werden (Beispiel der Ofentemperatur).

1 Grundbegriffe

Führungsgröße (Sollwert) w: Vorgegebener Wert, auf dem die Regelgröße durch die Regelung gehalten werden soll (Beispiel geforderte Ofentemperatur). Sie ist eine von der Regelung nicht beeinflusste Größe und wird von außen zugeführt.

Regeldifferenz (Regelabweichung) e: Unterschied zwischen Führungs- und Regelgröße e = w - x (Beispiel: Unterschied zwischen Ofensollwert und -istwert).

Störgröße z: Größe, deren Änderung die Regelgröße in unerwünschter Weise beeinflusst (Beeinflussung der Regelgröße durch äußere Einflüsse).

Reglerausgangsgröße y_R: Sie ist die Eingangsgröße der Stelleinrichtung.

Stellgröße y: Größe, durch welche die Regelgröße in gewünschter Weise beeinflusst werden kann (z. B. Heizleistung des Ofens). Sie ist eine Ausgangsgröße der Regeleinrichtung und zugleich Eingangsgröße der Strecke.

Stellbereich y_H: Der Bereich, innerhalb dessen die Stellgröße einstellbar ist.

Regelkreis: Verbindung des Ausganges der Regelstrecke mit dem Eingang des Reglers und des Reglerausganges mit dem Regelstrecken-Eingang, sodass ein in sich geschlossener Kreis entsteht.
Er besteht aus Regler, Stelleinrichtung und Strecke.

Die physikalischen Einheiten sind recht unterschiedlich:
Regelgröße, Führungsgröße und Regeldifferenz haben meist die gleiche physikalische Einheit wie °C, bar, Volt, Umdrehungen/Minute, Füllhöhe in Metern usw. Die Stellgröße kann einem Heizstrom in Ampere oder Gasstrom in m^3/min. proportional sein, vielfach ist es auch ein Druck, der in bar angegeben wird. Der Stellbereich ist die max. Stellgröße und hat demzufolge die gleiche Einheit.

1.4 Der Reglereingriff

Der Regler hat grundsätzlich die Aufgabe, die Regelgröße zu erfassen und aufzubereiten, mit der Führungsgröße zu vergleichen und hieraus eine entsprechende Stellgröße zu bilden. Der Regler muß diesen Ablauf so steuern, dass die dynamischen Eigenschaften des zu regelnden Prozesses gut ausgeglichen werden. Das heißt, der Istwert sollte den Sollwert möglichst rasch erreichen und dann möglichst wenig um ihn schwanken.

Der Eingriff des Reglers in den Regelkreis wird durch folgende Größen charakterisiert:

- die Überschwingweite: X_{max},
- die Anregelzeit: T_{an}, die vergeht, bis der Istwert zum erstenmal den neuen Sollwert erreicht hat,
- die Ausregelzeit: T_a,
- sowie eine vereinbarte Toleranzgrenze +/- Δx (Abbildung 3)

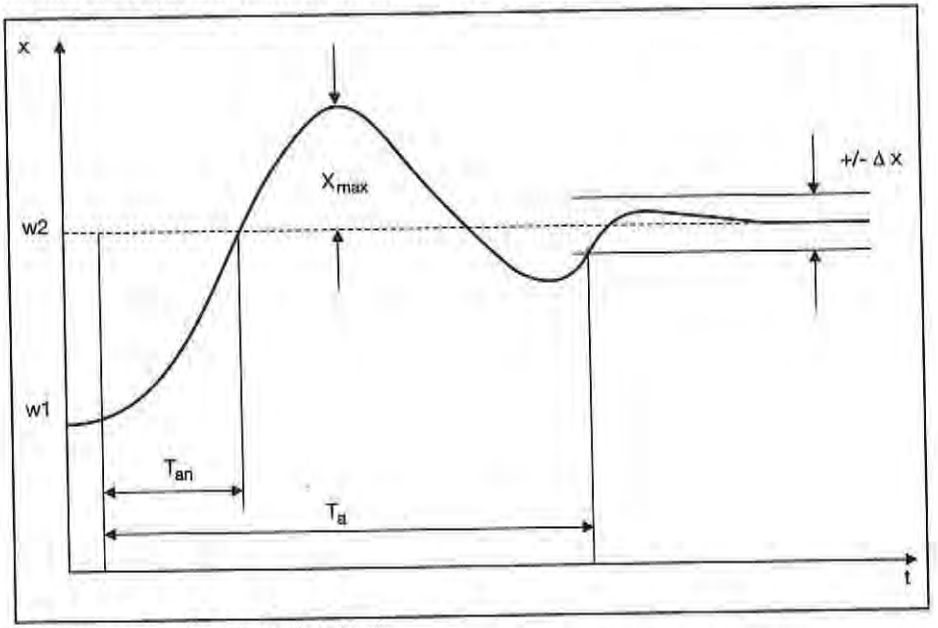


Abb. 3: Kriterien für den Reglereingriff

Der Regler hat „ausgeregelt", wenn der Prozess mit einem konstanten Stellgrad gefahren wird, und die Regelgröße sich innerhalb der vereinbarten Toleranzgrenze +/- Δx bewegt.

Idealerweise ist die Überschwingweite Null. Dies lässt sich jedoch meist nicht mit einer kurzen Ausregelzeit vereinbaren. Bei einigen Prozessen, wie z. B. Drehzahlregelungen, ist aber eine kurze Ausregelzeit wichtig und ein leichtes Überschwingen über den Sollwert kann hingenommen werden. Andere Prozesse dagegen, wie kunststoffverarbeitende Maschinen, sind empfindlich gegenüber Temperaturüberschreitungen, da diese leicht das Werkzeug oder das Gut zerstören.

1.5 Bauformen von Regelgeräten

Die Wahl eines geeigneten Regelgerätes hängt in erster Linie vom Anwendungsfall ab. Dies betrifft sowohl die mechanischen als auch die elektrischen Eigenschaften. Aus dem vielfältigen Spektrum unterschiedlicher Bauweisen und Ausführungsformen seien hier nur einige aufgeführt, wie elektronische Regler und keine mechanischen oder pneumatischen Regeleinrichtungen. Dem Anwender, der vor der Wahl eines Reglers für seine spezielle Aufgabenstellung steht, soll zunächst aufgezeigt werden, welche unterschiedlichen Bauformen existieren. Einen Anspruch auf Vollständigkeit hat diese Aufzählung nicht.

Mechanische Unterscheidung

- **Kompaktregler** (Prozessregler) enthalten alle erforderlichen Komponenten (z. B. Anzeige, Tastatur, Eingabe für die Führungsgröße etc.) und besitzen ein Gehäuse mit einem Netzteil. Die Gehäusemaße sind meist genormt und betragen Standardabmessungen 48mm x 48mm, 48mm x 96mm, 96mm x 96mm oder 72mm x 144mm.
- **Regler im Aufbaugehäuse** werden meist im Inneren von Schaltschränken eingesetzt und auf C-Schienen und dergleichen befestigt. Hier fehlen meist die Anzeigeelemente, wie Istwertanzeige oder Schaltmelder über Dioden, da sie dem Bediener normalerweise nicht zugänglich sind.
- **Einbauregler** sind für den Einbau in Baugruppenträgern sogenannten 19"-Racks vorgesehen. Sie besitzen daher nur eine Frontplatte und kein vollständiges Gehäuse.
- **Platinenregler** bestehen z.B. aus einem Mikroprozessor mit entsprechender Peripherie und werden in unterschiedlichen Gehäuseformaten eingesetzt. Man findet sie öfters in Großanlagen in Verbindung mit Prozessleitsystemen und speicherprogrammierbaren Steuerungen. Diesen Geräten fehlen ebenfalls Bedien- und Anzeigeelemente, da sie ihre Prozessdaten über Schnittstelle von der zentralen Leitwarte über Softwareprogramme bekommen.

Funktionelle Unterscheidung

Die hier angesprochenen Reglertypen werden in den folgenden Kapiteln eingehend behandelt und erklärt (siehe Abbildung 4).

- **Stetige Regler**
  Regler, bei welchem bei einem stetigen Eingangssignal das Reglerausgangssignal ebenfalls stetig ist. Das Stellsignal kann innerhalb des Stellbereiches jedes Signal annehmen. Sie liefern meist Ausgangssignale im Bereich von 0 ... 20mA, 4 ... 20mA oder 0 ... 10V. Mit diesem werden z. B. Stellantriebe oder Thyristorsteller angesteuert.

- **Unstetige Regler**

Zweipunktregler mit einem schaltenden Ausgang sind Regler, bei denen bei einem stetigen Eingangssignal der Reglerausgang unstetig ist. Sie können die Stellgröße nur ein- und ausschalten und finden ihren Einsatz z.B. bei Temperaturregelungen, wo die Heizung oder Kühlung lediglich ein- bzw. ausgeschaltet wird.

Dreipunktregler mit zwei schaltenden Reglerausgängen entsprechen den Zweipunktreglern, besitzen jedoch zwei Stellgrößenausgänge. Sie ermöglichen Regelungen wie Heizen/Kühlen oder Be-/Entfeuchten usw.

- **Stetigähnliche Regler**

Stetigähnliche Regler mit einem schaltenden Reglerausgang sind Regler, die ein stetigähnliches Verhalten erreichen. Der über ein gewähltes Zeitintervall gebildete Mittelwert der Reglerausgangsgröße zeigt angenähert denselben zeitlichen Verlauf wie bei einem stetigen Regler. Einsatzgebiete sind z. B. Temperaturregelungen (Heizen oder Kühlen) mit höheren Anforderungen an die Regelgüte. Auch Stetigähnliche Regler mit einem Ausgang werden in der Praxis als Zweipunktregler bezeichnet.

Stetigähnliche Regler mit zwei schaltenden Reglerausgängen können einen Prozess in gegensätzliche Richtungen beeinflussen (beispielsweise Heizen/Kühlen oder Be-/Entfeuchten). Auch diese Regler erreichen durch Takten der schaltenden Ausgänge ein quasistetiges Verhalten. In der Praxis bezeichnet man alle Regler, die mit zwei Ausgängen einen Prozess in gegensätzliche Richtungen beeinflussen, als Dreipunktregler. Dabei müssen die Ausgänge nicht schaltend, sondern können auch stetig ausgeführt.

- **Dreipunktschrittregler**

Dreipunktschrittregler besitzen zwei schaltende Reglerausgänge und sind speziell für motorgetriebene Stellantriebe konzipiert, mit dem z. B. eine Stellklappe „Auf-" und „Zugefahren" werden kann.

- **Stellungsregler**

Stellungsregler werden ebenfalls für motorgetriebene Stellantriebe verwendet und besitzen zwei schaltende Reglerausgänge. Im Unterschied zum Dreipunktschrittregler muss hier dem Regler die Stellgradrückmeldung als Information vorliegen.

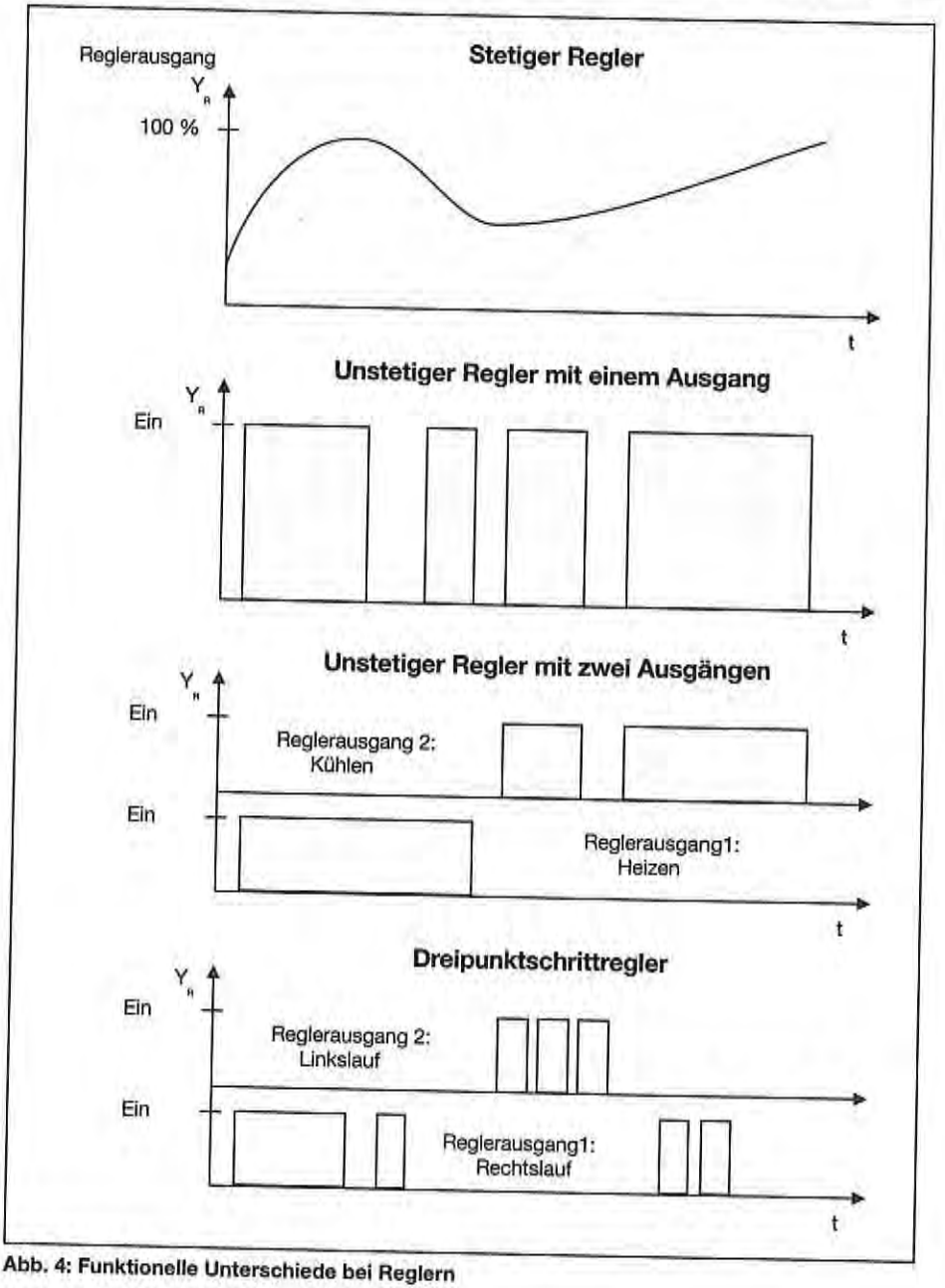


Abb. 4: Funktionelle Unterschiede bei Reglern

Alle genannten Reglertypen (ausgenommen der unstetigen Regler) sind prinzipiell mit den unterschiedlichem dynamischem Verhalten realisierbar. In diesem Zusammenhang wird auch oft von einer Reglerstruktur gesprochen. Hier findet man Begriffe wie P-, PI-, PD- oder PID-Regler (Abbildung 5).

Unterschiedliche Sollwertvorgabe
Die Sollwertvorgabe kann manuell am Regler durch ein Potentiometer oder über Tasten durch Eingabe von Zahlenwerten erfolgen. Angezeigt wird der Sollwert analog (Zeigerstellung eines Sollwertstellers) oder digital als Ziffernwert.

Eine weitere Möglichkeit ist die externe Sollwertvorgabe. Hier wird der Sollwert als externes elektrisches Signal (z. B. 0 ... 20 mA) von anderer Stelle vorgegeben. Neben diesen analogen Signalen können auch digitale Signale zur Sollwertvorgabe dienen. Sie werden dann dem Regler über eine digitale Schnittstelle zugeführt und können von einem anderen digital arbeitenden Gerät oder einem angeschlossenem Rechner stammen. Läuft die externe Sollwertvorgabe nach einem festen zeitlichen Ablauf (Programm) ab, so spricht auch von einer Zeitplanregelung.

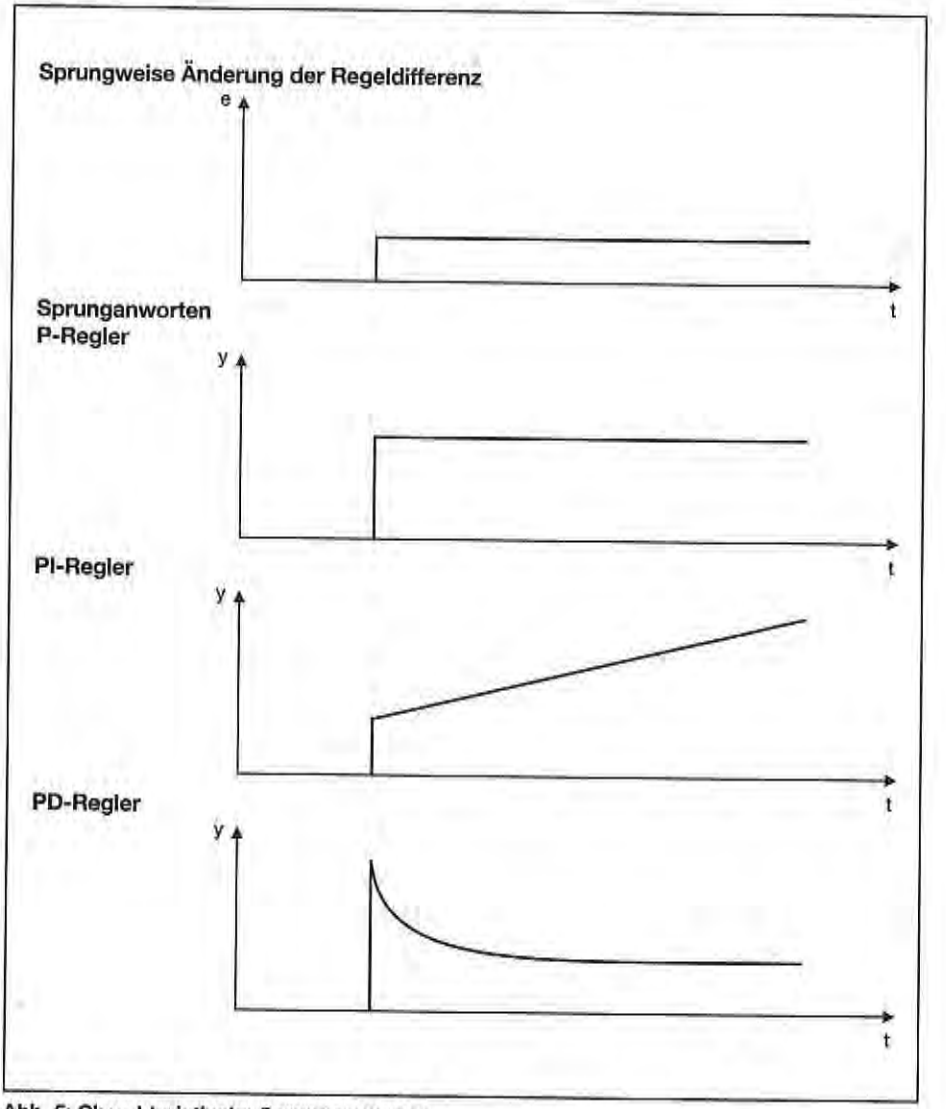


Abb. 5: Charakteristische Sprungantworten

Erfassen des Istwertes

Der Istwert muss als elektrisches Signal vorliegen. Die Form hängt vom verwendeten Sensor und der Aufbereitung dieses Signales ab. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das Signal des Messwertgebers (Sensor, Fühler) direkt auf den Reglereingang gegeben wird. Dieser muss dann in der Lage sein, dieses Signal zu verarbeiten, d. h. da bei vielen Temperaturfühlern das Ausgangssignal nicht linear zur Temperatur ist, muss der Regler z. B. eine entsprechende Linearisierung besitzen.

Die andere Möglichkeit besteht in der Verwendung eines Messumformers.
Der Messumformer wandelt das Signal des Sensors in ein Einheitssignal um (0 ... 20mA, 0 ... 10V) und führt meistens auch die Linearisierung des Signales durch. In diesem Fall benötigt der verwendete Regler lediglich einen Eingang für Einheitssignale.

Der Istwert wird meistens am Regler angezeigt. Dies kann über eine digitale Anzeige (Ziffernanzeige) erfolgen, deren Vorteil ein gutes Ablesen auch auf größere Entfernungen ist. Der Vorteil einer analogen Anzeige (Zeigeranzeige) ist, dass sich gut Tendenzen wie Steigen oder Fallen im Istwert-Verlauf und die Position im Regelbereich erkennen lassen.

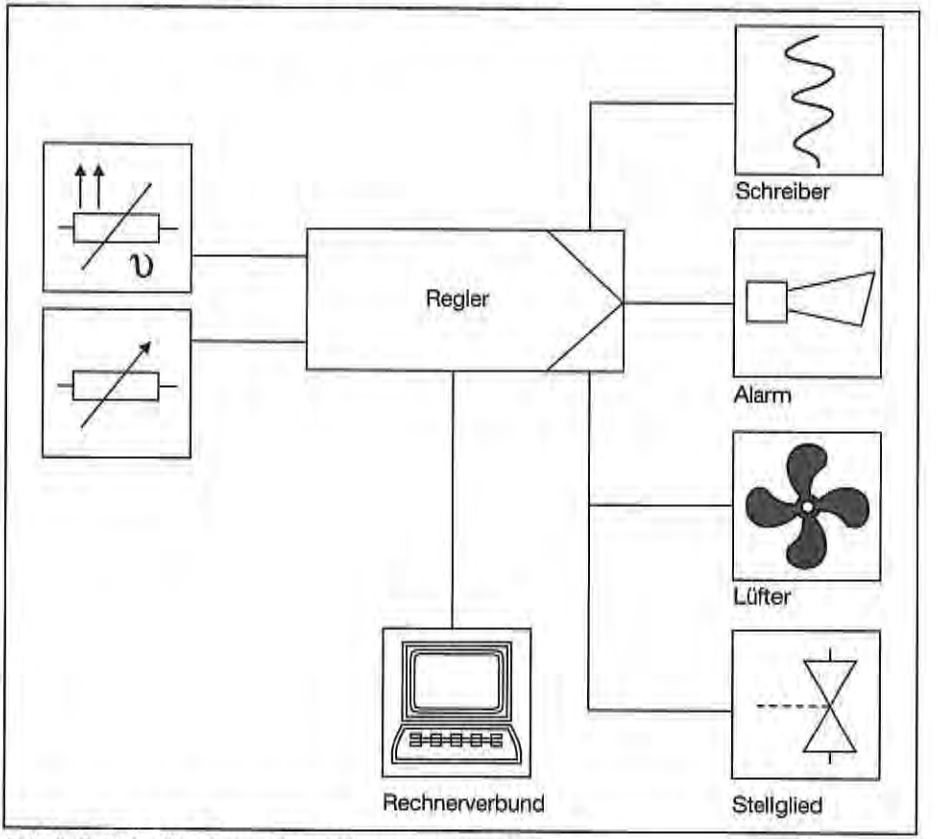


Abb. 6: Beispiel für externe Anschlüsse eines Reglers

Vielfach wird der Istwert noch weiterverarbeitet, z. B. von einem Schreiber registriert oder an anderer Stelle angezeigt. Hierzu stellen die meisten Regler einen Istwert-Ausgang zur Verfügung, an dem der Istwert als Einheitssignal ausgegeben wird.
Um die Über- oder Unterschreitung bestimmter Werte zu signalisieren, besitzen die Regelgeräte sogenannte Limitkomperatoren (Grenzwert- oder Alarmkontakte), die ein Signal liefern, wenn der Istwert eingestellte Grenzen überschreitet. Dieses Signal kann dann Alarmeinrichtungen oder dergleichen auslösen.

1.6 Analoge und digitale Regler

1.6.1 Signalarten

Technische Systeme lassen sich durch die Art der an ihren Ein- und Ausgängen auftretenden Signalen klassifizieren. Die Signale unterscheiden sich in ihrer technischen Natur. In Regeleinrichtungen treten häufig die Temperatur, der Druck, der Strom oder die Spannung als Signalträger auf, die zugleich die Dimensionen bestimmen. Die Signale lassen sich aufgrund Ihres Wertevorrates und ihrem zeitlichen Verhalten in verschiedene Arten einteilen.

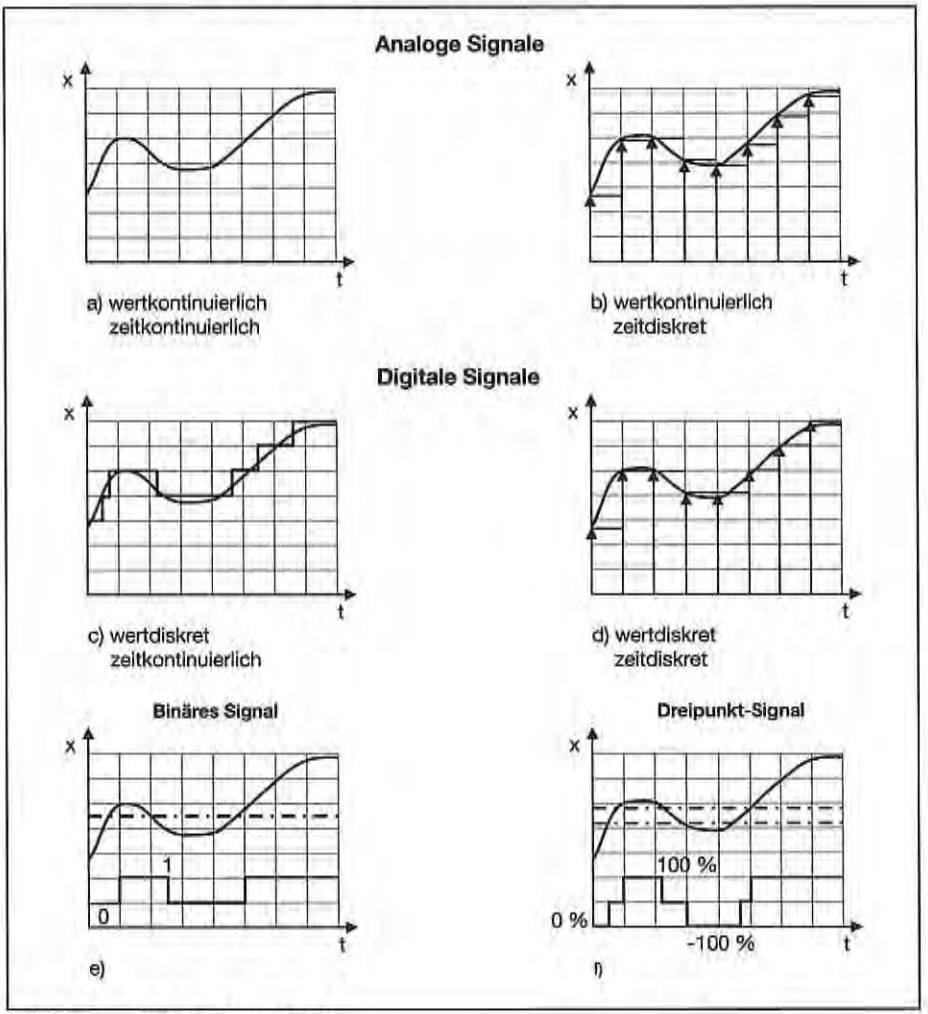


Abb. 7: Verschiedene Signalarten

Analoge Signale
Die Signalform mit der größten Anzahl möglicher Signalpegel ist das analoge Signal. Die Regelgröße, beispielsweise eine Temperatur, wird von der Messeinrichtung in ein dieser Temperatur entsprechendes Signal umgewandelt. Jedem Wert der Temperatur entspricht ein Wert des elektrischen Signales. Ändert sich die Temperatur nun kontinuierlich, so ändert sich auch die Signalgröße kontinuierlich. Man spricht daher auch von einem wertkontinuierlichen Signal.
Das Wesentliche der Definition analoger Signale liegt darin, dass der Wertebereich kontinuierlich durchlaufen wird.
Da auch der zeitliche Ablauf kontinuierlich ist, denn in jedem Augenblick entspricht der Wert des Signales der gerade herrschenden Temperatur, handelt es sich ebenfalls um ein zeitkontinuierliches Signal (Abbildung 7a). Würde man nun die Messeinrichtung über einen Messstellenumschalter, bei dem der Abgriff gleichmäßig rotiert, betreiben, so wird das Messsignal nur zu ganz bestimmten diskreten Zeiten abgetastet. Man sagt nun, das Signal ist nicht mehr zeitkontinuierlich, sondern zeitdiskret (Abbildung 7b). Andererseits sind die Messwerte jedoch noch wertkontinuierlich, da sich in jedem Abtastzeitpunkt das Messsignal eindeutig wiederspiegelt.

Digitale Signale
Digitale Signale gehören zu den diskreten Signalen. Bei ihnen werden die einzelnen Signalpegel durch Zahlwörter (Digits) dargestellt. Das heißt, diskrete Signale können nur eine begrenzte Menge von Werten annehmen. Der zeitliche Verlauf eines solchen diskreten Signales weist immer Stufen auf.
Ein einfaches Beispiel für ein System mit einem diskreten Signal ist eine Regalanlage mit einem Fahrstuhl, dieser Fahrstuhl kann nur diskrete Höhenwerte annehmen. Solche Signale treten auf bei Regelungen mit Computern oder sog. digitalen Regelgeräten. Wesentlich in diesem Zusammenhang ist, dass die Umwandlung analoger Signale in digitale Signale nur durch Diskretisierung des Signalpegels möglich ist.
Zwischenwerte sind nun nicht mehr möglich, unterstellt man jedoch, dass die Umwandlung beliebig schnell erfolgt, so ist ein zeitkontinuierliches Signal möglich (Abbildung 7c). Mit denen in der Technik üblichen Verfahren kann die Umwandlung jedoch nur zeitdiskret erfolgen. Das heißt, die bei der digitalen Regelung verwendeten Analog-Digital-Umsetzer führen den Umwandlungsprozess im Allgemeinen nur zu diskreten Zeitpunkten durch (Abtastzeit). Man erhält daher aus dem analogen Signal ein Ergebnis, das sowohl wertdiskret als auch zeitdiskret ist (Abbildung 7d).
Man erkennt jedoch deutlich, dass bei der Umsetzung von analogen in digitale Werte Informationen über das Messsignal verloren gehen.

Binäre Signale
Im einfachsten Fall können die Signale nur zwei Zustände einnehmen. Es handelt sich dann um ein binäres Signal. Solche Signale sind den Steuerungstechnikern bestens bekannt. Die beiden Zustände bezeichnet man normalerweise mit „0" und „1". Jeder Schalter, mit dem man eine Spannung ein- und ausschalten kann, liefert ein binäres Signal als Ausgangsgröße. Man bezeichnet diese Binärsignale auch als logische Signale und ordnet ihnen dann die Werte „wahr" und „falsch" zu. Praktisch alle Digitalschaltungen in der Elektrotechnik arbeiten mit diesen logischen Signalen. So sind auch die Mikroprozessoren und die Prozessrechner mit solchen Elementen aufgebaut, die nur diese beiden Signalzustände kennen (Abbildung 7e).

Dreipunkt-Signale
Das Signal mit dem nächst höheren Informationswert nach den binären Signalen ist das Dreipunkt-Signal. Man findet es häufig in Verbindung mit Motoren. Ein Motor kann grundsätzlich in drei Betriebszuständen sein. Der Motor kann stillstehen, er kann sich vorwärts oder rückwärts bewegen. Entsprechende Glieder mit einem Dreipunkt-Verhalten findet man sehr häufig in der Regelungstechnik und sind von großem Interesse. Jedes der drei Signalniveaus kann eine beliebige Größe haben, d. h., in speziellen Fällen kann jedes Signalniveau ein positives Signal sein, oder der Betrag des positiven und negativen Signales kann unterschiedlich sein (Abbildung 7f).

1.6.2 Prinzipielle Unterschiede

Ein Regler stellt einen Bezug zwischen der Regelgröße und der Führungsgröße her und bildet daraus die Stellgröße. Diese Aufgabenstellung kann auf unterschiedlichste Art und Weise gelöst werden: mechanisch, pneumatisch, elektrisch, mathematisch. Der mechanische Regler z. B. verändert ein Signal durch ein Hebelsystem; der elektronische durch Operationsverstärker. Durch die Einführung leistungsfähiger und preiswerter Mikroprozessoren hat seit einigen Jahren eine weitere Form der elektrischen Regler den Markt erobert, die sogenannten Mikroprozessor-Regler (digitale Regler). Die Messsignale werden nicht mehr analog über Operationsverstärker verarbeitet, sondern über einen Mikroprozessor errechnet. Die mathematische Beschreibung der unterschiedlichen Strukturen findet in diesen digitalen Reglern direkt Anwendung.

Die Bezeichnung "digital" rührt daher, dass die Eingangsgröße, der Istwert, zunächst digitalisiert, d. h. in einen Zahlenwert umgewandelt werden muss, wie dies bereits im Abschnitt 1.6.1 erwähnt wurde, bevor das Signal vom Mikroprozessor bearbeitet werden kann. Das errechnete Ausgangssignal (Stellgröße) muss wieder über einen Digital-Analog-Wandler in ein analoges Signal umgewandelt werden, das zur Ansteuerung dient, oder kann einem digitalen Stellglied direkt zugeführt werden. Funktionell unterscheiden sich analoge und digitale Regler jedoch nicht wesentlich, so dass sie im Rahmen dieser Broschüre nicht explizit behandelt werden.
Eine digitale Ziffernanzeige allein ist noch kein hinreichendes Kriterium für die Bezeichnung als digitaler Regler, denn es existieren Regler, die analog aufgebaut sind, bei denen lediglich die Anzeige digital arbeitet. Sie haben jedoch intern keinen Mikroprozessor zur Berechnung der Signale und werden daher weiter als analoge Regler bezeichnet.

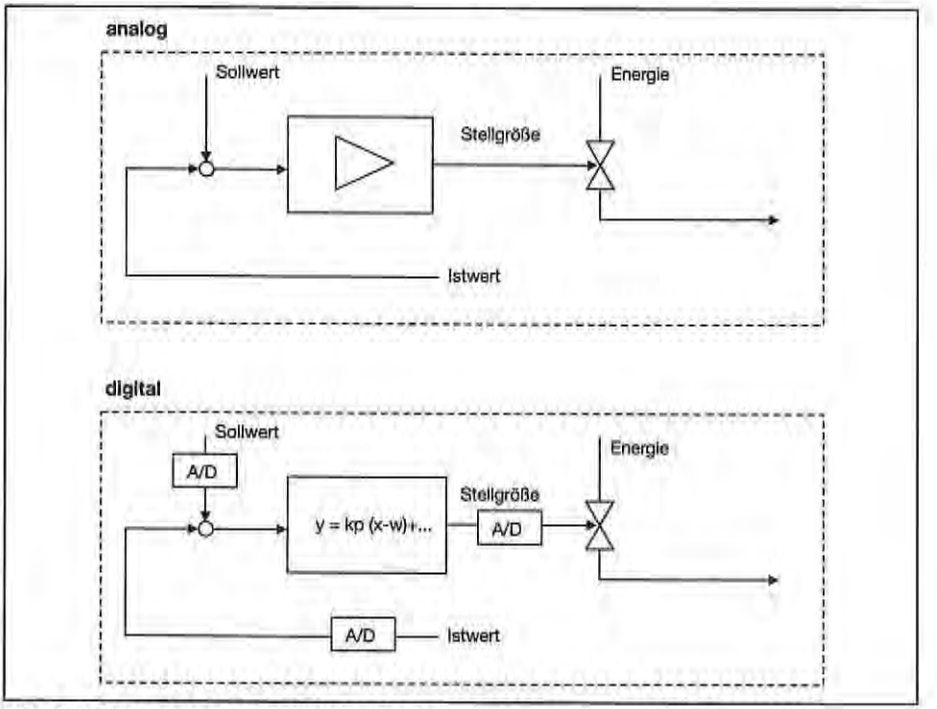


Abb. 8: Prinzip analoger und digitaler Regler

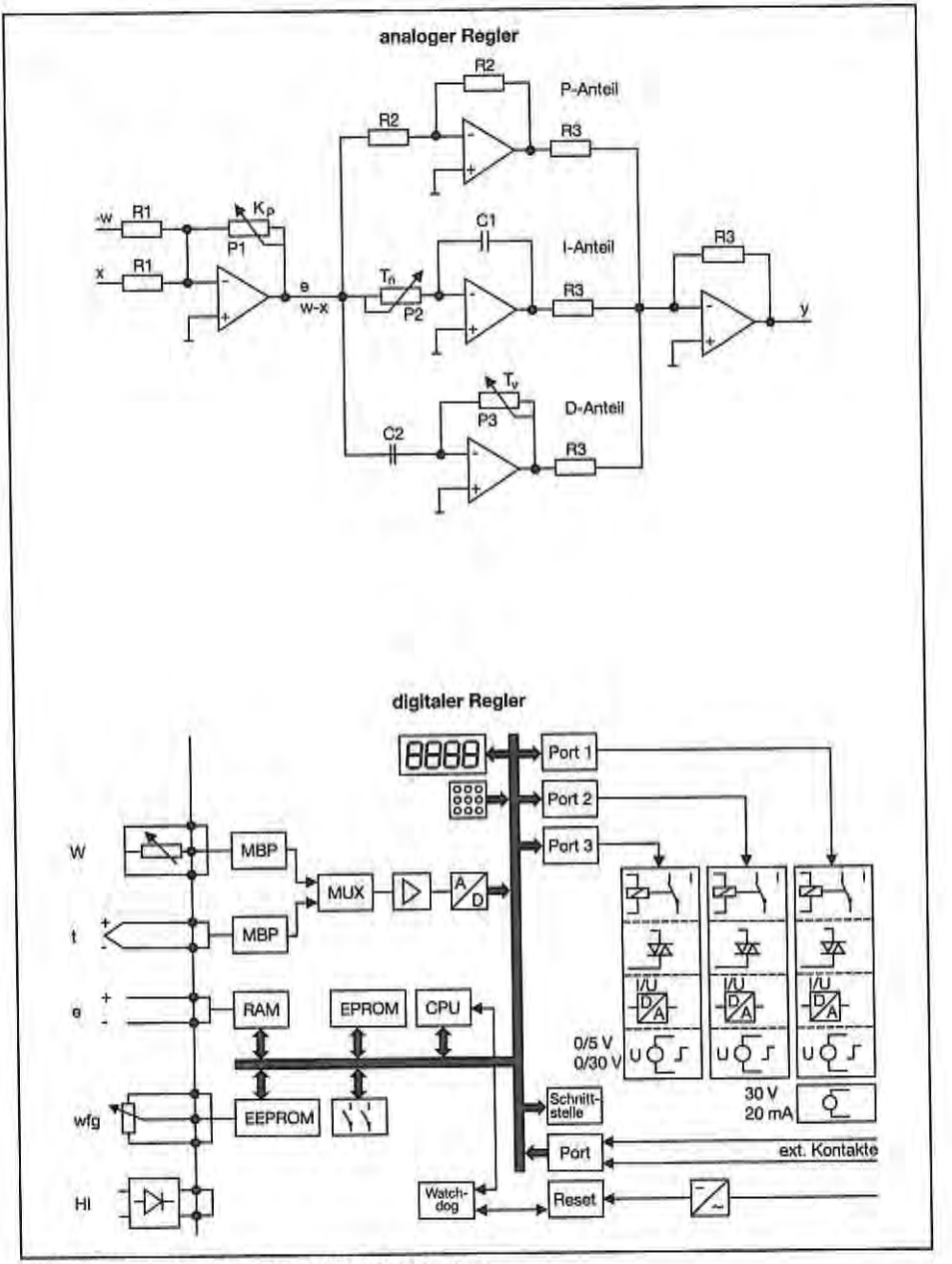


Abb. 9: Aufbau eines analogen/digitalen Reglers

1 Grundbegriffe

Vor- und Nachteile digitaler Regler
Analoge Regler sind aus Operationsverstärkern aufgebaut. Die Regelparamter werden meist durch Potentiometer, Trimmer oder Lötbrücken eingestellt. Die Regelstruktur und -eigenschaften liegen konstruktionsbedingt weitestgehend fest. Sie werden dort eingesetzt, wo keine höhere Regelgenauigkeit verlangt wird und die notwendigen Eigenschaften des Reglers - wie das dynamische Verhalten - bereits bei der Planung bekannt sind. Bei extrem schnellen Regelstrecken hat ein analoger Regler bei der Reaktionsgeschwindigkeit klare Vorteile.

Bei digitalen Reglern wandelt ein Mikroprozessor alle analogen Eingangsgrößen in Ziffern um und berechnet hieraus die Stellgröße. Dies bietet gegenüber der analogen Verarbeitung einige Vorteile:

- Je nach Messsignal und verwendeter Technologie (z. B. A/D-Wandler) eine höhere Regelgenauigkeit. Im Gegensatz zu Toleranz und driftbehafteten Bauteilen besitzen die verwendeten mathematischen Zusammenhänge eine konstante Genauigkeit und werden von Alterung, Exemplarstreuung und Temperaturabhängigkeiten nicht beeinflusst.
- Eine hohe Flexibilität hinsichtlich Reglerstruktur und -eigenschaften. Statt, wie bei analogen Reglern, Parameter zu verstellen und Bauteile umzulöten, kann bei einm digitalen Regler durch einfaches Programmieren die Linearisierung, Reglerstruktur etc. durch Eingabe neuer Zahlenwerte geändert werden.
- Die Möglichkeit des Datentransfers. Die Informationen über Prozesszustandsgrößen sollen häufig weiterverarbeitet, gespeichert oder zusätzlich anderweitig verwendet werden, was digital recht einfach ist. Die Ferneinstellung von Kennwerten durch Datensysteme, z. B. Prozessleitsysteme über digitale Schnittstelle ist ebenfalls einfach möglich.
- Die Optimierung der Regelparameter kann unter bestimmten Voraussetzungen automatisch vorgenommen werden.

Digitale Regler besitzen aber auch Nachteile gegenüber den analog arbeitenden Regelgeräten. Tendenzen im Istwertverlauf können bei Digital-Reglern durch die meist vorhandenen Ziffernanzeigen schlechter erkannt werden. Sie sind empfindlicher gegenüber elektromagnetischen Störimpulsen. Da der Mikroprozessor zur Berechnung der Parameter und anderer Aufgaben eine gewisse Zeit benötigt, können die Istwerte nur in bestimmten Zeitintervallen eingelesen werden. Man bezeichnet diese Zeitspanne zwischen dem Einlesen zweier Istwerte als Abtastzeit T und verwendet auch häufig den Begriff Abtastregler. Typische Werte der Abtastzeit bei Kompaktreglern liegen zwischen 50 ... 500 ms. Technisch lassen sich aber auch digitale Regler mit Abtastzeiten < 1 ms realisieren. Ist die Regelstrecke vergleichsweise langsam gegenüber der Abtastrate des Reglers, verhält sich ein digitaler Regler ähnlich eines analogen Reglers, da sich das abtastende Verhalten nicht bemerkbar macht.

1.7 Stellglieder

Das Stellglied dient dazu, die Regelgröße beeinflussen zu können. Es hat in erster Linie die Aufgabe einen Massen- oder Energiestrom zu dosieren. Die Massenströme können z. B. gasförmige oder flüssige Beschaffenheit haben, z. B. Erdgas, Dampf, Heizöl etc.

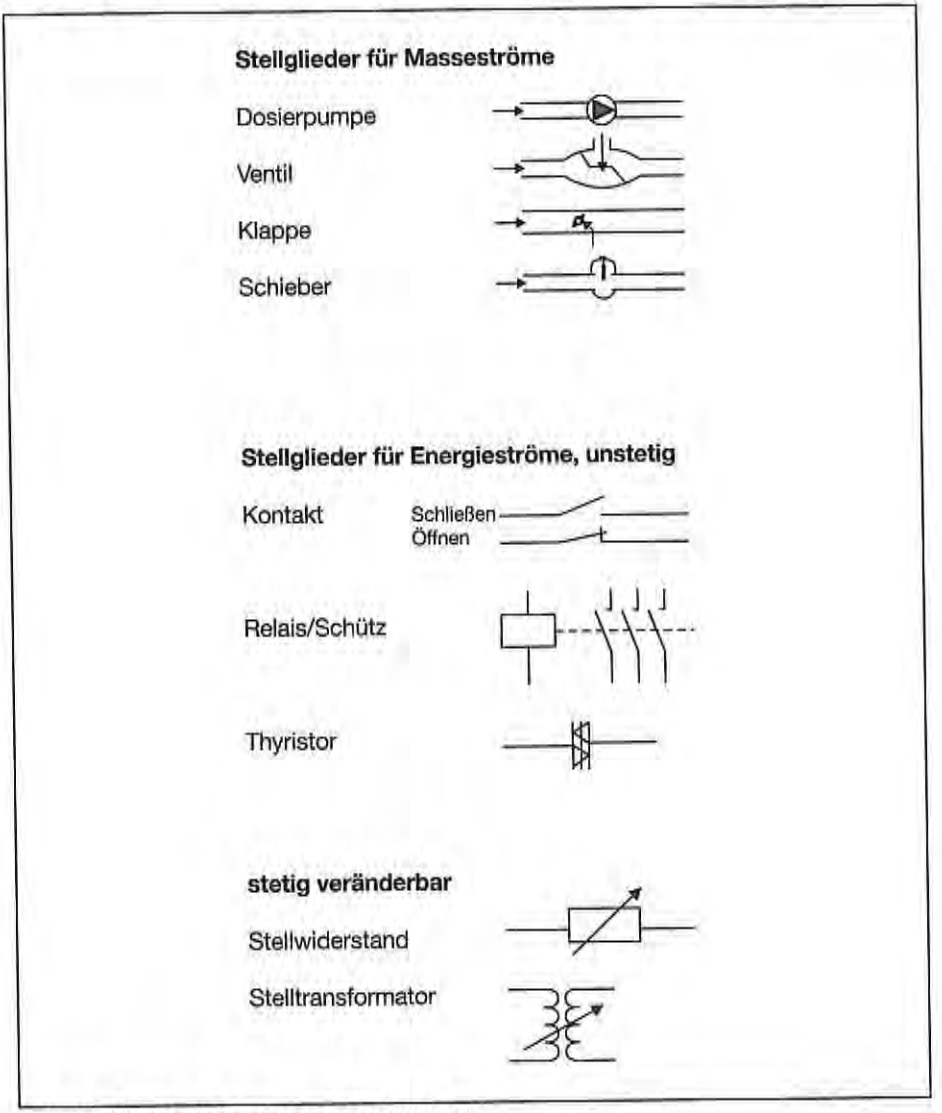


Abb. 10: Übersicht verschiedener Stellglieder

Stellantriebe für Druckluft/Drucköl

Membranantrieb
federbelastet

Membranantrieb
doppelseitig
beaufschlagt

Hubkolben
federbelastet

Stellantriebe für elektrische Energie

Elektromagnet

Magnet-Stellantrieb

Drehstrom-Stellmotor

Einphasen-Wechselstrom-
Stellmotor

Abb. 11: Übersicht verschiedener Stellantriebe

Bei den Energieströmen handelt es sich oft um elektrische Energie. Hier kann das Zuführen der Energie unstetig über Kontakte, Relais bzw. Schütze erfolgen oder stetig über Stelltransformatoren, Stellwiderstände oder Thyristorleistungssteller.

Das Stellglied wird oft durch sog. Stellantriebe betätigt, und zwar dann, wenn der Regler nicht in der Lage ist, das Stellglied selbst zu betätigen, weil er zu wenig Stellenergie abgeben kann, oder weil die vom Regler gelieferte Energieform zum Verändern der Stellgröße nicht geeignet ist. Dann steuert der Regler zweckmäßigerweise einen mechanisch-pneumatischen oder mit elektrischer Energie gespeisten Stellantrieb. Ein Beispiel hierfür ist, dass die in Regelgeräten integrierten Relais bei schaltenden Reglern meist nur Ströme bis max. 5A schalten können. Um nun die im Prozess geforderten hohen Leistungen steuern zu können, werden externe Leistungsschütze oder auch Halbleiterrelais verwendet.

Eine kurze Übersicht über die unterschiedlichen Stellglieder/Stellantriebe und ihre Ansteuerung durch entsprechende Regler gibt Tabelle 1.

Reglerart	Angesteuerte Stellglieder/Stellantriebe
Stetige Regler	Stellwiderstand Thyristor-Leistungssteller Ventile, Klappen, Schieber Drehzahlgeregelte Motoren
Zweipunktregler	Kontakt Relais, Schütz, Magnetventil Solid State Relais für Heizungen, Kühlungen usw.
Dreipunktregler (schaltend)	Heizungen, Kühlungen, Relais usw.
Dreipunktschrittregler	Wechselstrom-Stellmotor, Gleichstrommotor, Drehstrom-Stellmotor usw.

Tabelle 1: Reglerarten und Stellglieder/Stellantriebe

1.8 Andere Verfahren zum Konstanthalten von Größen

Die Regelung, d. h. Erfassen der Regelgröße, Vergleichen mit der Führungsgröße und Bilden der Stellgröße, ist nicht die einzige Möglichkeit, um eine Größe konstant zu halten. Es gibt noch eine Reihe andere Methoden, um Prozessgrößen konstant zu halten, die oftmals eine preiswerte Alternative zur Lösung über eine Regelung darstellen.

1.8.1 Ausnutzung physikalischer Effekte

Es gibt eine Reihe physikalischer Größen, die innerhalb eines weiten Bereiches selbst bei starken Änderungen der Einflussgrößen einen konstanten Wert behalten. Erwähnt sei hier z. B. der Haltepunkt von schmelzenden Köpern. Wie allgemein bekannt, bleibt die Temperatur beim Schmelzen von Eis konstant auf 0 °C. Solche physikalischen Gegebenheiten werden bei vielen Messungen, besonders in Labors, mit Erfolg ausgenutzt. Man kann also ohne größeren regelungstechnischen Aufwand eine Temperatur damit sehr genau konstant halten.

1.8.2 Konstruktive Maßnahmen

Auch durch konstruktive Maßnahmen kann man teilweise auf einfache Art und Weise Größen konstant halten. Will man z. B. das Flüssigkeitsniveau in einem Behälter oder einem Becken auf einem konstanten Wert halten, auch bei unterschiedlichen Zulaufmengen, so kann das auf einfache Art und Weise durch einen Überlauf geschehen (Abbildung 12a). Als weiteres Beispiel sei hier ein Schwimmbecken erwähnt, bei dem ebenfalls über einen Überlauf rund um das Becken das Niveau konstant gehalten werden kann.

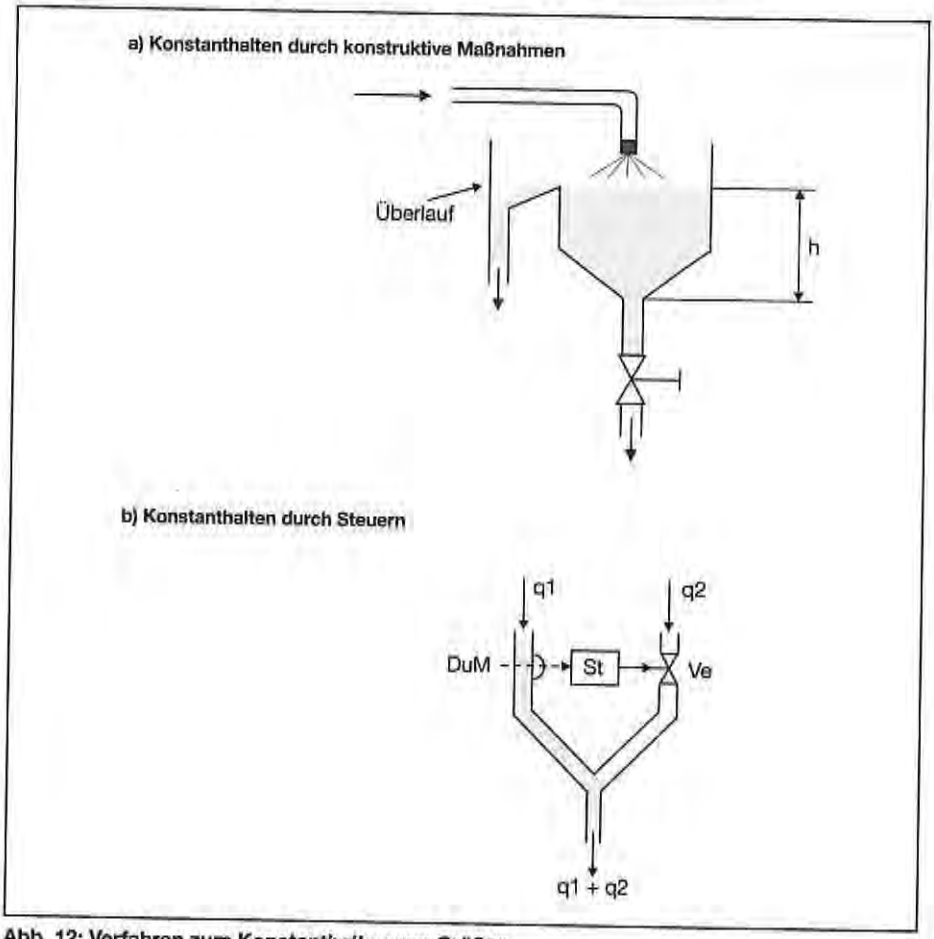


Abb. 12: Verfahren zum Konstanthalten von Größen

1.8.3 Konstanthalten durch Steuern

Im Abschnitt 1.3 „Steuern und Regeln" wurde darauf hingewiesen, dass man durch eine Steuerung eine Größe konstant halten kann. Als Beispiel diente hier das Konstanthalten einer Temperatur in einem Ofen. Geht man von einer konstanten Spannung, d. h. gleichmäßige Energiezufuhr eines elektrobeheizten Ofens, aus, so lässt sich durch verschiedene Einstellungen am Leistungssteller feststellen, welche Temperatur sich im Ofen einstellt. Notiert man die Temperaturwerte, d. h. , erstellt man eine Temperaturskala und bringt diese am Leistungssteller an, lässt sich im Nachhinein jede gewünschte Ofentemperatur einstellen. Da die Einstellung von Hand erfolgt, nennt man dies auch Handsteuerung. Die Eingangsgröße bei dieser Temperatursteuerung stellt die Stellung des Leistungsstellers dar, die Ausgangsgröße, die Ofentemperatur, die über ein entsprechendes Anzeigegerät visualisiert wird (Abbildung 1).

Die Eingangsgröße bei einer Steuerung muss nicht von Hand verstellt, sondern kann auch automatisiert werden, man spricht auch von einer selbsttätigen Steuerung. Als Beispiel soll hier eine Mischungssteuerung dienen. Die Aufgabe besteht darin, dass einem von außen vorgegebenen Durchfluss q1 ein proportionaler Durchfluss q2 zugeordnet werden soll, um ein bestimmtes Mischungsverhältnis zu erzielen (Abbildung 12b). Hierzu wird der Durchfluss q1 als Eingangsgröße erfasst, auf ein Steuergerät gegeben, dieses betätigt als Ausgangsgröße ein Stellglied und verändert den Durchfluss q2.

Man sieht hier, dass man eine Prozessgröße auch mit Hilfe einer Steuerung auf einem konstanten Wert halten kann. Man muss jedoch berücksichtigen, dass die Steuerung gegenüber einer Regelung auch wesentliche Nachteile hat. Treten z. B. Störgrößen im Prozess auf oder ändern sich die Übertragungseigenschaften von Steuergliedern, so kann sich auch bei einem festeingestellten Übertragungsverhalten zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße der Ausgang unerwünscht ändern.

1.9 Schwerpunkte der Regelungstechnik

Heutzutage wird die Regelungstechnik fast auf allen Gebieten technischer Anwendung eingesetzt. Wie bereits im Abschnitt 1.1 erwähnt, ergeben sich in den unterschiedlichen Anwendungsgebieten gewisse Gemeinsamkeiten, die man mit einer einheitlichen Vorgehensweise beschreiben kann. Es haben sich jedoch, bedingt durch die unterschiedlichen Regelgrößen, Ausregelgeschwindigkeiten, verschiedenen Maschinen- und Gerätetypen sowie Besonderheiten der Anwendungsgebiete gewisse Hauptanwendungen herauskristallisiert.

- Verfahrensregelung ☜
- Antriebsregelung (Drehzahlregelung)
- Regelung elektrischer Größen
- Lagerregelung
- Kursregelung

Abb. 13: Schwerpunkte der Regeltechnik

Verfahrensregelung
Hierunter sind Regelungen von Temperatur, Druck, Durchfluss, Niveau etc. in den unterschiedlichsten industriellen Einsatzgebieten zu verstehen. Betrachtet man hier das Kriterium „Ausregelzeit", so sind es Größenordnungen im Millisekundenbereich, z. B. Druckregelung, bis hin in den Stundenbereich bei der Temperaturregelung größerer Anlagen (Industrieofen).

Antriebsregelungen (Drehzahlregelung)
Hierunter versteht man die Regelung der Drehzahl von Motoren in unterschiedlichen Maschinen und Anlagen, z. B. zur Herstellung von Kunststoffen, Papiererzeugung oder Textilmaschinen. Die eingesetzten Regelgeräte sind für diese Anwendung meist speziell zugeschnitten, da hier z. B. Störgrößen, die im Zehntelsekunden-Bereich liegen, ausgeregelt werden müssen.

Regelung elektrischer Größen
Hierunter versteht man das Ausregeln von elektrischen Größen, z. B. Spannung, Strom, Leistung oder auch Frequenz. Es handelt sich hierbei um Geräte, die zur Stromerzeugung dienen oder zur Konstanthaltung der Kennwerte von Versorgungsnetzen. Hier können ebenfalls Störgrößen von einigen Zehntelsekunden und kürzer auftreten.

Lageregelung
Hierunter versteht man das Positionieren von z. B. Werkzeugen, Werkstücken oder kompletten Einheiten, in einer Ebene oder auch räumlich. Als Beispiel sei hier eine Fräsmaschine oder auch die Lageregelung von Geschützen bei Schiffen oder Panzern erwähnt. Auch hier muss das Ausregeln auf die Führungsgröße sehr schnell und sehr genau erfolgen.

Kursregelung
Die Regelung des Kurses von Schiffen oder Flugzeugen. Besondere Anforderungen, die hier an das Regelgerät gestellt werden, sind ebenfalls eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und Betriebssicherheit bzw. ein kleines Gewicht.

1.10 Aufgaben eines Regelungstechnikers

Nachdem wir uns mit einigen Begriffen und Bezeichnungen in Unterschieden zwischen einer Steuerung und Regelung, verschiedenen Bauformen von Regelgeräten und Stellgliedern beschäftigt haben, soll nun einmal zusammengefasst werden, mit welchen Aufgaben es ein Regelungstechniker in der Praxis eigentlich zu tun hat.

Die wichtigsten Aufgaben für einen Regelungstechniker stellen sich wie folgt dar:

- Festlegung der Regelgröße
- Prüfen, ob eine Regelung nennenswerte Vorteile bringt
- Festlegung des Messortes
- Feststellung der Störgrößen
- Wahl des Stellgliedes
- Wahl eines geeigneten Regelgerätes
- Montage der Regelgeräte unter Beachtung der einschl. Vorschriften
- Inbetriebnahme, parametrieren, optimieren

Abb. 14: Aufgaben eines Regelungstechnikers

Als Regelungstechniker sei hier nicht der Ingenieur oder Techniker von Hochschulen oder Entwicklungsabteilungen gemeint, der sich im Labor mit der Entwicklung von Regelgeräten, Regelalgorithmen oder speziellen Regelschaltungen beschäftigt. Solche Spezialisten benötigten wesentlich tiefer gehende Kenntnisse. Die Frage richtet sich an den Personenkreis, der vor Ort in Firmen unbefriedigend arbeitende Regelkreise optimieren soll, eine Steuerung von Hand auf eine Regelung umstellen soll oder diejenigen, die einen Regelkreis für eine Neuanlage dimensionieren und bearbeiten müssen. In den meisten Fällen kommt man bei diesen Aufgaben ohne höhere Mathematik aus. Es genügen gewisse Grundkenntnisse, Überschlagsformeln und die Kenntnis einiger Erfahrungswerte.

Grundsätzlich sollte man bei der Dimensionierung einer Regelung immer beachten, dass mit wachsenden Anforderungen auch meist die Kosten erheblich ansteigen.

2.1 Zeitverhalten technischer Systeme

Die Regelstrecke ist der Anlagenteil der je nach Aufgabenbereich beeinflusst werden muss. In der Praxis stellt die Regelstrecke die zu regelnde Anlage oder den zu regelnden Prozess dar. Sie umfasst normalerweise eine Reihe von Gliedern innerhalb einer Anlage. Die Eingangsgröße ist die von der Regeleinrichtung kommende Stellgröße y. Die Ausgangsgröße stellt die Regelgröße x dar. Zu diesen beiden Größen kommen noch die Störgrößen z, die bedingt durch die äußeren Einflüsse oder prozessabhängige Veränderungen auf die Regelstrecke wirken.

Beispiel einer Regelstrecke sei hier ein mit Gas betriebener Ofen (Abbildung 15). Am Anfang der Regelstrecke steht das Ventil, welches als Eingangssignal die Stellgröße des Reglers erhält. Mit Hilfe des Ventils wird der Gasfluss in den Brenner verändert. Der Brenner erzeugt durch die Verbrennung des Gases Wärmeenergie, wodurch das Gut auf eine höhere Temperatur gebracht wird. Erfolgt eine Messung der Temperatur (Regelgröße) im Gut, bildet dieses ebenfalls einen Teil der Regelstrecke. Als letzte Komponente der Regelstrecke sei hier der Sensor genannt, der die Aufgabe hat, die Temperatur in ein elektrisches Signal zu wandeln. Störgrößen sind in der Regelstrecke alle die Größen, bei deren Veränderung sich bei gleicher Stellgröße für das Ventil eine andere Temperatur ergibt.

Beispiel: Ist die Stellgröße gerade so groß, dass sich eine gewünschte Temperatur im Gut ergibt und verändert sich die Störgröße Umgebungstemperatur hin zu kleineren Werten, wird bei unveränderter Stellgröße die Temperatur im Gut ebenfalls kleiner werden.

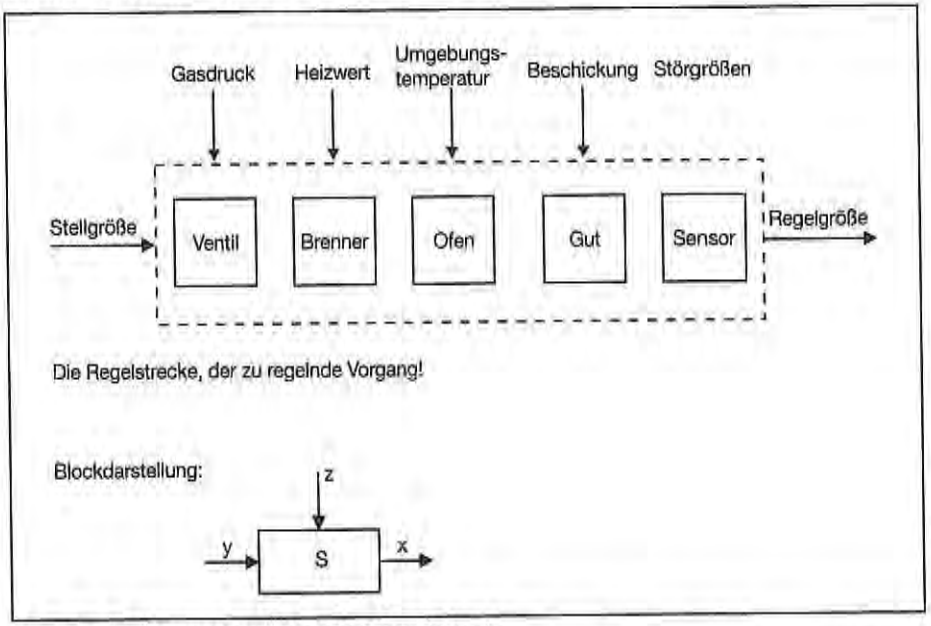


Abb. 15: Ein-/Ausgangsgrößen einer Regelstrecke

Wichtig für den Aufbau eines Regelkreises ist es zu wissen, wie die Regelstrecke reagiert, wenn sich eine der genannten Einflussgrößen ändert. Zum Einen ist es von Interesse zu wissen, auf welchen neuen Wert sich bei solchen Änderungen die Regelgröße einstellt, wenn man abwartet bis sich der sogenannte Beharrungszustand eingestellt hat. Andererseits ist wichtig zu erfahren, wie

2 Die Regelstrecke

der zeitliche Verlauf des Überganges bis zum neuen Beharrungswert aussieht. Die Kenntnis der streckenbestimmten Eigenschaften ist notwendig und kann spätere Schwierigkeiten schon bei der Konstruktion des Prozesses vermeiden helfen. In der Vielzahl ihres unterschiedlichen technischen Aufbaus kann man die Regelstrecken grob durch folgende Merkmale unterscheiden:

- **mit und ohne Ausgleich,**
- **mit und ohne Totzeit bzw. Zeitglieder,**
- **linear oder nicht linear.**

In den meisten Fällen liegt jedoch eine Kombination der einzelnen Eigenschaften vor.

Eine Voraussetzung für die Auslegung von Regelungen und die korrekte Realisierung einer Regelaufgabe ist eine genaue Charakterisierung und Kenntnis der Regelstrecke. Ohne ein genaues Wissen um das Verhalten der Regelstrecke ist es nicht möglich geeignete Regler auszuwählen und diese zu parametrieren. Die Beschreibung des Zeitverhaltens ist wichtig, um das Ziel der Regelung zu erreichen, nämlich das Zeitverhalten technischer, dynamischer Systeme zu beherrschen und dem technischen System einen bestimmten Zeitverlauf aufzuprägen.

Statische Kennlinie

Um das statische Verhalten eines technischen Systems zu beschreiben, betrachtet man das Ausgangssignal in Abhängigkeit des Eingangssignales. Das heißt, der Wert des Ausgangssignales wird bei verschieden Eingangssignalen ermittelt. Handelt es sich um ein elektrisches oder elektronisches System, so kann man z. B. eine Spannung über einen Spannungsgeber auf den Eingang schalten und die Ausgangsspannung ermitteln. Bei dem statischen Verhalten von Regelkreisgliedern interessiert man sich nicht dafür wie das zu betrachtende Regelglied auf seinen Endzustand kommt. Man vergleicht hier nur die Höhe zwischen Ein- und Ausgangssignal nach der Einschwing- oder Einstellzeit.

Bei der Messung von statischen Kennlinien interessiert u. a. die Frage, ob das entsprechende Regelkreisglied ein lineares Verhalten zeigt, d. h. ob die Ausgangsgröße eines Regelkreisgliedes der Eingangssignalgröße proportional folgt. Ist dies nicht der Fall, versucht man den genauen Funktionsverlauf zu ermitteln. Viele in der Praxis verwendete Regelkreisglieder weisen in einem begrenzten Bereich ein lineares Verhalten auf. Speziell für die Regelstrecke bedeutet dies, der Istwert verdoppelt sich bei einer Verdoppelung des Stellgrades, er steigt bzw. sinkt gleichermaßen wie der Stellgrad.

Ein Beispiel für ein Übertragungsglied mit linearer Kennlinie ist ein RC-Netzwerk. Die Ausgangsspannung U2 folgt zwar der angelegten Spannung U1 mit einem gewissen Zeitverhalten, die einzelnen Endwerte sind jedoch proportional zur angelegten Spannung (Abbildung 16). Man sagt auch, die Streckenverstärkung einer linearen Strecke ist konstant, da eine Änderung der Eingangsgröße immer die gleiche Änderung der Ausgangsgröße zur Folge hat.

Betrachtet man jedoch einen elektrobeheizten Ofen, so handelt es sich hierbei um eine nichtlineare Strecke. Aus Abbildung 16 wird bereits ersichtlich, dass eine Änderung der Heizleistung von 500 auf 1.000 W eine größere Temperaturerhöhung zur Folge hat als beispielsweise eine Erhöhung von 2.000 auf 2.500W. Die Temperatur des Ofens steigt nicht im gleichen Maße wie die zugeführte Leistung ähnlich dem Verhalten eines RC-Netzwerkes, da die Temperaturabstrahlung bei höheren Temperaturen immer stärker wird. Man muss daher eine immer höhere Leistung aufwenden, um die Energieverluste aufzuheben. Der Übertragungsbeiwert bzw. die Streckenverstärkung bei solchen Systemen ist nicht konstant und nimmt mit höheren Istwerten immer weiter ab. Näheres zu diesem Thema wird in Abschnitt 2.8 behandelt.

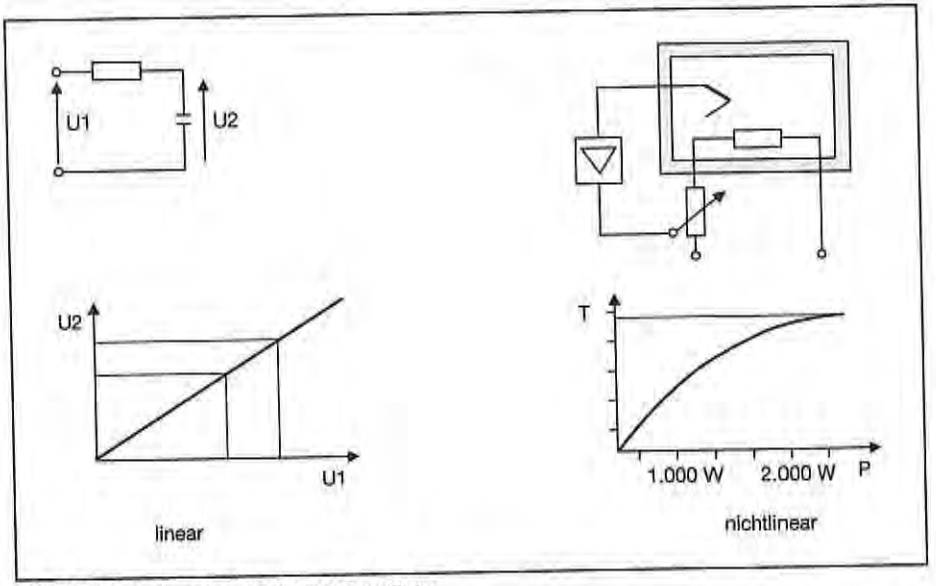


Abb.16: Lineare und nichtlineare Kennlinie

Dynamische Kennlinie

Für die Charakterisierung des Regelkreises ist das Zeitverhalten der Strecke ausschlaggebend. Die dynamische Kennlinie beschreibt, wie sich das Ausgangssignal des Übertragungsgliedes (der Strecke) verhält, wenn sich das Eingangssignal zeitlich verändert. Grundsätzlich gibt es die Möglichkeit, dass sich die Ausgangsgröße sofort und in dem selben Maße wie die Eingangsgröße verändert. Bei vielen Systemen reagiert das System jedoch mit einer gewissen Verzögerung.

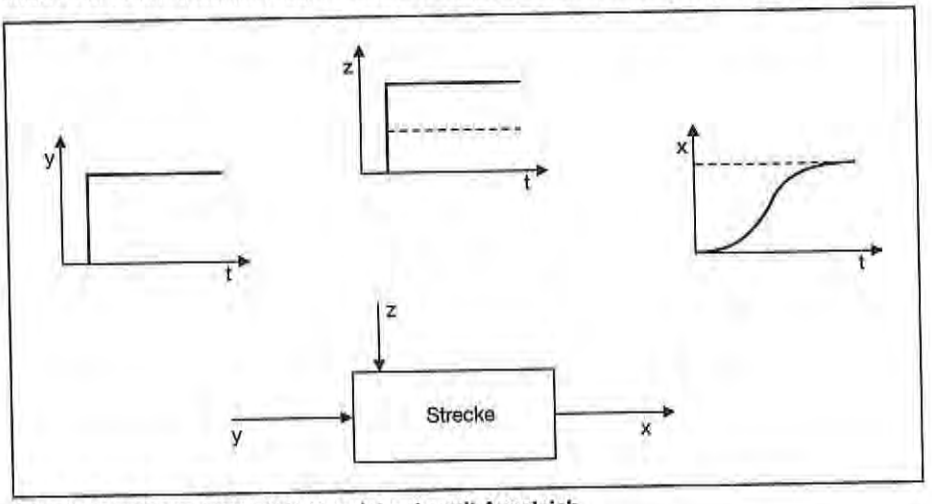


Abb. 17: Sprungantwort einer Regelstrecke mit Ausgleich

2 Die Regelstrecke

Die einfachste Art und Weise, das Ausgangssignalverhalten zu charakterisieren, ist die Aufnahme des Istwertverlaufes (Regelgröße) über der Zeit bei einer sprunghaften Änderung der Stellgröße. Zur Ermittlung der Sprungantwort schaltet man auf den Eingang der Regelstrecke eine sprungförmige Änderung auf und beobachtet die zeitliche Veränderung der Regelgröße. Es muss nicht immer ein Sprung von 0 auf 100 % sein, es können ebenfalls Änderungen in kleineren Bereichen, z. B. von 30 auf 50 %, durchgeführt werden. Durch eine solche Sprungantwort, auf die im Abschnitt 2.6 noch näher eingegangen wird, lässt sich das dynamische Verhalten von Regelstrecken eindeutig kennzeichnen.

2.2 Strecken mit Ausgleich

Strecken mit Ausgleich reagieren auf eine Änderung der Stellgröße oder eine Störung durch Ausbildung eines neuen, stabilen Istwertes. Ein solcher Prozess ist in der Lage, die zugeführte Energie wieder abzuführen bzw. einen Gleichgewichtszustand zu bilden.

Klassisches Beispiel ist ein Ofen, bei dem nach einer Erhöhung der Heizleistung die Temperatur solange steigt, bis sich eine neue Gleichgewichtstemperatur einstellt, bei der die abgegebene Wärmemenge gleich der zugeführten Wärmemenge ist. Bei einem Ofen bildet sich der neue Gleichgewichtszustand jedoch zeitverzögert nach einem Stellgrößensprung aus. Bei sogenannten verzögerungsfreien Regelstrecken folgt die Regelgröße der Stellgröße unverzögert. Die Sprungantwort einer solchen Regelstrecke hat dann die in Abbildung 18 gezeigte Form.

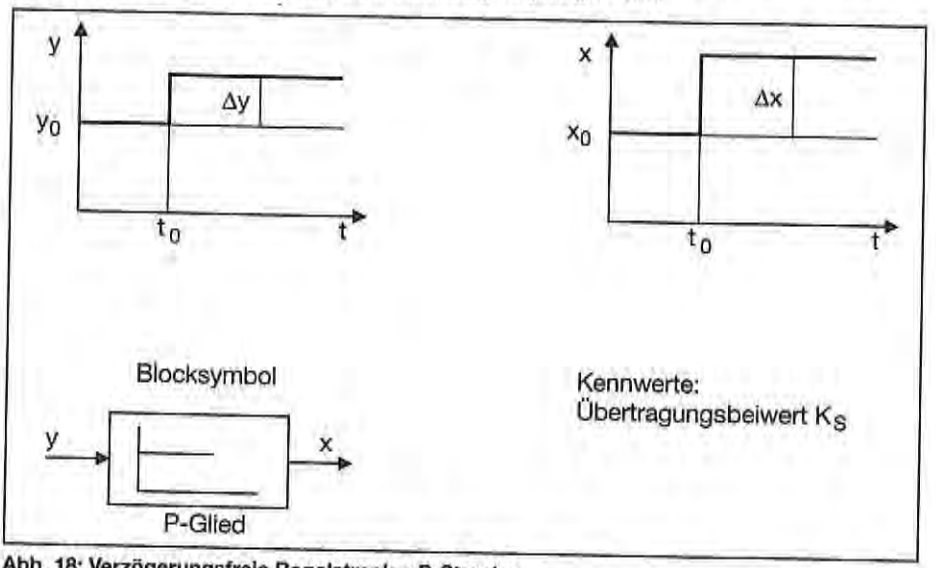


Abb. 18: Verzögerungsfreie Regelstrecke; P-Strecke

Bei solchen Regelstrecken mit Ausgleich ist die Regelgröße proportional zur Stellgröße, d. h. sie steigt im gleichen Maße wie die Stellgröße. Solche Strecken werden auch als Proportional- oder kurz P-Strecken bezeichnet. Für den Zusammenhang zwischen Regelgröße x und Stellgröße y gilt folgender Zusammenhang:

$$\Delta x = K_S \bullet \Delta y$$

Den Faktor K_S bezeichnet man als Sreckenverstärkung (Übertragungsbeiwert). Auf die einzelnen Zusammenhänge wird jedoch im Abschnitt 2.8 noch näher eingegangen.

Beispiele für proportionale Regelstrecken sind z. B.:

- mechanisches Getriebe ohne Schlupf
- mechanische Übertragung über Hebel
- Transistor (Kollektorstrom I_c folgt dem Basisstrom I_B praktisch unverzögert)

2.3 Strecken ohne Ausgleich

Eine Strecke ohne Ausgleich reagiert auf eine Stellgröße oder eine Störung mit einer ständigen konstanten Veränderung des Istwertes. Eine derartige Regelstrecke tritt z. B. bei der Kursregelung von Flugzeugen auf. Hier vergrößert sich die Istwertabweichung (Kursabweichung) bei einer Stellgrößenänderung (Ruderstellung) proportional zur Zeit. D. h. sie wird mit zunehmender Zeit immer größer (Abbildung 19).

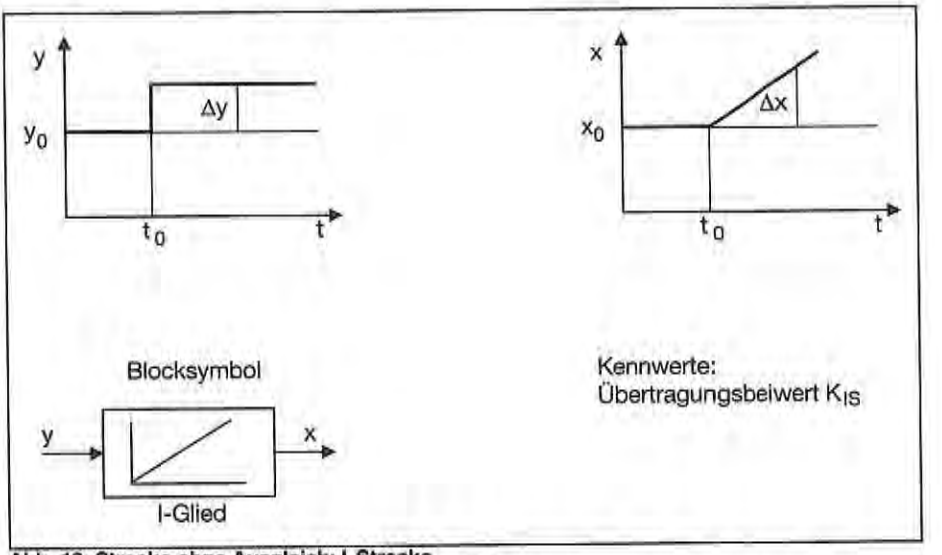


Abb. 19: Strecke ohne Ausgleich; I-Strecke

Wegen dieses integrierend wirkenden Verhaltens werden solche Strecken auch als Integral- oder I-Strecken bezeichnet. Bei einer solchen Strecke wächst bei einer sprunghaften Änderung der Stellgröße um Δy die Regelgröße x proportional mit der Zeit an. Wird die Änderung der Stellgröße verdoppelt, so ist auch die Regelgröße nach einer bestimmten Zeit doppelt so groß.

Für Δy = konstant gilt allgemein folgender Zusammenhang:

$$\Delta x = K_{IS} \bullet \Delta y \bullet t$$

K_{IS} wird Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich genannt. Die Regelgröße wächst also nicht nur proportional mit der Stellgröße Δy wie bei einer Strecke mit Ausgleich, sondern auch proportional zu der Zeit t.

Weitere Beispiele für Strecken ohne Ausgleich sind:

- Elektromotor, der eine Gewindespindel antreibt
- Flüssigkeitsstand in einem Behälter (Abbildung 20)

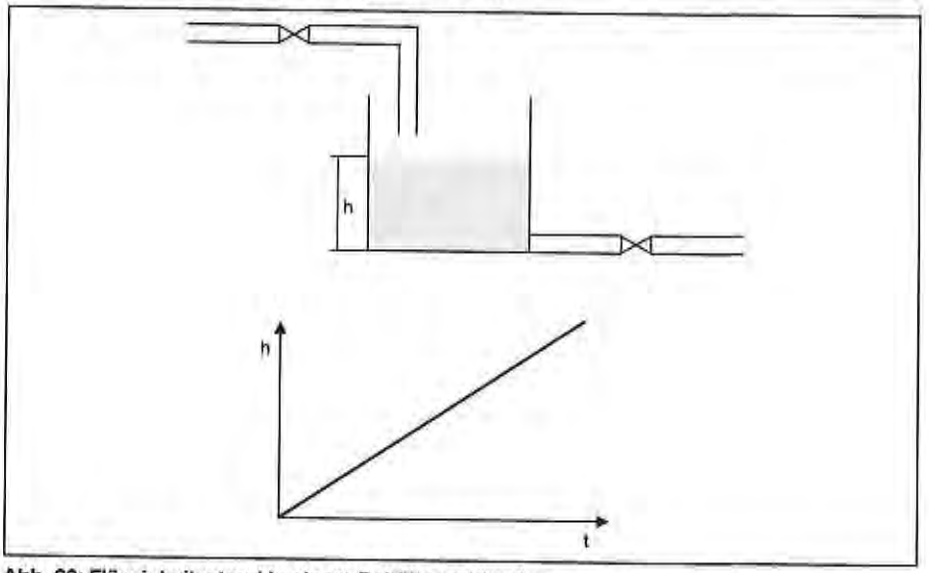


Abb. 20: Flüssigkeitsstand in einem Behälter; I-Strecke

Das bekannteste Beispiel einer Regelstrecke ohne Ausgleich dürfte ein Flüssigkeitsbehälter sein, der über einen Zulauf und Ablauf verfügt. Das Auslaufventil, welches die Störgröße darstellt, sei geschlossen. Wird nun das Zulaufventil geöffnet und in eine feste Position gebracht, steigt der Füllstand (h) im Behälter stetig und gleichmäßig im Lauf der Zeit an.

Der Stand im Behälter steigt um so schneller, je größer die Zulaufmenge pro Zeiteinheit ist. Der Wasserstand steigt so lange bis der Behälter überläuft. Eine Selbststabilisierung ist hier nicht vorhanden. Auch nach einer Störung, z. B. Einbeziehung des Ablaufes, stellt sich kein neuer Gleichgewichtszustand wie bei einer Regelstrecke mit Ausgleich ein (Ausnahme Zulauf = Ablauf).

Regelstrecken ohne Ausgleich sind, weil Ihnen eine Stabilisierung fehlt, im allgemeinen schwieriger zu regeln, als Strecken mit Ausgleich. Begründet liegt dies auch darin, dass im Falle eines Überschwingens bei zu starker Stellgrößenänderung durch den Regler der zu hohe Istwert nicht durch einen Streckenausgleich abgebaut werden kann. Denkt man hier an einen zu starken Ruderausschlag bei einer Kurskorrektur, so kann dieser nur durch eine entgegengesetzte Stellgröße korrigiert werden. Hier kann eine zu große Stellgrößenänderung jedoch wieder das Unterschwingen unter den gewünschten Sollwert zur Folge haben, somit ist die Regelung einer solchen Strecke schwieriger.

2.4 Strecken mit Totzeit

Bei Strecken mit reiner Totzeit reagiert der Prozess erst nach Ablauf einer Zeitspanne der Totzeit T_t. Ebenso reagiert der Istwert verspätet auf die Zurücknahme des Stellgrades (Abbildung 21).

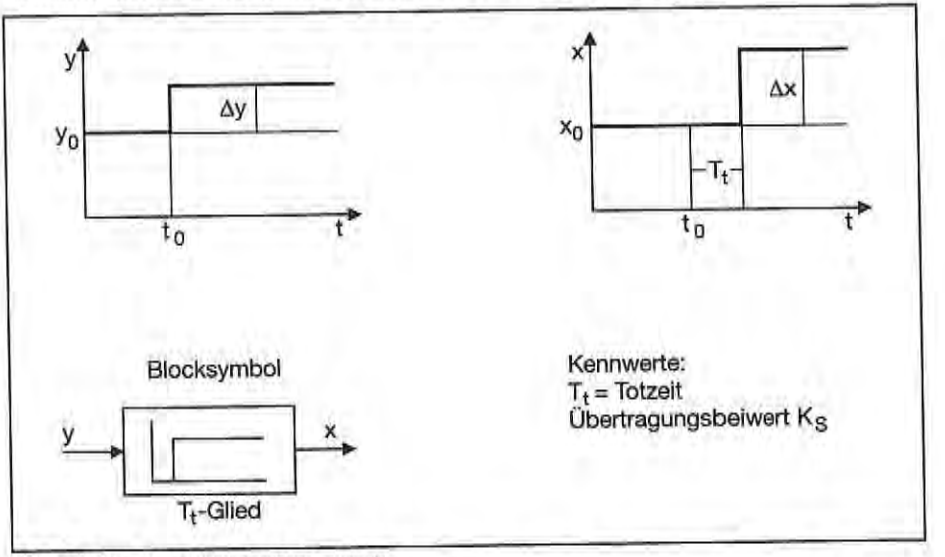


Abb. 21: Strecke mit Totzeit; T_t-Strecke

Ein typisches Beispiel hierzu ist ein Förderband, bei dem es erst eine gewisse Zeit dauert bis die Änderung der Schüttgeschwindigkeit am Messort registriert wird (Abbildung 22).

Derartige totzeitbehaftete Systeme werden auch als T_t-Strecken bezeichnet. Für den Zusammenhang zwischen Regelgröße x und Stellgröße y gilt folgender Zusammenhang:

$$\Delta x = K_S \bullet \Delta y$$

jedoch verzögert um die Totzeit T_t.

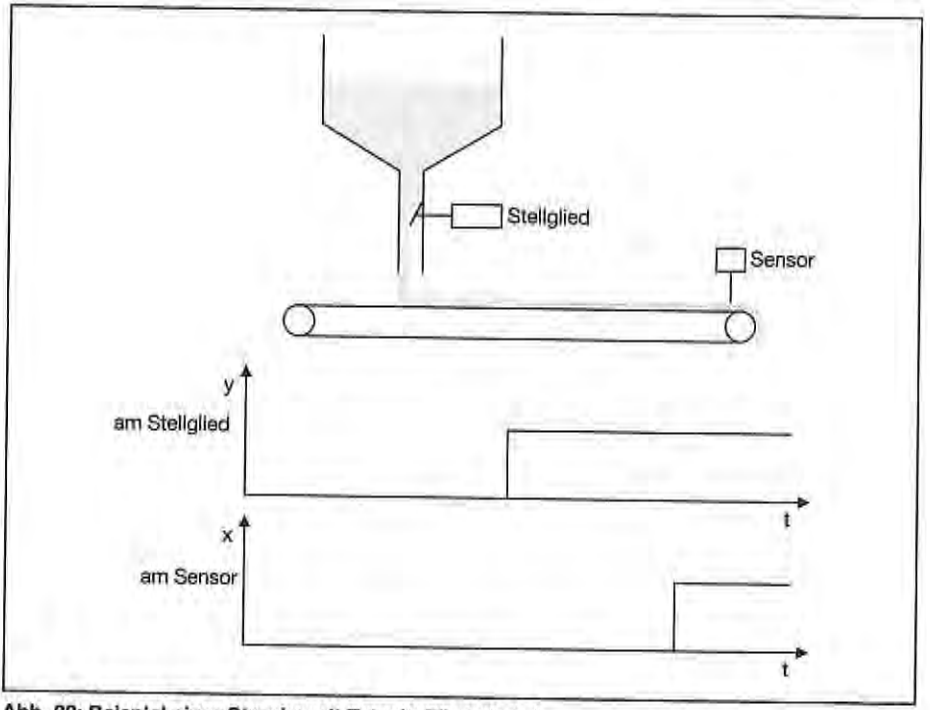


Abb. 22: Beispiel einer Strecke mit Totzeit; Förderband

Ein weiteres Beispiel sind Druckregelungen mit langen Gasleitungen. Wegen der Kompressibilität des Gases wird eine gewisse Zeitspanne benötigt, bis sich eine Druckänderung ausgebreitet hat. Flüssigkeitsgefüllte Rohrleitungen dagegen sind nahezu totzeitfrei, da sich hier eine Druckstörung mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Auch die Schaltzeiten von Relais und die Laufzeit von Stellgliedern wirken sich als Verzögerung aus, so dass durch die Elemente des Regelkreises vielfach Totzeiten im Prozess entstehen.

Totzeiten sind ein großes Problem in der Regeltechnik, da die Wirkung einer Stellgradänderung immer erst nach Ablauf der Totzeit in der Regelgröße abgebildet wird. War die Stellgradänderung zu groß, kann dies erst nach dieser Zeitspanne bemerkt und mit einem verkleinerten Stellgrad reagiert werden. Ist dieser dann allerdings zu klein, muss er - wieder erst nach Ablauf der Totzeit - vergrößert werden usw. Totzeitbehaftete Systeme neigen daher immer zu Schwingungen. Auch lassen sich Totzeiten nur mit sehr komplexen Reglerentwürfen wirklich kompensieren. Es gilt daher schon bei der Konzeption und Konstruktion der Regelstrecke Totzeiten möglichst zu vermeiden, was in vielen Fällen schon durch eine geschickte Anordnung des Sensors und der Stellgrößeneinspeisung erreicht werden kann. Wärme- und Strömungswiderstände sollten vermieden oder auf ein Minimum reduziert werden. Eine Sensoranordnung an einer Stelle im Prozess, an der eine Mittelwertbildung des Prozesszustandes stattfindet, unter Vermeidung von Toträumen, Wärmewiderständen, Reibung etc. ist immer anzustreben.

Totzeiten können sowohl bei Strecken mit oder ohne Ausgleich auftreten.

2.5 Strecken mit Verzögerung

Auch ohne das Vorliegen einer Totzeit breitet sich bei vielen Prozessen eine Störung zeitverzögert aus. Anders als im geschilderten Fall tritt sie jedoch nicht nach Ablauf einer Zeitspanne in voller Stärke auf, sondern ändert sich auch in einem sprunghaften Verlauf des Eingriffs kontinuierlich.

Wir bleiben beim Beispiel Ofen und schauen uns die Temperaturausbreitung im Inneren an:

Bei einer plötzlichen Änderung der Heizleistung muss die Energie zunächst den Heizstab, das Ofenmaterial usw. erwärmen bis durch den Fühler im Ofen eine Temperaturänderung festgestellt werden kann. Die Temperatur steigt also zunächst langsam an, bis die Temperaturstörung sich ausgebreitet hat und ein konstanter Energiefluss stattfindet. Dann steigt sie kontinuierlich. Da sich aber mit der Zeit die Temperatur des Heizstabes und des Fühlers immer mehr annähern, wird der Temperaturzuwachs schließlich langsamer und strebt einem Endwert zu (Abbildung 23).

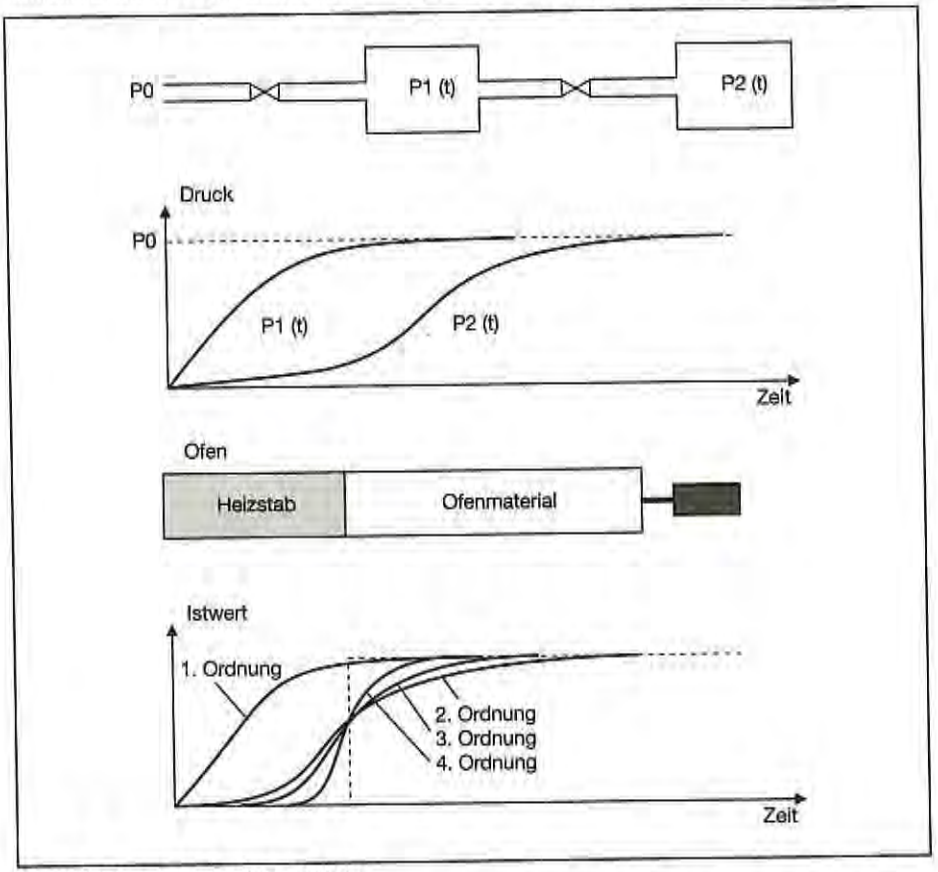


Abb. 23: Strecken mit Verzögerung

Eine Analogie hierzu sind 2 Druckbehälter, die über ein Drosselventil miteinander verbunden sind. Auch hier muss die Luft zunächst in den ersten Behälter strömen und einen Druck aufbauen, bis

sie in den zweiten Behälter strömt. Schließlich erreicht der Druck im ersten Behälter den Speisedruck und es strömt keine Luft mehr hinein. Durch die sich langsam angleichenden Behälterdrücke erfolgt der Druckausgleich zwischen den Behältern immer langsamer. D. h., der Druck im zweiten Behälter steigt am Schluss immer langsamer. Der Istwert, in diesem Fall der Behälterdruck, wird daher bei einer sprunghaften Änderung des Stellgrades - hier der Druck in der Versorgungsleitung - folgenden Verlauf haben: Anfangs ebenfalls ein sehr schwacher Anstieg bis sich im ersten Druckspeicher ein gewisser Druck aufgebaut hat; dann ein gleichmäßiger Anstieg und schließlich ein asymtotisches Annähern an den Endwert.

Die Übergangsfunktion derartiger Systeme wird durch die Anzahl der vorhandenen Energiespeicher bestimmt, die durch Widerstände voneinander getrennt sind. Man spricht auch von der Anzahl der Verzögerungen oder Zeitglieder, die ein Prozess besitzt.

Mathematisch lassen sich derartige Strecken durch eine Gleichung (eine Potenzreihe) beschreiben, die für jeden Energiespeicher einen Therm (ein Exponentialglied) besitzt. Wegen dieses Zusammenhangs werden derartige Strecken als Strecken erster, zweiter, dritter usw. Ordnung bezeichnet.

Es kann sich hierbei sowohl um Strecken mit oder ohne Ausgleich, die ebenfalls totzeitbehaftet sein können, handeln.

2.5.1 Strecken mit einer Verzögerung (1. Ordnung)

Bei einer Regelstrecke mit einer Verzögerung, d. h. einem vorhandenem Energiespeicher, ändert sich die Regelgröße bei einer sprungweisen Stellgrößenänderung sofort ohne Verzögerung mit einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit und strebt dann immer langsamer dem Endwert zu (Abbildung 24).

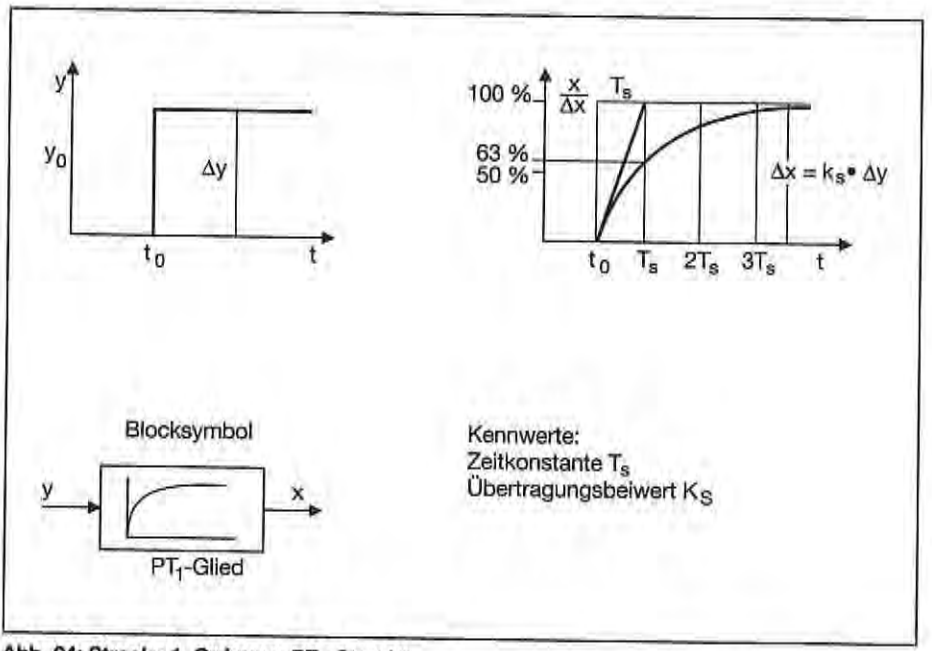
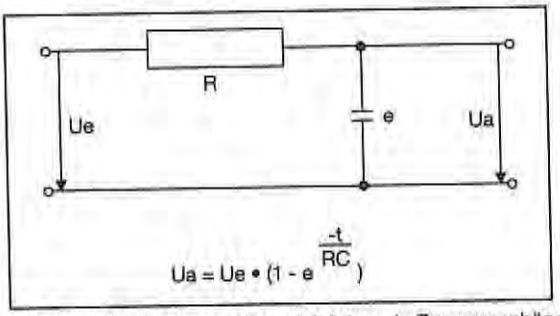


Abb. 24: Strecke 1. Ordnung; PT_1-Strecke



Beispiel:
Ein typisches Beispiel für eine Strecke 1. Ordnung ist das Laden oder Entladen eines Kondensators über einen Widerstand. Der Verlauf der Regelgröße (Spannung am Kondensator) folgt einer typischen Exponentialfunktion.

Für einen Sprung Δy ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$\Delta x = K_S \bullet \Delta y \bullet \left(1 - e^{\frac{-t}{T_S}}\right)$$

Der Therm in der Klammer bewirkt, dass die Regelgrößenänderung bei einer sprunghaften Änderung der Stellgröße nicht sofort folgt, sondern sich in der typischen Weise langsam dem Endwert nähert. Mit fortlaufender Zeit (großer Wert von t/T_S) geht der Klammerausdruck gegen 1, so dass für den Endwert gilt $\Delta x = K_S \bullet \Delta y$.

Wie aus Abbildung 24 hervorgeht sind nach Ablauf der Zeit $t = T_S$ 63% des Endwertes erreicht. Erst nach $t = 5\ T_S$ werden praktisch 100% des Endwertes erreicht.

Derartige Strecken werden auch als T_1-Strecken bezeichnet. Handelt es sich um eine Strecke mit Ausgleich bezeichnet man sie als PT_1-Strecke, bei Strecken ohne Ausgleich als IT_1-Strecke. Regelstrecken mit einer Verzögerung (1. Ordnung) kommen sehr häufig vor. Als Beispiel wären hier zu nennen:

- Aufheizen und Abkühlung eines Warmwasserbehälters
- Füllen eines Behälters über ein Drosselventil oder eine enge Leitung mit Luft oder Gas

2.5.2 Strecken mit zwei Verzögerungen (2. Ordnung)

Bei einer Regelstrecke mit zwei Verzögerungen müssen zwei Möglichkeiten zur Speicherung vorliegen, die durch einen Widerstand miteinander verbunden sind. Gekennzeichnet wird eine solche Strecke durch die Angabe des Übertragungsbeiwertes K_S und durch die Zeitkonstanten T_1 und T_2. Im Unterschied zu einer Regelstrecke 1. Ordnung verläuft hier die Regelgröße als Sprungantwort mit einer waagerechten Tangente am Startpunkt und besitzt einen Wendepunkt (Abbildung 25).

Der Verlauf der Sprungantwort kann hier nicht elementar aus T_1 und T_2 gezeichnet werden. Für einen Sprung Δy und T_1 ungleich T_2 ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta x = K_S \bullet \Delta y \bullet \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{\frac{-t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{\frac{-t}{T_2}}\right)$$

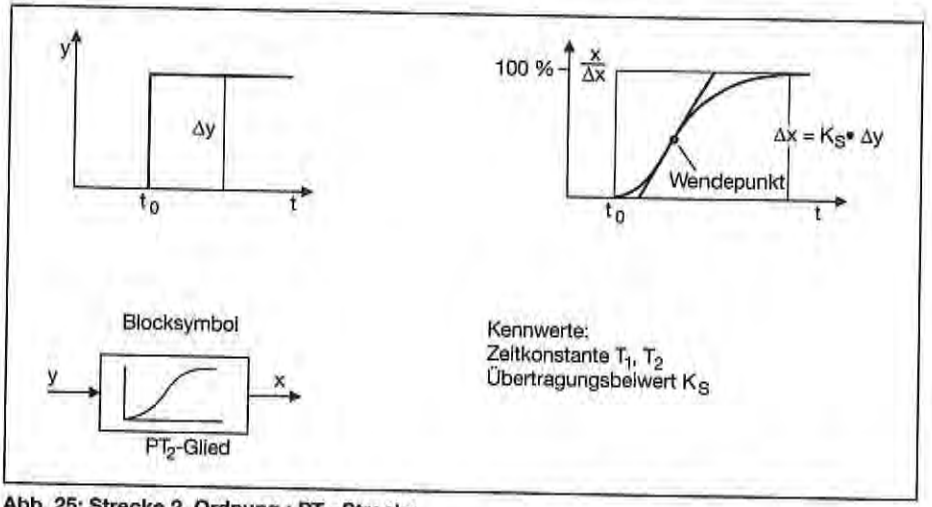


Abb. 25: Strecke 2. Ordnung ; PT_2-Strecke

Bei einer solchen Strecke ist die Bezeichnungen PT_2- Strecke üblich. Wie bereits erwähnt, haben Regelstrecken 2. Ordnung immer einen Wendepunkt, bei dem sich ihr Krümmungsradius von einer Links- in eine Rechtskurve ändert. Bei Strecken 1. Ordnung gibt es diesen Wendepunkt nicht.

Typische Beispiele für ein derartiges Verhalten sind:

- Füllen zweier hintereinander liegender Behälter über Drosselstellen mit Luft oder Gas (Abbildung 23)
- Aufladen zweier hintereinander geschalteter RC-Glieder
- Temperaturanstieg in einem beheizten Warmwasserbehälter, bei dem das Thermometer in einer Schutzhülse sitzt.

2.5.3 Strecken mit mehreren Verzögerungen (höherer Ordnung)

Wenn mehr als zwei Möglichkeiten zur Speicherung vorliegen, besitzt die Strecke eine entsprechend höhere Ordnung.
Interessanterweise ändert sich der Charakter der Übergangsfunktion bei höherer Ordnung gegenüber der Übergangsfunktion 2. Ordnung nicht. Allerdings wird der Kurvenanstieg immer steiler und immer verzögerter, bis er sich schließlich beim Vorliegen von unendlich vielen Zeitgliedern einer reinen Totzeit nähert (Abbildung 26).

Die Streckenordnung ist eine wichtige Kenngröße für einen Prozess insbesondere bei seiner mathematischen Beschreibung. Tatsächlich besteht aber nahezu jeder Prozess aus einer Vielzahl sehr unterschiedlicher Energiespeicher, wie Schutzarmaturen und Füllmaterialien für Temperaturfühler, Toträumen in Manometern usw. so dass eine exakte mathematische Beschreibung völlig unmöglich ist.

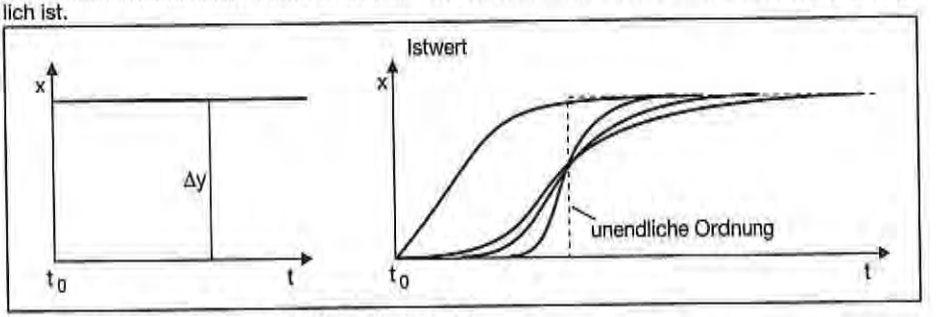


Abb. 26: Strecken mit mehreren Verzögerungen

Der explizite Grad der Ordnung ist in der Praxis nicht von großer Bedeutung wie es zunächst den Anschein hat. Entscheidend sind vielmehr die längsten Verzögerungszeiten, die den Charakter des Prozesses bestimmen.

Mit wachsender Ordnung ist eine Strecke immer schwieriger zu regeln, da sie sich immer mehr einem System mit Totzeit nähert. Auch ist eine Kombination mit einer reinen Totzeit möglich, was die Regelbarkeit noch weiter verschlechtert. Je unterschiedlicher die Zeitkonstanten der einzelnen Streckenteile sind, desto günstiger ist dies für die Regelbarkeit. Der ungünstigste Fall tritt dann ein, wenn die Zeitkonstanten den gleichen Wert aufweisen.

2.6 Aufnahme der Sprungantwort

Die Sprungantwort einer Regelstrecke, d. h. der Verlauf des Istwertes nach einer sprungartigen Stellgrößenänderung, kann durch zwei Zeiten charakterisiert werden :

- die Verzugszeit T_u und die
- Ausgleichszeit T_g

Ihre Kenntnis lässt zum einen eine schnelle Einschätzung der Regelbarkeit der Strecke zu, zum anderen ermöglichen sie ein einfaches Ermitteln der Regelparameter, wie später noch erläutert wird. Die Ordnung der Regelstrecke geht in diese Betrachtungsweise nicht mehr ein. Hintergrund dieser Betrachtungsweise ist, dass jede Strecke aus einer Totzeit T_u und einer Strecke erster Ordnung mit einer Zeitkonstante T_g zusammengesetzt angenommen wird.

Zur Ermittlung einer derartigen Übergangsfunktion und der daraus resultierenden Verzugs- und Ausgleichszeit schließt man an den Messwertgeber (Sensor) einen Schreiber an und ändert die Stellgröße (z. B. den Heizstrom) schlagartig. Die Änderung darf dabei natürlich nur so groß sein,

dass der neue Sollwert ohne Zerstörung auch erreicht werden kann. Der Verlauf des Istwertes wird aufgezeichnet, die Wendetangente an die Kurve angelegt und T_u und T_g gemäß Abbildung 27 ermittelt.

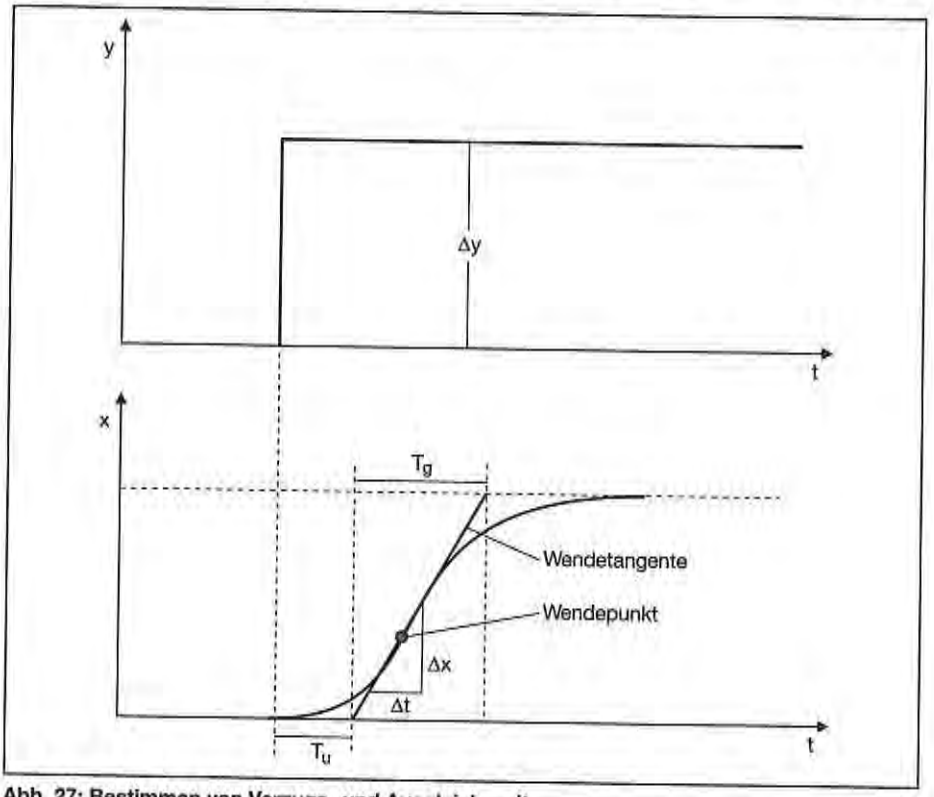


Abb. 27: Bestimmen von Verzugs- und Ausgleichszeit

Das Verhältnis von Verzugs- und Ausgleichszeit gibt Auskunft über den Charakter und die Regelbarkeit der Strecke:

$T_g/T_u > 10$: gut regelbar

$T_g/T_u = 10...3$: noch regelbar

$T_g/T_u < 3$: schwer regelbar

Je kleiner das Verhältnis der Ausgleichszeit T_g zur Verzugszeit T_u ist, desto später bekommt der Regler Mitteilung von einer Stellgrößenänderung, daher nimmt die Regelbarkeit immer mehr ab. Nach dem in Abschnitt 2.5.3 gesagten entspricht ein kleines Verhältnis T_g zu T_u einem steilen Verlauf der Kurve, was einer Strecke höherer Ordnung entspricht, die wegen der Neigung zum Überschwingen, schwer regelbar ist.

Schnelle Regelstrecken mit $T_g/T_u < 3$ sind z. B. bei Öfen relativ selten, da die Ausbreitung einer Temperaturstörung durch das Ofenmaterial recht langsam und kontinuierlich von Statten geht.

Ausnahme bilden Öfen mit sehr direkt auf das Gut wirkenden Heizsystemen. Anders dagegen Druckregelungen: Das Öffnen einer Luftschleuse kann zu einem schlagartigen Druckabfall führen, auf die der Regler dann ebenso schnell mit einer Erhöhung des Speisedruckes reagieren muss. Der Druckausgleich im System erfolgt dann ebenso schnell, so dass der gesamte Regelvorgang binnen kurzer Zeit beendet ist. Bei diesen Strecken sind die vorhandenen Totzeiten im Verhältnis zu den Verzögerungszeiten groß. Auch chemische Prozesse (Reaktionen, Neutralisationen) verlaufen teilweise sehr schnell.

Bei der Ermittlung von Verzugs- und Ausgleichszeit lässt sich noch eine weitere wichtige Größe der Regelstrecke ermitteln, die maximale Anstiegsgeschwindigkeit V_{max}. Sie ergibt sich aus der Geradensteigung im Wendepunkt (Abbildung 27):

$$V_{max} = \frac{\text{Regelgrößenänderung}}{\text{Zeiteinheit}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Wie später im Abschnitt Optimierung gezeigt, wird sie auch zur Einstellung der Regelparameter herangezogen.

In der DIN 19 226 findet man anstatt dem Begriff Anstiegsgeschwindigkeit den Anlaufwert A, der dem Kehrwert der größten Anstiegsgeschwindigkeit der Regelgröße bei einer sprunghaften Änderung der Stellgröße von 0 auf 100 % entspricht:

$$A = \frac{1}{V_{max}}$$

2.7 Kennwerte von Regelstrecken

Die Verzugs- und Ausgleichszeiten (Richtwerte) einiger typischer Prozesse sind in der Tabelle 2 angegeben.

Regelgröße	Art der Regelstrecke	Verzugszeit T_u	Ausgleichszeit T_g
Temperatur	kleiner, elektrisch beheizter Ofen	0,5 - 1 min	5 ... 15min
	großer, elektrisch beheizter Ofen	1 - 5 min	10 ... 20min
	großer, gasbeheizter Glühofen	0,2 - 5 min	3 ... 60min
	Autoklaven	0,5 - 0,7min	10 ... 20min
	Hochdruck-Autoklaven	12 - 15 min	200 ... 300min
	Spritzgießmaschinen	0,5 - 3 min	3 ... 300min
	Extruder	1 - 6 min	5 ... 60min
	Verpackungsmaschinen	0,5 - 4 min	3 ... 40min
Druck	Trommelkessel mit Gas- oder Ölfeuerung	0sec	150sec
	Trommelkessel mit Feststoffheizung	0 ... 2min	2,5 ... 5min
Durchfluss	Rohrleitung mit Gas	0 ... 5sec	0,2 ... 10sec
	Rohrleitung mit Flüssigkeit	0sec	0sec

Tabelle 2: Verzugs- und Ausgleichszeiten (Richtwerte) einiger Prozesse

Die angegebenen Werte sind als Mittelwerte zu betrachten. Sie sollen nur zur groben Orientierung dienen. Im praktischen Anwendungsfall sollten die Werte, wie Verzugszeit oder Ausgleichszeit, durch eine Sprungantwort ermittelt werden.

2.8 Übertragungsbeiwert und Arbeitspunkt

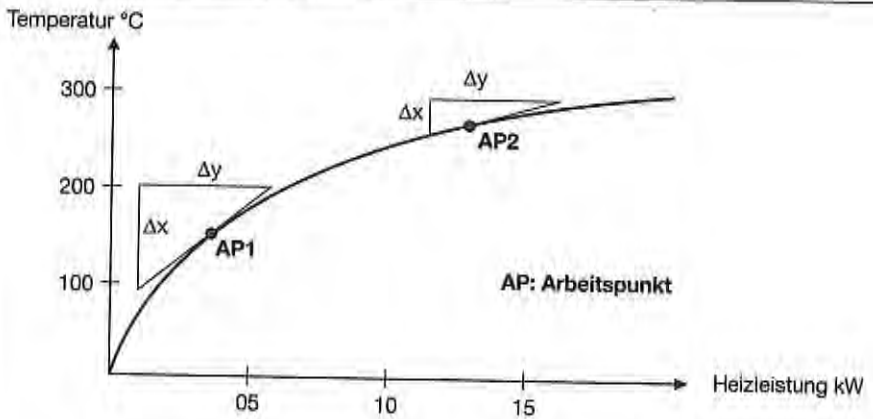
In den vorausgegangenen Abschnitten wurde hauptsächlich die dynamische Streckenkennlinie (Verlauf der Sprungantwort), d. h. ihr zeitliches Verhalten, betrachtet. Im Abschnitt 2.1 wurde bereits die statische Kennlinie angesprochen, die die Endwerte zu verschiedenen Stellgrößen beschreibt. Der zeitliche Verlauf der Regelgröße wird hierbei nicht berücksichtigt.

Der Übertragungsbeiwert ergibt sich aus dem Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsgröße, in diesem Fall aus dem Verhältnis einer Regelgrößenänderung zur Änderung der Stellgröße.

$$K_S = \frac{\text{Regelgrößenänderung}}{\text{Stellgrößenänderung}} = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

Man nennt den Übertragungsbeiwert K_S auch Streckenverstärkung.

Die Streckenverstärkung K_S ist in vielen Fällen nicht über den ganzen Istwertbereich konstant, wie folgender Fall verdeutlicht: Reicht bei einem Ofen im unteren Temperaturbereich eine geringe Erhöhung der Heizleistung aus, um einen großen Unterschied der Temperatur zu erreichen, sind am oberen Ende des Temperaturbereiches erheblich größere Änderungen des Energiestromes zum Erreichen des gleichen Effektes nötig (Abbildung 28).



⇨ **K_S ist abhängig vom Arbeitspunkt**

$$\text{AP1: } K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{100\ \text{K}}{5\ \text{kW}} = 20\ \frac{\text{K}}{\text{kW}}$$

$$\text{Ap2: } K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{30\ \text{K}}{5\ \text{kW}} = 6\ \frac{\text{K}}{\text{kW}}$$

Abb. 28: Streckenverstärkung und Arbeitspunkt

Dies liegt daran, da es sich hier am Beispiel des Ofens um eine nichtlineare Strecke handelt. Hierzu zählen neben Temperaturstrecken auch Prozesse mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung, Zusammenhänge zwischen Motorleistung und Drehzahl etc.

Auch die Verzugs- und Ausgleichszeit sind bei nichtlinearen Strecken vom Arbeitspunkt abhängig. Streckenverstärkung K_S, Verzugs- bzw. Ausgleichszeit und dergleichen beziehen sich daher auf einen Arbeitspunkt, d. h. dem Wertepaar aus Stellgröße und Regelgröße, bei dem sie ermittelt wurden. Für andere Arbeitspunkte gelten sie im Allgemeinen nicht und müssen, da sich aus den Streckenparametern die Einstellung des Reglers ergibt, bei nichtlinearen Strecken neu ermittelt werden. Der Regler arbeitet bei diesen Strecken nur an dem Arbeitspunkt der Strecke optimal, bei dem die Werte bestimmt wurden. Wird dieser geändert, z. B. eine andere Prozesstemperatur gefordert, muss der Regler neu eingestellt werden, wenn ein optimales Regelverhalten erreicht werden soll.

Der Arbeitspunkt sollte allgemein im Bereich der Mitte bis zum oberen Drittel der Übergangsfunktion bei voller Leistung liegen. Ein Arbeitspunkt im unteren Drittel ist, wegen des hohen Leistungsüberschusses, ungünstig. Zwar wird hierdurch die Führungsgröße (Sollwert) schnell erreicht, die Regelbarkeit aber erschwert. Ein Arbeitspunkt am oberen Teil der Kennlinie ist, wegen der nicht mehr vorhandenen Leistungsreserve und der daraus resultierenden langsamen Ausregelung, ebenfalls ungünstig in Bezug auf Störungen.

3.1 Einleitung

Nach der in Kapitel 2 behandelten Regelstrecke wenden wir uns nun dem zweiten wichtigen Teil des Regelkreises zu, dem Regler. Der Regler wurde bereits als das Glied bezeichnet, das den Vergleich zwischen Führungsgröße und Regelgröße durchführt und in Abhängigkeit von einer Regelabweichung eine Stellgröße bildet. Bei einem stetigen Regler liegt am Ausgang ein stetiges Signal an, also eine Spannung oder ein Strom, der kontinuierlich zwischen einem Anfangs- und einem Endwert alle Zwischenwerte annehmen kann.

Die andere Form ist der unstetige oder stetigähnliche Regler, bei dem die Stellgröße lediglich ein- oder ausgeschaltet werden kann.

Stetige Regler sind für gewisse Regelsystemen von Vorteil, da sich der Eingriff in den Prozess stetig den Anforderungen im Prozessgeschehen anpassen lässt. Übliche Ausgangssignale für stetige Regler sind: 0 ... 10V, 0 ... 20mA, 4 ... 20mA. Bei einem Regler mit 0...20 mA Ausgangssignal entsprechen 10 % Stellgröße demnach einem Ausgangsstrom von 2mA, 80 % entsprechen 16mA und 100 % gleich 20mA.

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, werden über stetige Regler entsprechende Stellglieder angesteuert, die ein stetiges Signal benötigen. Hierbei handelt es sich um Thyristorsteller, Stellventile usw.

3.2 P-Regler

In einem P-Regler wird durch die Differenzbildung des Istwertes und dem eingestellten Sollwert die Regelabweichung gebildet; diese wird dann verstärkt und steuert als Stellgröße ein entsprechendes Stellglied an (Abbildung 29).

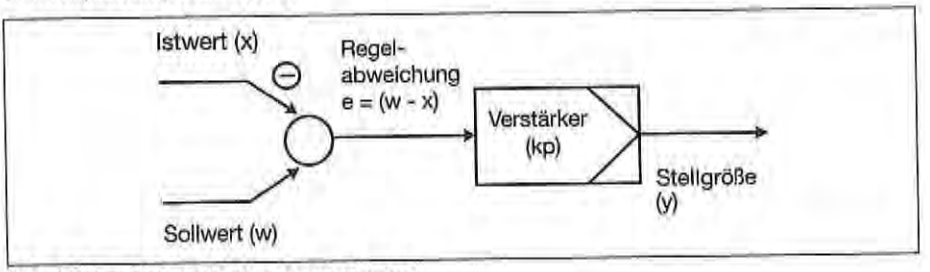


Abb. 29: Funktionsprinzip eines P-Reglers

Das Signal der Regelabweichung muss verstärkt werden, da es vom Betrag her zu klein ist und als Stellgröße nicht direkt genutzt werden kann. Diese Verstärkung (kp) eines P-Reglers muss einstellbar sein, um den Regler an die Regelstrecke anpassen zu können.

Das stetige Ausgangssignal ist der Regelabweichung direkt proportional, hat somit den gleichen Verlauf wie die Regelabweichung und wird lediglich mit einen bestimmten Faktor verstärkt. Eine sprungförmige Änderung der Regelabweichung (beispielsweise durch eine plötzliche Sollwertänderung) hat somit eine sprungförmige Änderung der Stellgröße zur Folge (Abbildung 30).

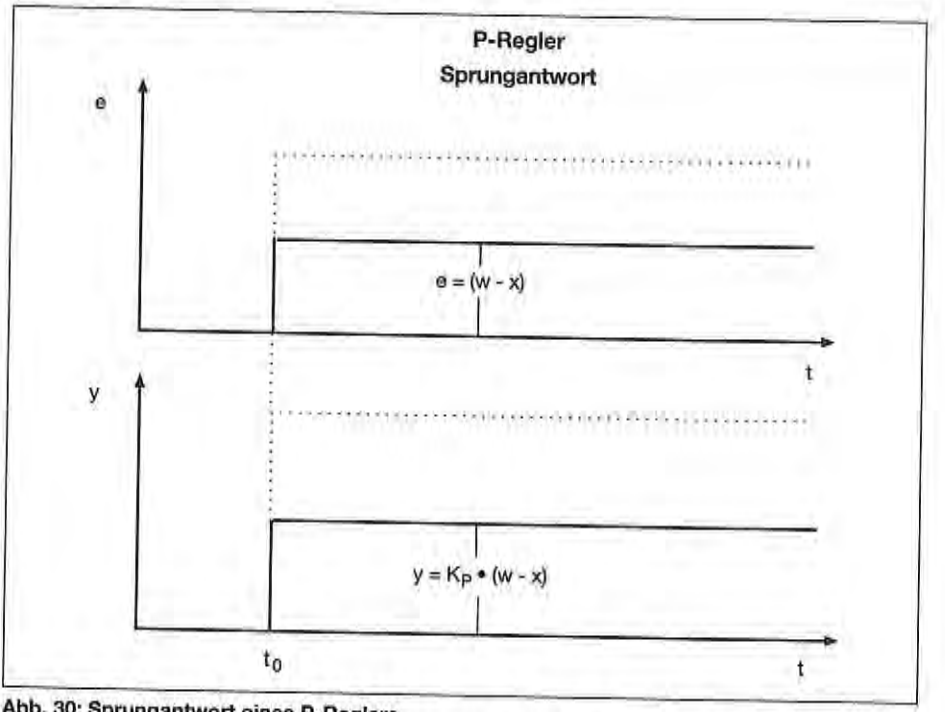


Abb. 30: Sprungantwort eines P-Reglers

D. h., bei einem P-Regler ändert sich die Stellgröße in gleichem Maße wie die Regelabweichung, allerdings mit einem Faktor bewertet. Für eine mathematische Darstellung ergibt sich für den P-Regler folgende Reglergleichung:

$$y = K_P \bullet (w - x)$$

Der Faktor K_P wird Proportionalbeiwert oder Übertragungsbeiwert des P-Reglers genannt und entspricht der Reglerverstärkung. Er ist nicht zu verwechseln mit der Streckenverstärkung der Regelstrecke K_S.

Abbildung 30 zeigt die Sprungantwort eines P-Reglers.

Wir betrachten wiederum als Beispiel den elektrobeheizten Ofen. Der Istwert der Temperatur weicht vom Sollwert um 10 Kelvin ab. Der Thyristorleistungssteller als Stellglied steuert die Energiezufuhr und hat einen Spannungseingang von 0 ... 10V (entsprechen 0 ... 100% Stellgrad). Um die entsprechende Heizleistung zu erreichen, benötigt der Steller ein Ansteuersignal von 6V, diese entsprechen einem Stellgrad des Reglers von 60%.

D. h., der Regler müsste demnach eine Verstärkung von

$$K_P = \frac{60\%}{10K} = 6\frac{\%}{K}$$

besitzen.

3.2.1 Der Proportionalbereich

Betrachtet man sich die Reglergleichung, hätte bei einem P-Regler eine beliebig große Regelabweichung eine entsprechend beliebig große Stellgröße zur Folge. Dies ist jedoch in der Praxis nicht möglich, da die Stellgröße technisch begrenzt ist, so dass die Proportionalität zwischen der Stellgröße und der Regelabweichung nur bis zu einer bestimmten Größe gegeben ist.

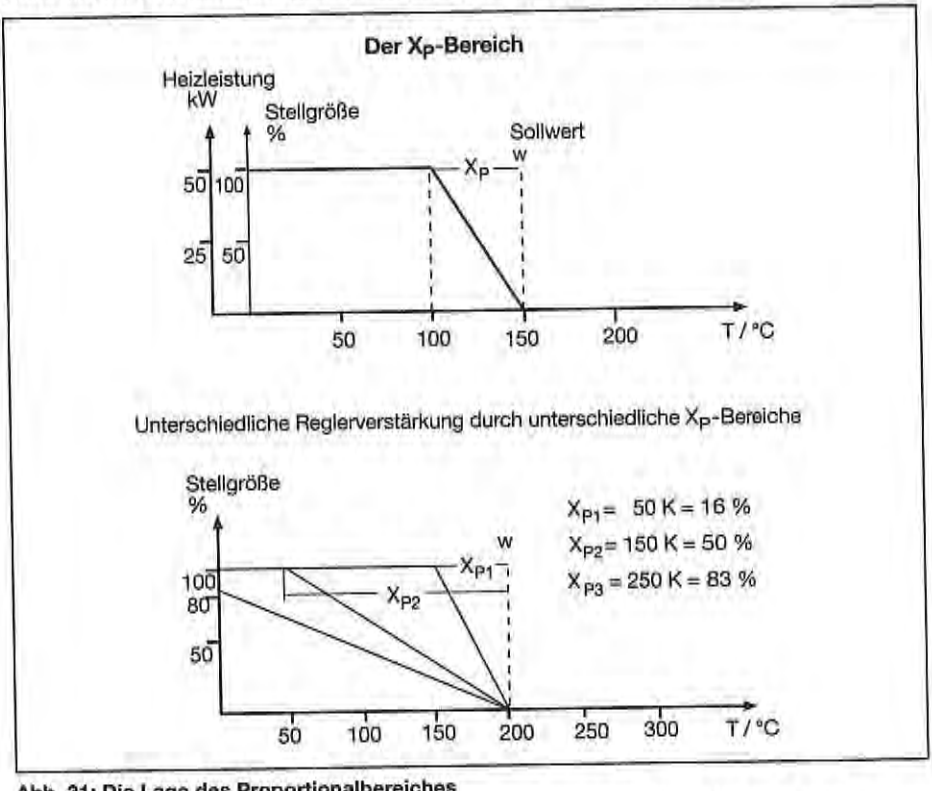


Abb. 31: Die Lage des Proportionalbereiches

Die Abbildung 31 zeigt in der oberen Hälfte die Kennlinie eines P-Reglers, der einen elektrobeheizten Ofen regelt und bei dem eine Führungsgröße von w = 150 °C eingestellt ist.

Für den Ofen wäre folgender Zusammenhang denkbar
Nur im Bereich von 100 bis 150 °C, d. h. bei einer Abweichung von bis zu 50 Kelvin vom gedachten Sollwert von 150 °C, ist die Stellgröße der Regelabweichung proportional. Danach ist das Maximum bzw. Minimum der Stellgröße erreicht, und es wird der größte bzw. kleinste Wert der Heizleistung abgegeben. Auch eine größere Regelabweichung kann dies nicht mehr ändern.

Dieser Bereich wird Proportionalbereich X_P genannt. Nur innerhalb des Proportionalbereiches verhält sich die Stellgröße proportional zur Regelabweichung. Durch Veränderung des X_P-Bereiches lässt sich die Verstärkung des Reglers an die Strecke anpassen. Wird ein kleinerer X_P-Bereich gewählt, so reicht schon eine kleine Regelabweichung aus, um den gesamten Stellbereich zu durchfahren, d. h., die Verstärkung nimmt mit kleinerem X_P zu.

Der Proportionalbereich und die Verstärkung bzw. der Proportionalbeiwert des Reglers stehen somit in einem Zusammenhang:

$$X_P = \frac{1}{K_P} \cdot 100\%$$

Da innerhalb des Proportionalbereiches X_P der volle Stellbereich y_H durchfahren wird, lässt sich K_P folgendermaßen bestimmen:

$$K_P = \frac{y_H}{X_P} = \frac{\text{max. Stellbereich}}{\text{Proportionalbereich}}$$

Der Proportionalbeiwert K_P hat die Einheit der Stellgröße, dividiert durch die Einheit der Regelgröße. Der Proportionalbereich X_P ist in der Praxis oft nützlicher als der Proportionalbeiwert K_P und wird meistens bei Regelgeräten anstelle von K_P eingestellt. Er wird in der gleichen Einheit wie die Regelgröße (K, V, bar usw.) eingestellt. In dem oben aufgeführten Beispiel der Ofenregelung beträgt der X_P-Bereich 50K. Der Vorteil der Eingabe von X_P besteht darin, dass man sofort erkennt, bei welcher Regelabweichung die Stellgröße 100% erreicht hat. Speziell bei Temperaturregelgeräten ist es interessant zu wissen, bis zu welcher Temperatur mit 100% Stellgröße gefahren wird. Ein Beispiel für unterschiedliche X_P-Bereiche zeigt Abbildung 31.

Ein Beispiel
Ein elektrischer Ofen soll über einen digitalen Regler geregelt werden. Ab einer Regelabweichung von 10K soll der Stellgrad 100% betragen. Am Regler muss somit $X_P = 10$ eingestellt werden.

Bisher wurde aus Gründen der Anschaulichkeit die Kennlinie des X_P-Bereiches beim P-Regler im Verlauf nur fallend (fallende Kennlinie, oder auch Wirksinn: invers) betrachtet, d. h., dass mit steigendem Istwert die Stellgröße bis zum Erreichen des Sollwertes sinkt. Zum anderen wurde die Lage des X_P-Bandes einseitig unterhalb der Führungsgröße (Sollwert) betrachtet.

Das X_P-Band kann jedoch auch symmetrisch oder oberhalb zum Sollwert liegen (Abbildung 32). Weiterhin werden für gewisse Regelprozesse Regler mit einer steigender Kennlinie (Wirksinn: direkt) eingesetzt. So beispielsweise bei einer Kühlung, hier muss der Stellgrad bei steigendem Istwert zunehmen.

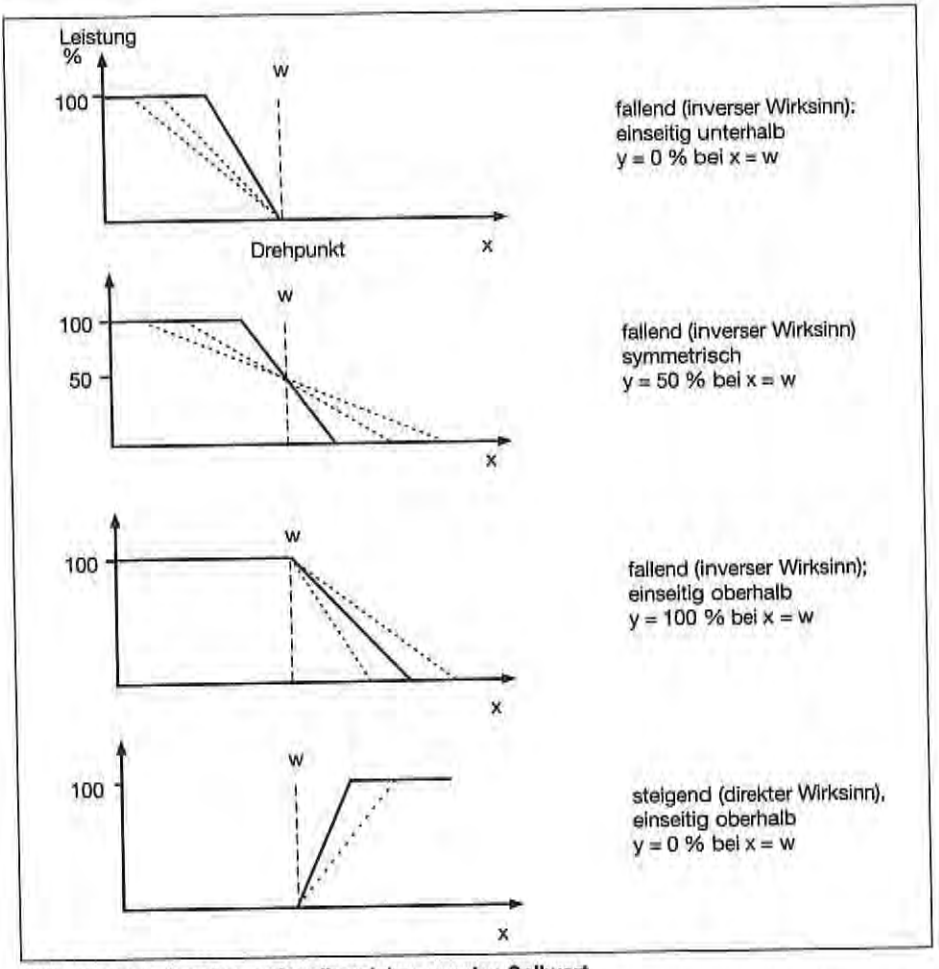


Abb. 32: Lage des Proportionalbereiches um den Sollwert

Auf die Vorteile von symmetrischen bzw. unsymmetrischen X_P-Bereichen um den Sollwert wird im folgenden Kapitel 3.2.2 noch näher eingegangen.

3.2.2 Bleibende Regelabweichung und Arbeitspunkt

Ein P-Regler gibt nur dann eine Stellgröße aus, wenn eine Regelabweichung vorliegt. Dies lässt sich bereits aus der Reglergleichung erkennen. Das heißt, erreicht die Regelgröße die Führungsgröße, so wird die Stellgröße zu 0. Für gewisse Regelstrecken könnte dies durchaus sinnvoll sein (z. B. Niveau-Regelung). Für unser Beispiel des Ofens bedeutet dies jedoch, dass eben keine Heizleistung mehr zugeführt wird, wenn die Regelabweichung 0 ist. Die Folge ist, dass die Temperatur im Ofen absinkt. Nun entsteht eine Regelabweichung, diese verstärkt der P-Regler und bildet somit den Stellgrad; je größer die Regelabweichung ist, umso größer ist der Stellgrad des Reglers. Die Regelabweichung stellt sich nun auf einen Wert ein, bei dem der resultierende Stellgrad gerade ausreicht, um den Istwert aufrechtzuerhalten.

Ein reiner P-Regler besitzt immer eine bleibende Regelabweichung

Durch Verkleinern des Proportionalbereiches X_P lässt sich die verbleibende Regelabweichung verringern. Das scheint im ersten Moment die optimale Lösung zu sein. In der Praxis werden jedoch alle Regelkreise bei Unterschreitung eines kritischen X_P instabil - die Regelgröße beginnt zu schwingen.

Kennt man die statische Streckenkennlinie des Prozesses, so kann man die sich ergebende Regelabweichung direkt erkennen. Abbildung 33 zeigt die Kennlinie eines P-Reglers mit einem X_P-Band von 100K. Es soll ein Sollwert von 200°C ausgeregelt werden. Die Streckenkennlinie des Ofens ergibt, das für einen Sollwert von 200°C eine Stellgröße von 50% benötigt wird. Der Regler gibt jedoch bei 200°C eine Stellgröße von 0% heraus. Die Temperatur wird absinken, und mit zunehmender Regelabweichung wird der Regler entsprechend des X_P -Bandes eine höhere Stellgröße herausgeben. Es wird sich hierbei eine Temperatur einstellen, bei der der Regler genau die Stellgröße herausgibt, die ausreicht, um die Temperatur zu halten. Die sich einstellende Temperatur und der Stellgrad kann aus dem Schnittpunkt der Reglerkennlinie und der statischen Streckenkennlinie bestimmt werden: Temperatur 150°C bei einem Stellgrad von 40%.

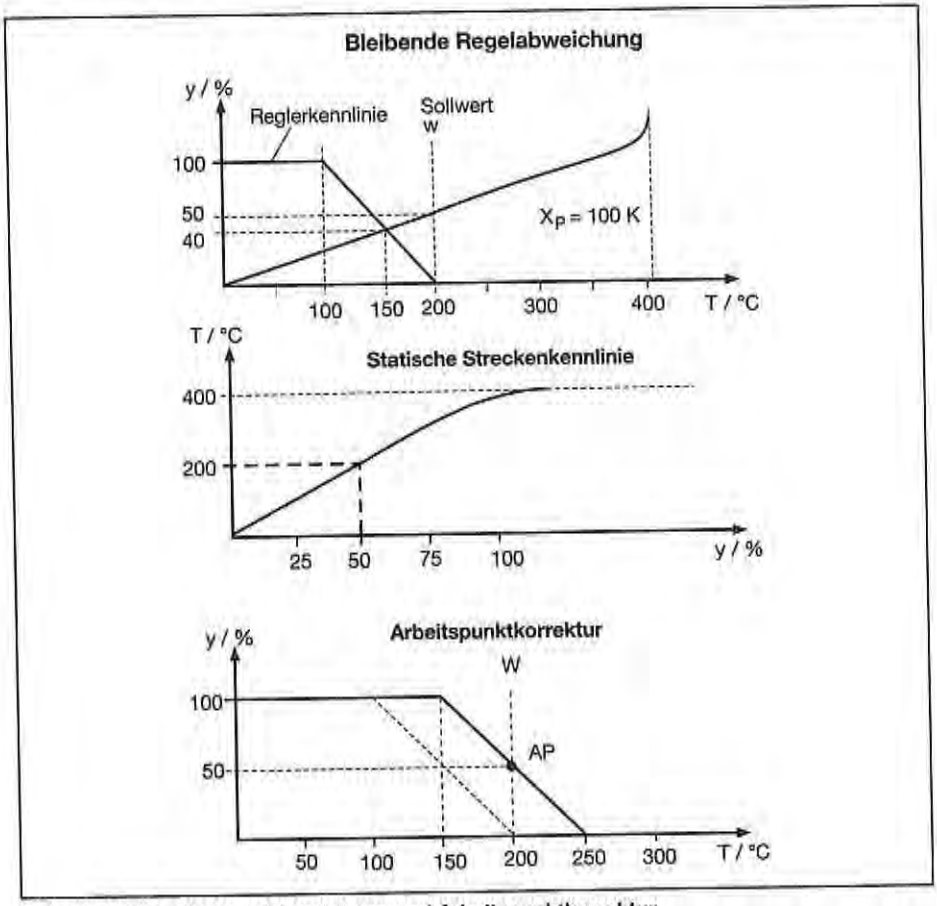


Abb. 33: Bleibende Regelabweichung und Arbeitspunktkorrektur

Man sieht, dass z. B. ein Ofen zum Erreichen und Halten einer bestimmten Führungsgröße eine gewisse Leistung abgeben muss. Es ist demnach unsinnig, die Stellgröße beim Fehlen einer Regelabweichung auf Null zu setzen. Vielmehr wird die Stellgröße bei einer Regelgröße von 0% auf einen gewissen Prozentwert gelegt. Diese sogenannte Arbeitspunktkorrektur lässt sich am Regler gewöhnlich über einen Bereich von 0 ... 100% einstellen. Das heißt, bei einer Korrektur von 50% würde der Regler bei einer Regelabweichung von 0 eine Stellgröße von 50% herausgeben, welches in dem genannten Beispiel (Abbildung 33) dazu führt, das die Führungsgröße w = 200°C erreicht und gehalten wird. Man sieht hier, dass das Proportionalband eine fallende Kennlinie darstellt, welche symmetrisch um den Sollwert liegt. Benötigt der Prozess wie in unserem Beispiel tatsächlich die im Arbeitspunkt eingestellte Stellgröße, so wird ohne Abweichung ausgeregelt.

Einstellung des Arbeitspunktes in der Praxis

Die Streckenkennlinie eines Prozesses ist in der Praxis meist nicht bekannt, zur Bestimmung der Arbeitspunktkorrektur kann jedoch manuell der Istwert auf den später auszuregelnden Sollwert gefahren werden. Der hierzu nötige Stellgrad ist gleichzeitig der Wert für die Arbeitspunktkorrektur.

Beispiel
Bei einem Ofen, in dem mit einem P-Regler ein Sollwert von 200°C angefahren werden soll, würde man beispielsweise den Regler in den Handbetrieb nehmen und den Stellgrad manuell langsam erhöhen. Nach der Veränderung ist solange zu warten, bis sich die Endtemperatur einstellt. Bei einem bestimmten Stellgrad wird man feststellen, dass dieser (beispielsweise 50%) ausreichend für einen Istwert von 200°C ist. Dieser Stellgrad wird nun als Wert für die Arbeitspunktkorrektur eingegeben.

Nach Eingabe des Wertes für die Arbeitspunktkorrektur wird nur bei dem Sollwert ohne Regeldifferenz ausgeregelt, für den die Arbeitspunktkorrektur vorgenommen wurde. Weiterhin dürfen sich die äußeren Bedingungen nicht ändern. Wirken andere Störungen auf den Regelkreis (beispielsweise das Absinken der Außentemperatur bei einem Ofen) stellt sich wieder eine Regeldifferenz ein, die nun jedoch kleiner ausfällt.

Zusammenfassend lässt sich über die Regelabweichung bei einem P-Regler folgendes festhalten (Regler mit fallender Kennlinie, bei einer Strecke mit Ausgleich):

Ohne Arbeitspunkt

- Die Regelgröße liegt im stationären Zustand unterhalb der Führungsgröße.

Mit Arbeitspunkt (Abbildung 33)

- Unterhalb des Arbeitspunktes (hier 0 ... 50% Stellgröße)
  Regelgröße befindet sich oberhalb der Führungsgröße
- Beim Arbeitspunkt (hier 50% Stellgröße)
  Regelgröße = Führungsgröße
- Oberhalb des Arbeitspunktes (hier 50 ... 100% Stellgröße)
  Regelgröße liegt unterhalb der Führungsgröße

Da bei einem P-Regler das Ausgangssignal den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Regelabweichung hat, reagiert er auf Störungen sehr schnell. P-Regler werden daher bevorzugt bei schnellen Regelstrecken, wie Druckregelung, eingesetzt. Er eignet sich nicht für Strecken mit reiner Totzeit, da diese durch einen P-Regler zu schwingen beginnen. Bei Strecken mit Ausgleich gelingt es nicht die Führungsgröße exakt auszuregeln, es bleibt eine Regelabweichung, die sich durch Einführen einer Arbeitspunktkorrektur deutlich verringern lässt.

3.2.3 Regler mit Dynamik

Wie wir im vorigen Kapitel gesehen haben, reagiert der P-Regler lediglich auf die Größe der Regeldifferenz und verstärkt diese. Für ihn ist es bedeutungslos, ob diese Regeldifferenz sehr schnell eintritt oder lange vorhanden ist.

Würde aber ein Maschinenführer beim Auftreten einer großen Störung nicht zunächst mit einer großen Stellgröße reagieren, und diese dann solange verändern, bis der Istwert den Sollwert erreicht hat? Er würde also nicht nur die Größe der Regelabweichung, sondern auch deren Verhalten über die Zeit (die Dynamik) berücksichtigen.

Nun gibt es Reglerantelle mit Dynamik, die ein Verhalten wie o.g. Maschinenführer aufweisen:

- Der D-Anteil reagiert auf Änderungen des Istwertes, bricht beispielsweise bei einem elektrischen Ofen die Netzspannung um 20 % zusammen, wird die Ofentemperatur absinken. Dieser D-Anteil reagiert auf dieses Absinken der Ofentemperatur mit einem Stellgrad. Der Stellgrad ist in diesem Fall proportional der Geschwindigkeit der Ofentemperaturänderung und hilft den Istwert wieder auf den Sollwert zu regeln.
- Der I-Anteil reagiert auf die zeitliche Dauer der Regelabweichung. Er summiert die an seinem Eingang anliegende Regelabweichung über die Zeit. Wird dieser Regler z. B. bei einem Ofen eingesetzt, erhöht er die Heizleistung langsam, bis die Ofentemperatur den gewünschten Sollwert erreicht hat.

In der Vergangenheit wurde in analogen Schaltungen die Dynamik dadurch realisiert, dass man einen Teil der Stellgröße über zeitbestimmende Glieder auf den Eingang gegenkoppelte. Hierdurch wird das Eingangssignal, d. h. die real vorliegende Regelabweichung, verändert und dem Regler eine - um einen zeitabhängigen Faktor - veränderte Regelabweichung vorgetäuscht. Dadurch wirkt beispielsweise eine rasche Änderung des Istwertes durch einen D-Anteil im ersten Moment genauso, als ob eine erheblich größere Regelabweichung vorliegt. Wegen dieser Gegenkopplung, sprach man in diesem Zusammenhang auch oft von Rückführung. Bei den modernen Mikroprozessor-Regelgeräten wird die Stellgröße nicht über eine Rückführung, sondern rechnerisch direkt aus Führungsgröße und Regelgröße gebildet.

In dieser Broschüre wollen wir, soweit möglich, auf den Begriff Rückführung verzichten.

Die o. g. Anteile werden oft mit einem P-Anteil kombiniert, somit entstehen
PI-, PD- oder auch PID-Regler.

3.3 I-Regler

Ein I-Regler (integraler Regler) summiert eine an seinem Eingang anstehende Regelabweichung über die Zeit auf. Je länger eine Regelabweichung an einem Regler ansteht, desto größer wird die Stellgröße des I-Reglers. Wie schnell der Regler seinen Stellgrad aufbaut hängt zum einen von der Einstellung des I-Anteils und zum anderen von der Größe der Regelabweichung ab.

Die Stellgröße verändert sich, solange eine Regelabweichung ansteht. Somit können auch kleine Regelabweichungen im Laufe der Zeit die Stellgröße so weit verändern, bis der Istwert dem gewünschten Sollwert entspricht.

Der I-Regler kann nach hinreichend langer Zeit also prinzipiell vollständig ausregeln, d. h. Führungsgröße = Regelgröße. Dann ist die Regelabweichung null und die Stellgröße erhöht sich nicht weiter.

Der I-Regler besitzt daher keine bleibende Regelabweichung wie der P-Regler

Die Sprungantwort des I-Reglers zeigt den zeitlichen Verlauf der Stellgröße bei einer sprungweisen Veränderung der Regeldifferenz (Abbildung 34).

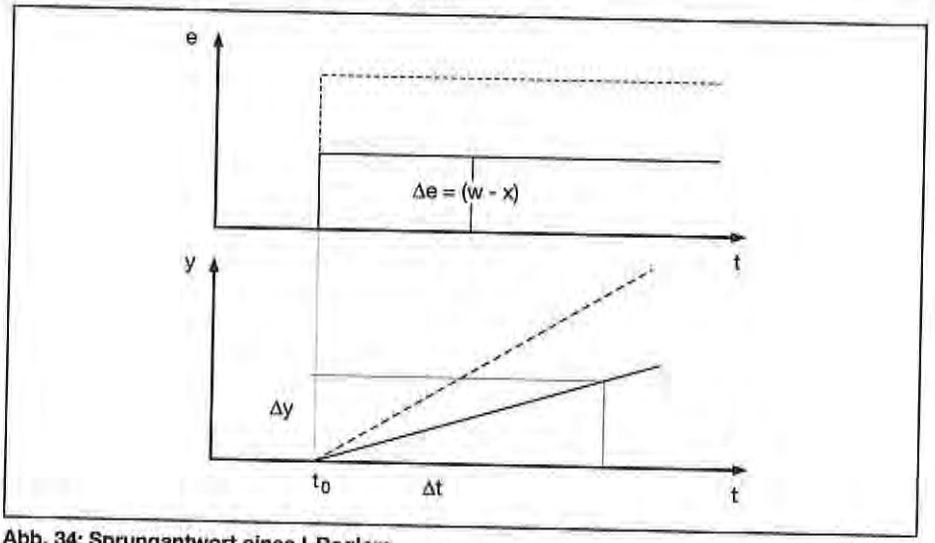


Abb. 34: Sprungantwort eines I-Reglers

Für eine konstante Regelabweichung ergibt sich für den I-Regler folgende Gleichung:

$$\Delta y = K_I \bullet \Delta e \bullet t$$

Hierbei ist K_I der Integralbeiwert des I-Reglers und t die Dauer der Regelabweichung. Man erkennt, dass die Änderung der Stellgröße y nicht nur der Regelgrößenänderung (wie beim P-Regler), sondern auch der Zeit t proportional ist.
Der Integralbeiwert des I-Reglers lässt sich ebenfalls aus der Sprungantwort ermitteln (Abbildung 34):

$$K_I = \frac{\Delta y}{\Delta e \bullet \Delta t}$$

Ein I-Regler wird jedoch meist über die Nachstellzeit T_n definiert. Zwischen der Nachstellzeit T_n und dem Integralbeiwert K_I besteht folgender Zusammenhang:

$$T_n = \frac{1}{K_I}$$

Liegt bei einem I-Regler mit inversem Wirksinn, wie er beispielsweise zum Heizen verwendet wird, der Istwert unterhalb vom Sollwert, baut der I-Regler kontinuierlich seinen Stellgrad auf. Nun ist es, wenn der Istwert den Sollwert erreicht, aufgrund von Verzögerungen der Strecke wahrscheinlich, dass der Stellgrad zu groß ist. Der Istwert wird also noch etwas weiter ansteigen, jedoch wird nun, aufgrund des umgekehrten Vorzeichen der Regelgröße, der Stellgrad abgebaut.

Gerade in diesem Zusammenhang steckt ein gewisser Nachteil des I-Reglers
Baut sich der Stellgrad zu schnell auf, ist das entstehende Stellsignal zu groß, und ein zu hoher Istwert wird erreicht. Nun liegt der Istwert über der Führungsgröße, und die Regelabweichung ändert ihr Vorzeichen, d. h., das Stellsignal nimmt wieder ab. Ist die Abnahme zu rasch, stellt sich ein zu niedriger Istwert ein usw. Das heißt, bei einem I-Regler tritt daher oft eine Schwingung um den Sollwert auf. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der I-Anteil zu stark, d. h. die Nachstellzeit T_n zu klein gewählt wurde. Ausgenommen hiervon wären Strecken 0-ter Ordnung, da hier, wegen der fehlenden Möglichkeit zur Energiespeicherung, die Regelgröße der Stellgradänderung sofort ohne Verzug folgt, dadurch bildet der Regelkreis kein schwingungsfähiges System.

Um ein Gefühl für die Wirkung der Nachstellzeit T_n zu entwickeln, kann man diese wie folgt definieren: Die Nachstellzeit T_n ist die Zeit, die der Integrale Regler benötigt, um an seinem Ausgang seine konstante Regeldifferenz (ohne Berücksichtigung der Dimension) abzubilden. Man stelle sich einen I-Regler für einen Ofen vor, das eingestellte T_n betrage 60s und die Regeldifferenz sei konstant 2K. Für einen Zuwachs des Stellgrades von 2% benötigt dieser Regler bei der gleichbleibenden Regeldifferenz von 2K eine Zeit $T_n = 60$s.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der ideale I-Regler im Gegensatz zum P-Regler die Regelabweichungen völlig abbaut.

Ein solcher Regler hat jedoch auch seine Nachteile: Er arbeitet zusammen mit einer Regelstrecke ohne Ausgleich nicht stabil und ist somit zum Regeln von beispielsweise Flüssigkeitsständen ungeeignet. Bei Regelstrecken mit größeren Zeitkonstanten muss der I-Anteil sehr klein eingestellt werden, damit die Regelgröße nicht zum Schwingen neigt. Mit diesem kleinen I-Anteil arbeitet der reine I-Regler viel zu langsam. Er ist daher für Strecken mit großen Zeitkonstanten (z. B. Temperaturregelstrecken) nur wenig geeignet.

3.4 PI-Regler

Wie bei dem reinen I-Regler festgestellt wurde, dauert es relativ lange (hängt ab von T_n) bis der Regler seine Stellgröße aufgebaut hat. Der reine P-Regler wiederum reagiert mit seinem Stellgrad sofort auf Regeldifferenzen, ist aber nicht in der Lage, die Regeldifferenz vollständig abzubauen. Es liegt daher nahe, einen P-Regler mit einem I-Regler zu kombinieren. Man erhält somit einen PI-Regler. Durch eine solche Kombination können die Vorteile des P-Reglers, d. h. die schnelle Reaktion auf eine Regelabweichung, mit dem Vorteil des I-Reglers, der exakten Ausregelung auf die Führungsgröße, kombiniert werden.

Die Sprungantwort eines PI-Reglers erhalten wir einfach durch Überlagerung der Sprungantwort eines P- und eines I-Reglers wie in Abbildung 35 gezeigt.

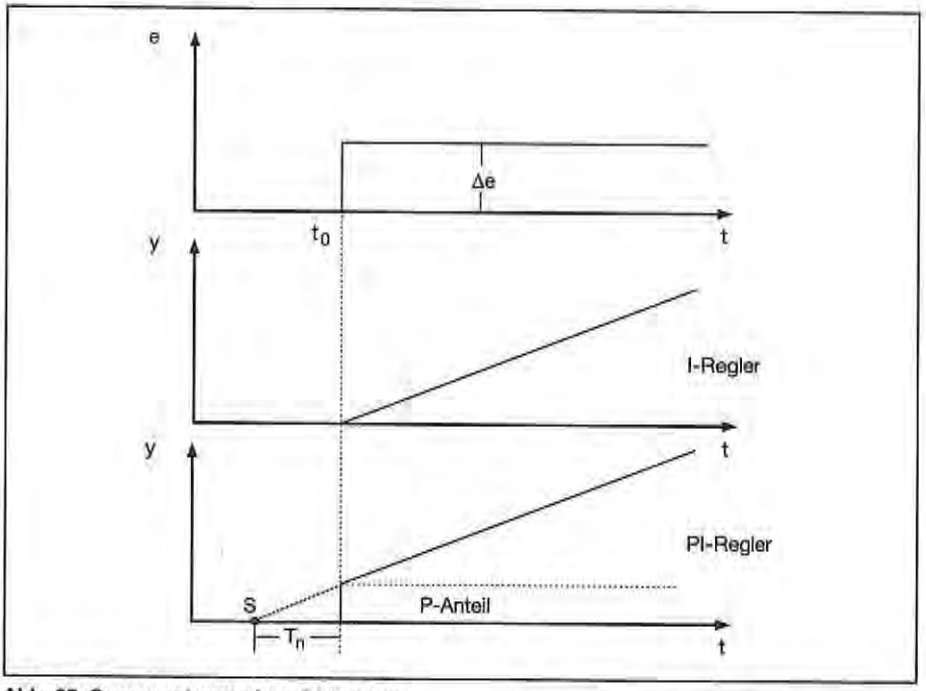


Abb. 35: Sprungantwort eines PI-Reglers

Wird die schräg ansteigende Gerade des PI-Stellgrades bis zu ihrem Schnittpunkt S mit der Zeitachse verlängert, so schneidet sie dort ein Zeitstück ab. Dieses entspricht beim PI-Regler der Nachstellzeit T_n.

Für eine Regelabweichung e = Δe = konstant erhalten wir folgende Gleichung für den PI-Regler:

$$\Delta y = K_P \bullet \left(\Delta e + \frac{1}{T_n} \bullet \Delta e \bullet t\right) = K_P \bullet \Delta e \bullet \left(1 + \frac{1}{T_n} \bullet t\right)$$

K_P ist die Verstärkung des P-Anteils, T_n die Nachstellzeit des I-Anteils.

Die Nachstellzeit ist ein Maß dafür, wie stark die zeitliche Dauer der Regelabweichung in die Regelung eingeht. Eine große Nachstellzeit bedeutet einen geringen Einfluss des I-Anteils und umgekehrt. Aus oben genannter Gleichung ist ersichtlich, dass die eigentliche Verstärkung des I-Anteils der Faktor K_P/T_n ist

Bei einem PI-Regler bewirkt somit die Änderung des Proportionalbereiches X_P auch ein geändertes integrales Verhalten. Erhöht man die Proportionalverstärkung des PI-Reglers durch Verkleinern von X_P wird somit auch das I-Verhalten erhöht, somit integriert der Regler an seinem Ausgang die Regeldifferenz schneller auf.

Man kann T_n auch so interpretieren, dass es der Zeitraum ist, in dem durch den I-Anteil eine Regelabweichung zur selben Stellgröße y führt, wie dies durch den P-Anteil bereits nach dem Regeldifferenzsprung der Fall ist. Die bisher genannte Formel gilt nur, wenn die Regelabweichung während des Zeitraumes t konstant bleibt. Ist dies nicht der Fall, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta y = K_P \bullet e + \frac{K_P}{T_n} \bullet \int e \bullet dt$$

Wie bereits erwähnt, kann ein PI-Regler prinzipiell durch die Kombination eines P-Reglers und I-Reglers aufgebaut werden. Bei einer plötzlichen Regelabweichung wird die Stellgröße zunächst vom P-Anteil gebildet (Abbildung 36). Durch die geänderte Stellgröße nähert sich die Regelgröße der Führungsgröße, d. h., die Regelabweichung wird kleiner, somit auch die vom P-Regler verursachte Stellgröße. Nun sorgt die Stellgröße, die durch den I-Anteil gebildet wird, für das exakte Ausregeln. Während der P-Anteil der Stellgröße durch die Annäherung an die Führungsgröße immer zurückgeht, baut sich der I-Anteil immer weiter auf. Hier nimmt der Zuwachs, wegen der geringer werdenden Regelabweichung jedoch auch ab, bis schließlich die Führungsgröße erreicht ist und zu der aktuellen Stellgröße nichts mehr hinzugefügt wird. Im ausgeregelten Zustand wird nun die Stellgröße beim PI-Regler nur durch den I-Anteil gebildet.

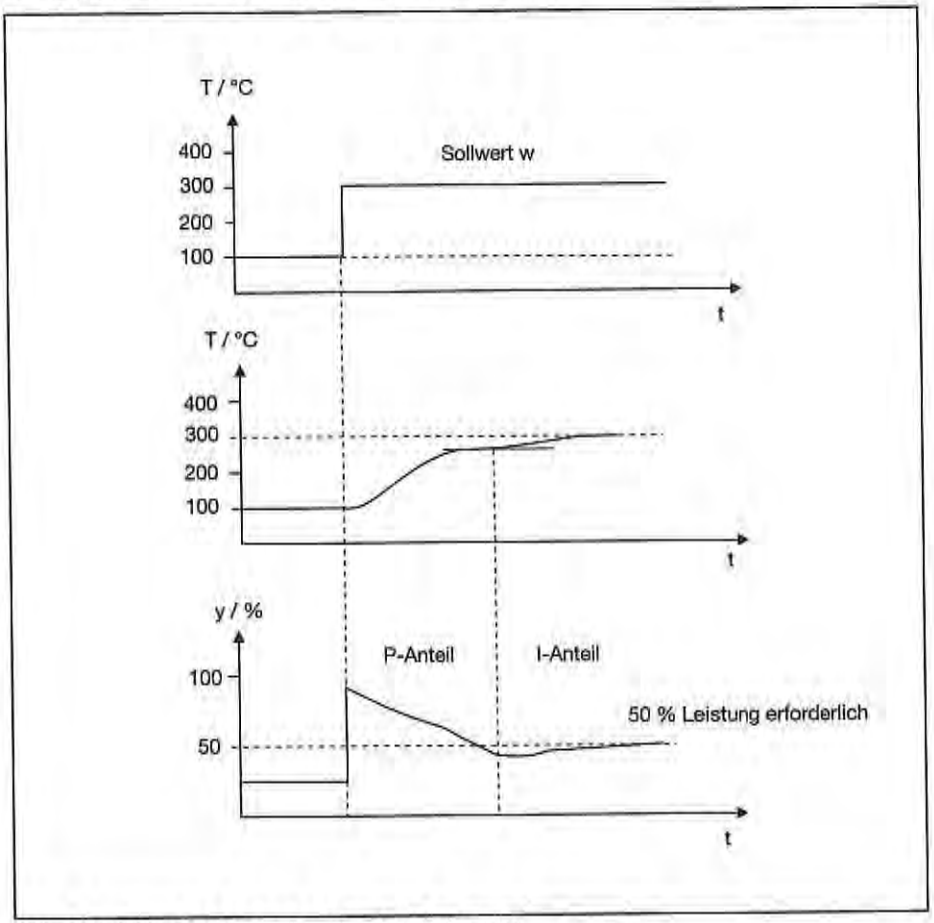


Abb. 36: Bildung der Stellgröße bei einem PI-Regler

Zusammenfassend lässt sich festhalten:
Beim PI-Regler liegt bei einer Veränderung der Regeldifferenz durch den P-Anteil sofort eine Veränderung des Stellgrades vor. Die Stellgröße wächst nun durch den I-Anteil mit der Dauer der Regelabweichung an. Durch das ständige Aufaddieren auch kleiner Regelabweichungen auf den I-Anteil, besitzt ein PI-Regler im Gegensatz zum P-Regler keine bleibende Regelabweichung. Das Maß für den I-Anteil ist die Nachstellzeit T_n. Ein großer Wert für T_n entspricht einem kleinen I-Anteil.

Für exakte Regelungen ist er daher dem reinen P-Regler überlegen, was die starke Verbreitung dieses Reglertyps erklärt. Allerdings ist der PI-Regler etwas langsamer als der P-Regler.
Strecken ohne Ausgleich werden durch den I-Anteil des PI-Reglers leicht instabil; ein PI-Regler ist für diese Streckenart nur bei entsprechend groß gewähltem T_n einsetzbar.

3.5 PD-Regler

Tritt z. B. in einem Regelkreis, der von Hand geregelt wird, eine große Störung auf und bringt diese eine Änderung der Regelgröße mit sich, so wird der Bediener versuchen, die Auswirkung dieser Störung dadurch abzufangen, dass er am Anfang das Stellglied besonders stark verstellt. Diese Verstellung wird dann rasch wieder zurückgenommen, um sich dann allmählich in den neuen Gleichgewichtszustand des Regelkreises durch langsames Verstellen des Stellgliedes heranzutasten. Ein Regler, der ähnlich wie o.g. Anlagenbediener reagiert, ist der sogenannte PD-Regler: er besteht aus einem bekannten proportional arbeitenden P-Anteil und einem differentiell arbeitenden D-Anteil. Dieser reagiert nicht auf die Größe oder Dauer der Regelabweichung, sondern auf die Geschwindigkeitsänderung der Regelgröße.
Abbildung 37 zeigt, wie ein solcher PD-Regler seine Stellgröße aufbaut.

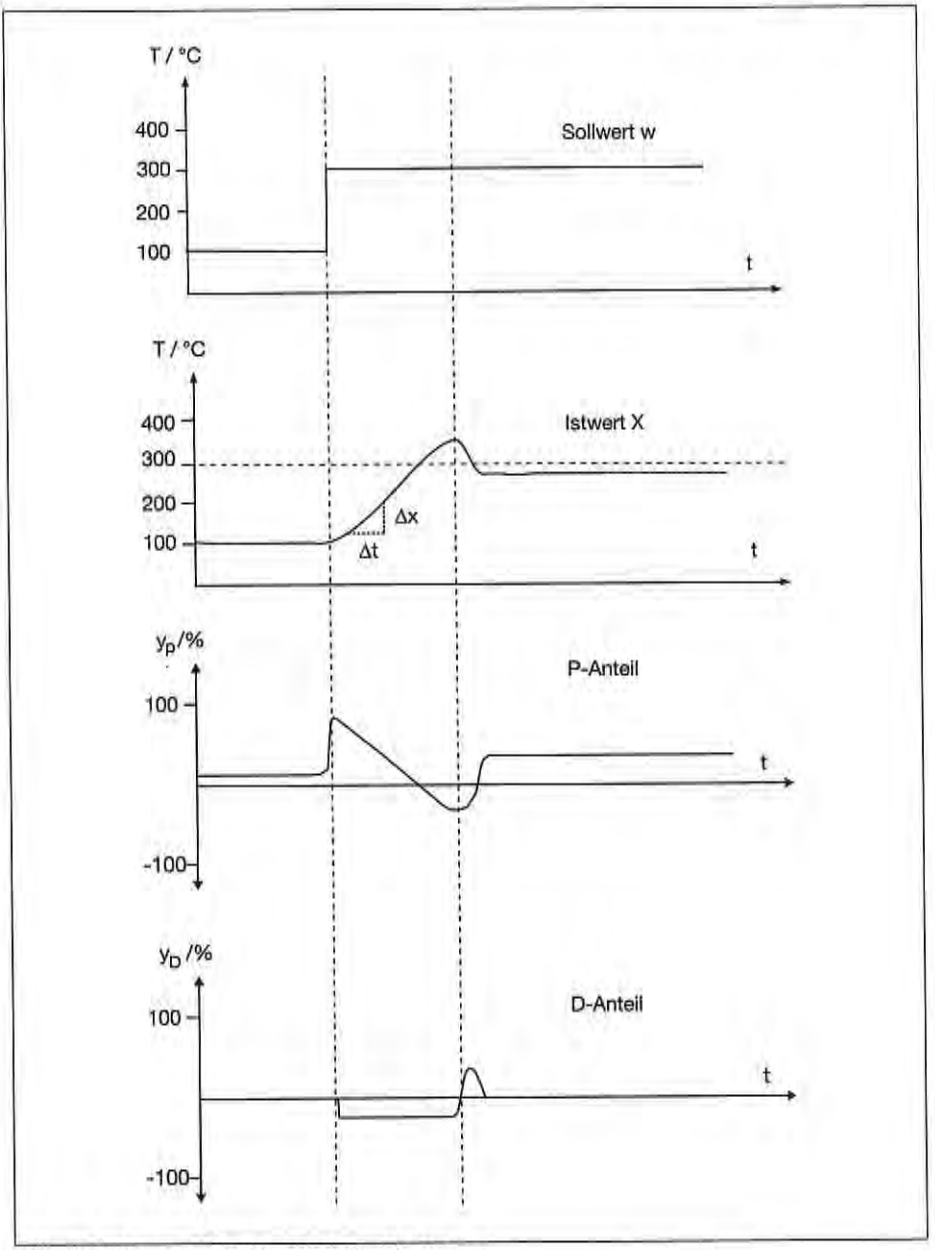


Abb. 37: Bildung der Stellgröße beim PD-Regler

3 Stetige Regler

Abbildung 37 verdeutlicht die Wirkungsweise eines PD-Reglers: Wird ein neuer Sollwert vorgegeben, so erhöht sich der Stellgrad durch den P-Anteil, dieser Anteil ist stets proportional zur Regelabweichung. Durch den erhöhten Stellgrad reagiert die Regelgröße, beispielsweise eine Ofentemperatur wird größer. Sobald sich der Istwert jedoch verändert, beginnt der D-Anteil zu wirken: während sich der Istwert in Richtung des Sollwertes bewegt, bildet der D-Anteil einen negativen Stellgrad, dieser vom Stellgrad des P-Anteils abgezogen, ergibt letztlich den Stellgrad am Reglerausgang. Beim Anfahren an den Sollwert „bremst" der D-Anteil und verhindert somit ein Überschwingen der Regelgröße über den Sollwert.

Hat die Regelgröße nun nach einem Überschwingen über den Sollwert ihr Maximum erreicht und wird nun kleiner, gibt der D-Anteil einen positiven Stellgrad aus. Der D-Anteil wirkt auch in diesem Fall der Veränderung der Regelgröße entgegen.

Der D-Anteil greift somit nur bei einer Veränderung der Regelgröße in den Prozess ein. Wie hoch der Stellgrad des D-Anteils ist, hängt von der Geschwindigkeit der Regelgrößenänderung, also von der Größe $\Delta x/\Delta t$ (siehe Steigungsdreieck in Abbildung 37) ab. Weiterhin kann die Wirkung durch die Zeit T_v (Vorhaltezeit) am Regler verändert werden, diese Größe werden wir in diesem Kapitel kennenlernen. Ein reiner D-Regler ist für eine Regelung ungeeignet, da er nicht in den Regelvorgang eingreift, wenn eine stabile Regelabweichung oder Regelgröße vorliegt.

In der Praxis bestehen die zwei Möglichkeiten, den D-Anteil eines Reglers entweder auf die Regelgröße x (wie in Abbildung 37 gezeigt) oder auf die Regelabweichung e zu beziehen. Bezieht man ihn auf die Regelabweichung, so werden auch Änderungen in der Führungsgröße sofort erfasst, was nicht unbedingt ein Vorteil auf die Regelgüte haben muss.

Abbildung 38 zeigt die Anstiegsantwort für einen PD-Regler, dessen Regelabweichung auf den D-Anteil wirkt:

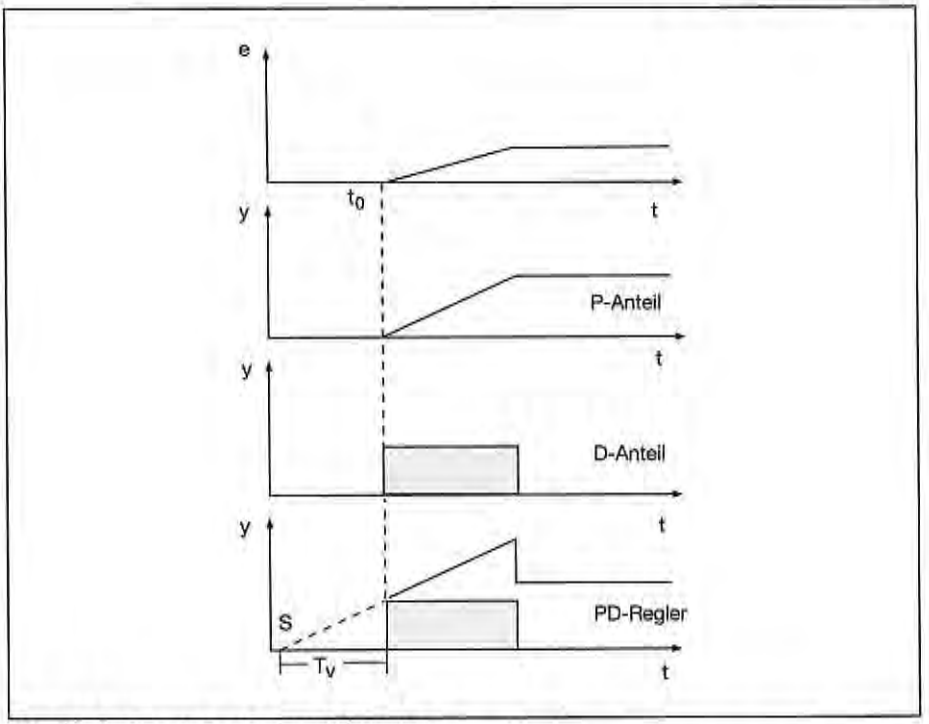


Abb. 38: Anstiegsantwort eines PD-Reglers

Wie wir in Abbildung 38 erkennen können , ist zu Beginn der Anstiegsfunktion bereits ein merklicher Stellgrad des D-Anteils vorhanden, da dieser Stellgrad proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung ist. Der P-Anteil benötigt eine gewisse Zeit, nämlich die Vorhaltezeit T_V, bis er den gleichen Stellgrad wie der D-Anteil aufgebaut hat. Die Vorhaltezeit ergibt sich, wenn man die schräg ansteigende Gerade des PD-Reglerstellgrades bis zu ihrem Schnittpunkt S auf der Zeitachse verlängert.

Mathematisch ergibt sich die Änderungsgeschwindigkeit v aus der Änderung der Regelabweichung „de" pro Zeiteinheit „dt":

$$v = \frac{de}{dt}$$

Für den PD-Regler ergibt sich folgende Reglergleichung:

$$y = K_P \bullet \left(e + T_v \bullet \frac{de}{dt}\right)$$

Wie bereits erwähnt, kann der D-Anteil auf das Signal der Regelabweichung oder der Regelgröße bezogen werden.

Im Prinzip hat der D-Anteil folgende Auswirkungen:
Sobald sich die Regelgröße verändert, wirkt der D-Anteil dieser Änderung entgegen.

Für einen Regler mit einem inversen Wirksinn (also zum Heizen) würde dies beispielsweise bedeuten:

- verkleinert sich die Regelgröße aufgrund einer Störung in der Regelstrecke, bildet der D-Anteil einen positiven Stellgrad, welche der Verkleinerung der Regelgröße entgegenwirkt
- vergrößert sich die Regelgröße aufgrund einer Störung in der Regelstrecke, bildet der D-Anteil einen negativen Stellgrad, welche der Vergrößerung der Regelgröße entgegenwirkt

Wirkt der D-Anteil jedoch auf die Regelabweichung, reagiert er auch auf Änderungen des Sollwertes

- Wird bei dem oben erwähnten Regler der Sollwert erhöht, „hilft" der D-Anteil, den Istwert auf den neuen Sollwert zu bringen, indem er nach dem Sollwertsprung einen positiven Stellgrad ausgibt, der nach einiger Zeit abklingt.
- Wird der Sollwert erniedrigt, „hilft" der D-Anteil, den Istwert auf den kleineren Sollwert zu bringen, indem er nach dem Sollwertsprung einen negativen Stellgrad ausgibt, der nach einiger Zeit abklingt.

3.5.1 Der praktische D-Anteil - Das DT_1-Element

Grundsätzlich kann man jedoch auch die Sprungantwort eines PD-Reglers betrachten, so wie vorher beim P- bzw. PI-Regler. Nun ist aber die Änderungsgeschwindigkeit bei einem Sprung unendlich groß. Somit hätte das von einem Sprung abgeleitete D-Signal eine theoretisch unendlich hohe und unendlich schmale Nadelfunktion (Abbildung 39). Das heißt, theoretisch müsste die Stellgröße für eine unendlich kleine Zeit einen unendlich großen Wert annehmen und dann sofort wieder auf den vom P-Anteil verursachten Anteil zurückgehen. Dies ist jedoch zum einen aus mechanischen als auch elektrischen Gründen nicht möglich, weiterhin würde ein solch kurzer Impuls die Regelstrecke kaum beeinflussen. Man verhindert in der Praxis das sofortige Abklingen durch Bildung des D-Anteiles durch ein DT_1-Glied. Dieses Glied besteht aus einem D-Anteil, wie wir ihn in diesem Kapitel bereits kennengelernt haben in Reihenschaltung mit einem T_1-Glied. Das T_1-Glied verhält sich wie eine Strecke 1. Ordnung mit einem Übertragungsbeiwert von 1.

Abbildung 39 zeigt die Sprungantwort des „praktischen D-Anteil". T_1 ist die Zeitkonstante des T_1-Gliedes. In der Praxis wird diese Zeitkonstante auf $T_v/4$ eingestellt und bei Veränderung von T_v ebenfalls in diesem Verhältnis verändert. Aus der Sprungantwort des „paktischen D-Anteil" kann aufgrund des Verhältnissen $T_1 = T_v/4$ aus T_1 die Vorhaltezeit T_v bestimmt werden.

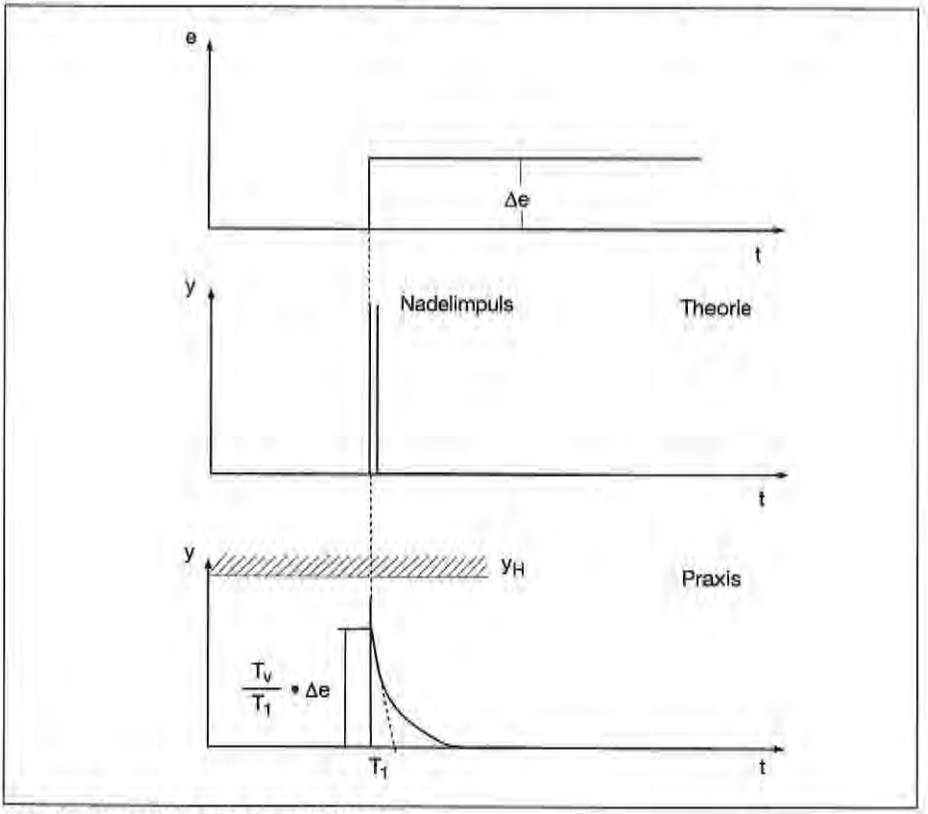


Abb. 39: Sprungantwort eines PD-Reglers

Zusammenfassend lässt sich festhalten:
Ein reiner D-Regler ist in der Praxis ohne Bedeutung, da er eine gleichbleibende Regelabweichung unberücksichtigt lässt und lediglich auf die Änderungsgeschwindigkeit der Regelabweichung oder des Istwertes reagiert. Der PD-Regler dagegen findet häufig Anwendung. Der D-Anteil lässt ihn schnell auf Störungen reagieren, durch sein „bremsendes Verhalten" stabilisiert er jedoch auch den Regelkreis. Ungeeignet ist dieser Regler für Strecken mit pulsierenden Größen, wie Druck- oder Durchflussregelung.
Der PD-Regler findet vor allem da Einsatz, wo Werkzeuge oder Gut empfindlich gegen Sollwertüberschreitungen sind. Dies gilt beispielsweise in starkem Maß für kunststoffverarbeitende Maschinen. Der PD-Regler besitzt allerdings, wie der P-Regler, bei Strecken mit Ausgleich eine bleibende Regelabweichung.

3.6 PID-Regler

Bisher wurde gezeigt, dass die Kombination eines D- oder I-Anteils mit einem P-Regler jeweils gewisse Vorteile bietet. Nun liegt es nahe, alle drei Strukturen miteinander zu verbinden und man erhält den PID-Regler.

Bei diesem Regler sind nun die Parameter X_P, T_n, T_v für das P-, I- und D- Verhalten einzustellen. Die Sprungantwort eines PID-Reglers lässt die drei genannten Anteile erkennen (Abbildung 40).

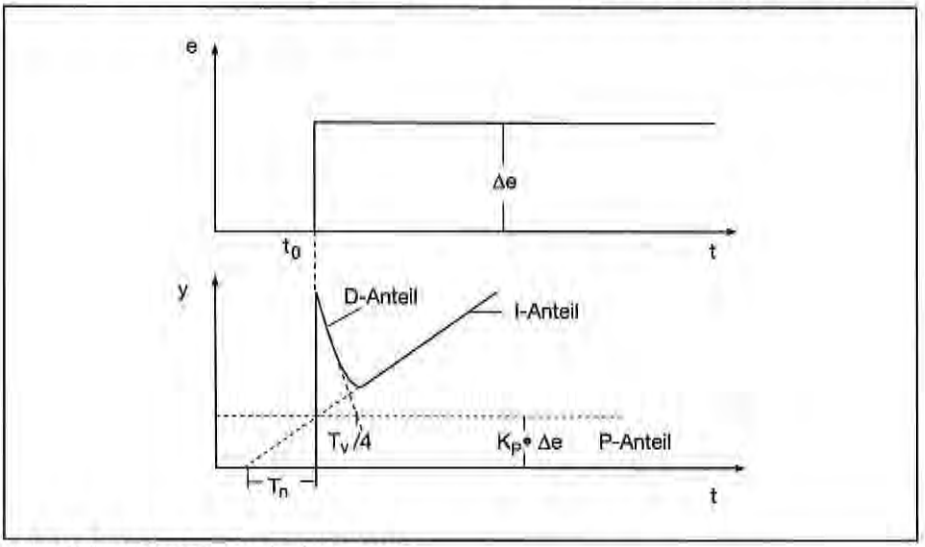


Abb. 40: Sprungantwort eines PID-Reglers

Nach der DIN 19 225 ergibt sich für einen solchen Regler folgende Reglergleichung:

$$\Delta y = K_P \bullet \left(e + \frac{1}{T_n} \int e \bullet dt + T_v \bullet \frac{de}{dt} \right)$$

(idealer PID-Regler)

Wie bereits in den vorausgegangenen Abschnitten erwähnt, haben die einzelnen Parameter (K_P, T_v, T_n) unterschiedliche Auswirkungen auf die einzelnen Anteile.

Größeres K_P (entspricht kleinerem X_P): Daraus folgt größerer P-Anteil

Größeres T_n: Entspricht kleinerem I-Anteil

Größeres T_v: Entspricht größerem D-Anteil

Bei einigen Reglern mit PID-Verhalten lassen sich T_v und T_n nicht getrennt einstellen. Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass sich meist ein günstiges Verhalten bei einem Verhältnis

$T_v = T_n$ / 4-5 ergibt. Dieses Verhältnis ist oft im Regler fest eingestellt und nur ein Parameter variierbar (meist T_n).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der PID-Regler die günstigen Eigenschaften des P-, I- und D-Reglers vereinigt. Der P-Anteil reagiert beim Auftreten einer Regeldifferenz mit einer entsprechenden Stellgröße. Der D-Anteil wirkt Änderungen der Regelgröße entgegen und lässt den Regelkreis stabiler werden. Die bleibende Regelabweichung wird durch Hinzufügen eines I-Anteils beseitigt. Man setzt den PID-Regler dort ein, wo ein gutes Ausregeln auf die Führungsgröße bei einer hohen Regeldynamik gefordert ist. Der PID-Regler zeigt auch bei Strecken mit höherer Ordnung (2. und 3. Ordnung) ein gutes Regelverhalten (z. B. Temperaturregelung in Industrieöfen).

3.6.1 Blockstruktur des PID-Reglers

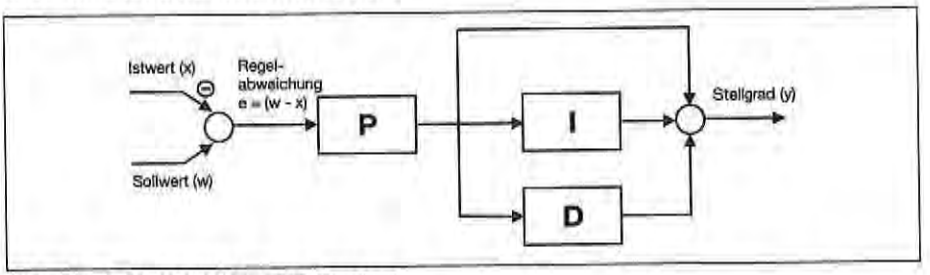


Abb. 41: Blockstruktur des PID-Reglers

Wie in diesem Kapitel aus den Reglergleichungen für den PI-, PD- und PID-Regler bereits zu erkennen war, wird das I- und das D-Verhalten eines PID-Reglers nicht nur durch die Einstellung der Parameter T_n und T_v, sondern auch durch die Proportionalverstärkung mit X_P beeinflusst. Erhöht man bei einem PID-Regler die Proportionalverstärkung auf den doppelten Wert (durch Halbierung von X_P), besitzt der Regler nicht nur ein doppelt so großes Proportionalverhalten, sondern auch der I- und der D-Anteil wird auf den doppelten Wert vergrößert.

Ein Beispiel
Der in Abbildung 41 gezeigte PID-Regler habe die Einstellung T_n = 10s und X_P= 100 (der D-Anteil soll in diesem Beispiel ausser Betracht gezogen werden). Die Regelabweichung sei 2.

Dimensionslos betrachtet hat der P-Anteil eine Verstärkung von $1\left(K_P = \frac{1}{X_P} \bullet 100\ \%\right)$.

Die Regelabweichung wird somit dem I-Anteil direkt aufgeschaltet. Nun wissen wir aus dem Kapitel „3.3 I-Regler", dass ein I-Regler gerade die Zeit T_n benötigt um dimensionslos an seinem Ausgang den Eingang abzubilden. Der I-Anteil würde also 10s benötigen bis er seinen Stellgrad um 2% vergrößert hat. Das X_P wird jetzt auf 50 gesetzt, die Verstärkung des P-Anteils beträgt also 2.

Nun wird die Regeldifferenz erst um den Faktor 2 verstärkt, bevor sie dem I-Anteil aufgeschaltet wird. In 10s erhöht nun der I-Anteil seinen Stellgrad um jeweils 4 %. Die Wirkung des I-Anteils wurde also auch um den Faktor 2 verstärkt.

Eine Veränderung der Proportionalverstärkung verändert in gleichem Maß das I- und das D-Verhalten eines PID-Reglers

4 Regelkreise mit stetigen Reglern

4.1 Allgemeines zur Arbeitsweise von Regelkreisen mit stetigen Reglern

In den vorherigen Kapiteln haben wir uns mit den einzelnen Teilen eines Regelkreises, d. h. der Regelstrecke sowie dem Regler, beschäftigt. Nun wollen wir uns mit dem Zusammenspiel beider Teile im geschlossenen Regelkreis befassen.

Hierbei soll unter anderem das stabile bzw. instabile Verhalten eines Regelkreises sowie das Führungsverhalten bzw. Störverhalten untersucht werden. Im Abschnitt „Optimierung" lernen wir die unterschiedlichen Einstellkriterien für den Regler an der Strecke kennen.

Unter anderem spricht man bei Betrachtungen von Regelkreisen auch öfters von statischem und dynamischem Verhalten des Regelkreises. Das statische Verhalten eines Regelkreises kennzeichnet den Ruhezustand des Regelkreises nach Ablauf aller zeitabhängigen Ausgleichsvorgänge, also den Zustand lange nach vorangegangenen Stör- oder Führungsgrößenänderungen. Das dynamische Verhalten zeigt dagegen in erster Linie das Verhalten des Regelkreises bei Änderungen, d. h. den Verlauf von einem Ruhezustand in den anderen Ruhezustand. Mit solchem zeitlichen Verhalten haben wir uns bereits im Kapitel 2 „Die Regelstrecke" beschäftigt.

Schließt man einen Regler an eine Strecke an, so erwarten wir einen Verlauf wie in Abbildung 42 gezeigt.

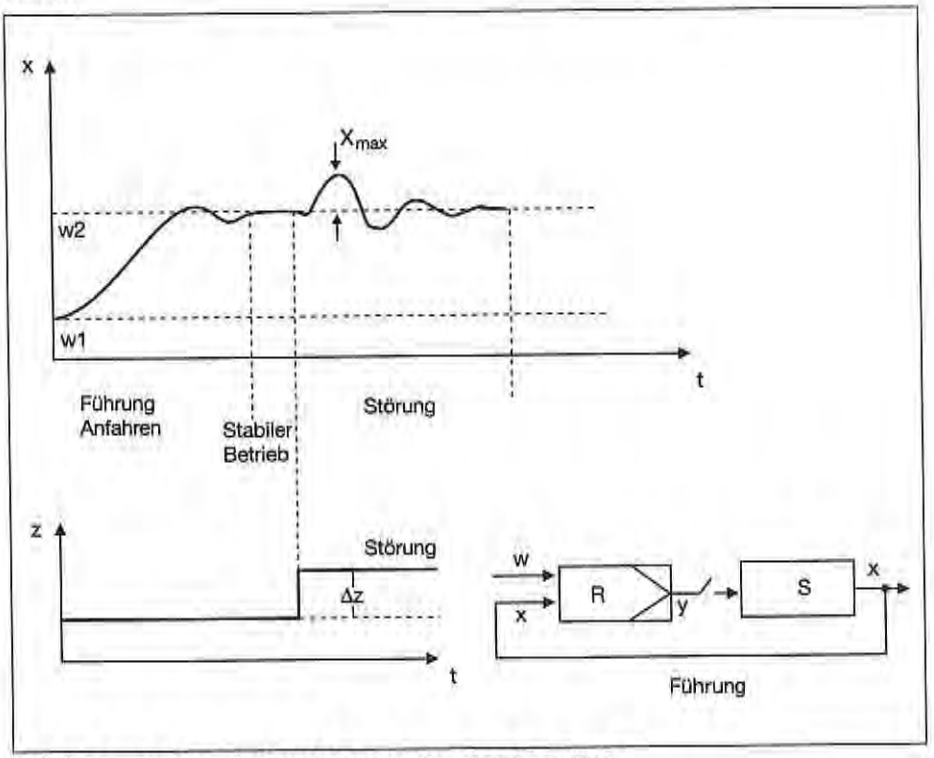


Abb. 42: Verlauf der Regelgröße im geschlossenen Regelkreis

4 Regelkreise mit stetigen Reglern

- Nach dem Schließen des Regelkreises soll die Regelgröße (x) in möglichst kurzer Zeit ohne großes Überschwingen die vorgegebene Führungsgröße (w) erreichen und auch halten. Man spricht in diesem Zusammenhang beim Einlaufen auf einen neuen Wert der Führungsgröße auch vom Führungsverhalten.
- Nach dem Anfahrvorgang soll die Regelgröße einen konstanten Wert ohne größere Schwankungen einhalten, d. h., der Regler soll an der Regelstrecke stabil arbeiten.
- Tritt nun eine Störung an der Regelstrecke auf, so soll der Regler ebenfalls in der Lage sein, diese mit möglichst kleinem Überschwingen in einer relativ kurzen Ausregelzeit auszuregeln. Das heißt, der Regler soll ebenfalls ein gutes Störverhalten aufweisen.

4.2 Stabiles und instabiles Verhalten des Regelkreises

Nach Ablauf des Anfahrvorganges soll die Regelgröße den durch die Führungsgröße vorgegebenen konstanten Wert annehmen und in einen stabilen Betrieb übergehen. Es kann jedoch auch vorkommen, dass der Regelkreis instabil wird und die Stellgröße sowie Regelgröße periodische Schwingungen ausführen. Dies kann sogar dazu führen, dass die Amplitude dieser Schwingung u. U. nicht konstant bleibt, sondern laufend wächst bis sie periodisch zwischen einem oberen und unteren Maximalwert hin und her pendelt. In Abbildung 43 werden die beiden Fälle eines instabilen Regelkreises aufgezeigt.

Man spricht hier häufig auch von der Selbsterregung des Regelkreises. Die Ursache von einem solchen instabilen Verhalten sind meist im Regelkreis vorhandene kleine Störamplituden, die eine gewisse Unruhe in den Kreis bringen. Die Selbsterregung ist im wesentlichen vom Aufbau des Regelkreises, ob mechanisch, hydraulisch oder elektrisch, unabhängig und tritt dann auf, wenn die zurückkommende Schwingung eine größere Amplitude und die gleiche Phasenlage wie die hineingeschickte hat.

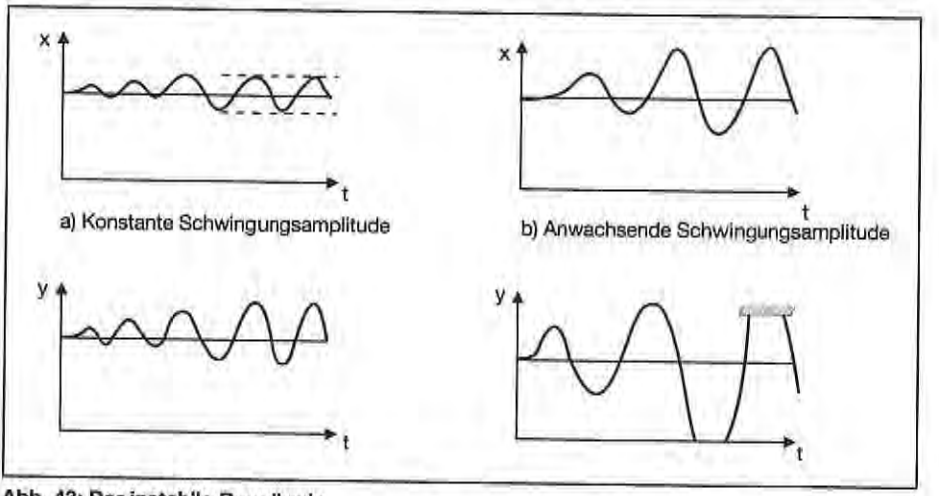


Abb. 43: Der instabile Regelkreis

Werden in einem stetigen Regelkreis, der stabil arbeitet, gewisse Betriebsbedingungen verändert (z. B. neue Reglereinstellung), so muss immer damit gerechnet werden, dass der Regelkreis instabil wird. Für die praktische Regelungstechnik ist die Stabilität des Regelkreises jedoch selbstverständlich. Pauschal kann man sagen, dass in der Praxis ein stabiles Verhalten dadurch erreicht

wird, indem man die Verstärkung im Regelkreis hinreichend klein und die Reglerzeitkonstante hinreichend groß wählt.

4.3 Führungs- und Störverhalten des Regelkreises

Wie bereits bemerkt, gibt es im wesentlichen zwei Fälle, die eine Veränderung der Regelgröße zur Folge haben. Je nach Ursache spricht man bei der Beschreibung des Streckenverhaltens im Regelkreis von Stör- oder Führungsverhalten:

Führungsverhalten
Die Führungsgröße wurde verstellt und der Prozess hat ein neues Gleichgewicht erreicht.

Störverhalten
Auf den Prozess wirkt von außen eine Störung und verschiebt das bisherige Gleichgewicht, bis sich wieder ein stabiler Istwert ausgebildet hat.

Das Führungsverhalten entspricht somit dem Verhalten des Regelkreises auf eine Führungsgrößenänderung. Das Störverhalten bestimmt die Reaktion auf äußere Änderungen, z. B. das Einbringen von kaltem Gut in einen Ofen. Stör- und Führungsverhalten in einem Regelkreis sind im allgemeinen nicht gleich. Dies liegt u. a. daran, dass sie auf unterschiedliche Zeitglieder bzw. an verschiedenen Eingriffsorten im Regelkreis wirken.

Oftmals ist aber nur eines der beiden Verhaltensweisen der Strecke von Bedeutung:

Bei einem Motor, an dessen Welle laufend wechselnde Belastungen auftreten und der dennoch eine konstante Drehzahl einhalten soll, ist sicher nur das Störverhalten von Bedeutung. Ein Ofen, bei dem das Gut nach einem gewissen Sollwertprofil über die Zeit auf unterschiedliche Temperaturen gebracht werden soll, ist dagegen das Führungsverhaltens interessanter.

Die Regelung dient dazu, das Streckenverhalten in gewünschter Weise zu beeinflussen, d. h. das Stör- oder Führungsverhalten zu verändern. Dabei ist es im allgemeinen nicht möglich beide Verhaltensweisen in gleicher Weise befriedigend zu korrigieren. Hier muss man entscheiden, ob die Regelung auf Stör- oder Führungsverhalten der Strecke optimiert werden soll. Hierzu mehr im Abschnitt „Optimierung".

4.3.1 Führungsverhalten des Regelkreises

Wie bereits schon ausgeführt wurde, liegt das Interesse bei einem Regelkreis mit gutem Führungsverhalten darin, dass bei Änderung der Führungsgröße die Regelgröße den neuen Wert der Führungsgröße möglichst schnell und mit einem kleinen Überschwingen erreichen soll. Man kann zwar ein Überschwingen durch eine andere Reglereinstellung verhindern, dies jedoch auf Kosten der Ausregelzeit (Abschnitt 4.1, Abbildung 42). Nach dem Schließen des Regelkreises dauert es eine gewisse Zeit bis die Regelgröße den am Regler vorgegebenen Wert der Führungsgröße erreicht hat. Dieses Anfahren an die Führungsgröße kann dabei kriechend oder schwingend ausgeführt sein (Abbildung 44).
Auf welches Verhalten des Regelkreises man Wert legt, ist von Fall zu Fall verschieden und hängt von dem zu regelnden Prozess ab.

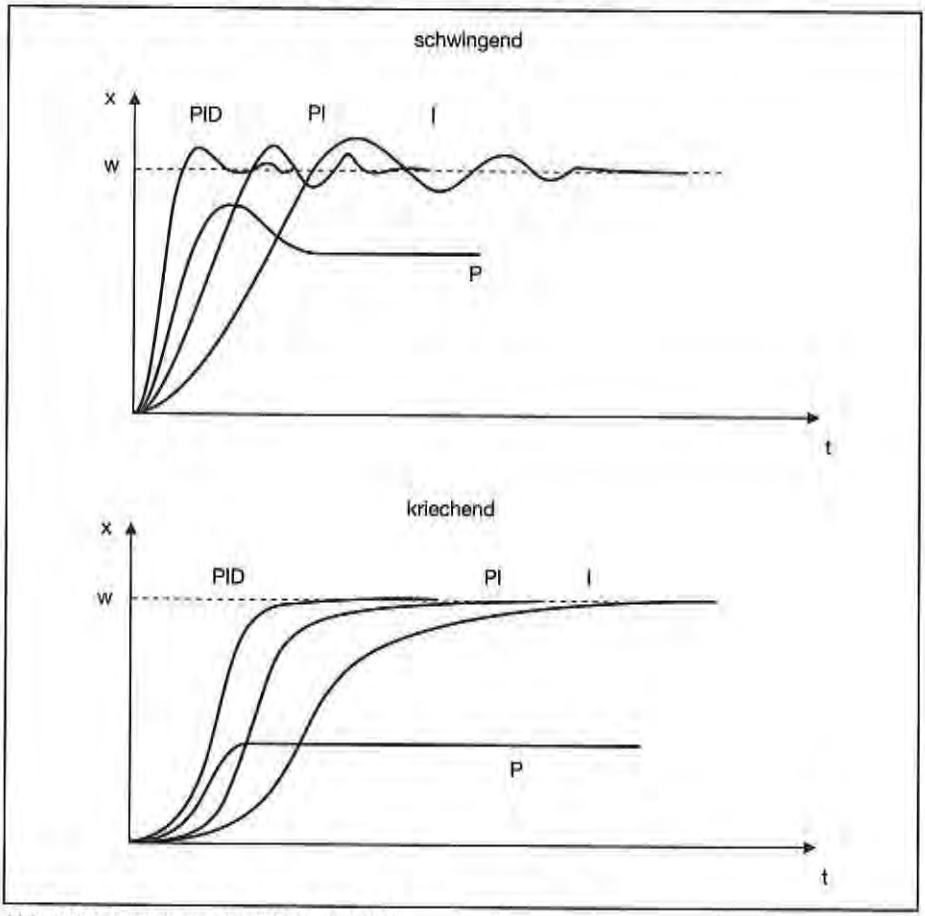


Abb. 44: Anfahren an die Führungsgröße

4.3.2 Störverhalten

Ist der Anfahrvorgang beendet und der Regelkreis stabil, so hat der Regler nun die Aufgabe den Einfluss von Störgrößen weitestgehend zu unterdrücken. Tritt eine Störung auf, so hat dies immer eine vorübergehende Regelabweichung zur Folge, die erst nach einer gewissen Zeit ausgeregelt wird. Will man eine gute Regelgüte erreichen, so sollen die Überschwingweite, die bleibende Regelabweichung und die Ausregelzeit so klein wie möglich sein (Abschnitt 1.4, Abbildung 3). Da die Größe von Störungen der Eigenschaften in einem Regelkreis meist als gegeben hingenommen werden muss, kann man die Regelgüte nur durch eine geeignete Wahl des Reglertypes und eine entsprechende Optimierung erreichen.

Die Störgrößen können an unterschiedlichen Stellen an der Regelstrecke angreifen. Je nach Angriffspunkt der Störgröße ist die Auswirkung auf den zeitlichen Verlauf der Regelgröße verschieden. Abbildung 45 zeigt den Verlauf einer Störsprungantwort der Regelstrecke, wenn eine Störung am Anfang, in der Mitte und am Ende der Strecke angreift.

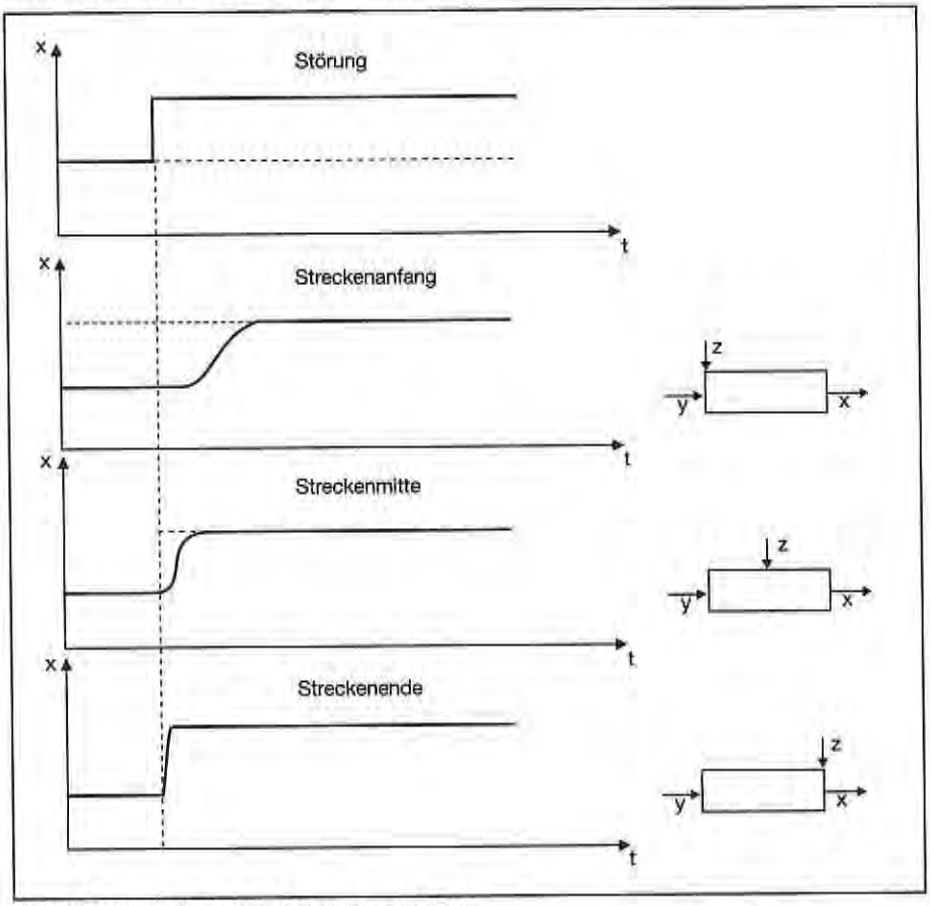


Abb. 45: Störsprungantwort einer Regelstrecke

4 Regelkreise mit stetigen Reglern

4.4 Welcher Regler passt zu welcher Regelstrecke?

Nachdem man einen geeigneten Regler nach Bauart, Abmessungen etc. ausgewählt hat (Abschnitt 1.5) stellt sich noch das Problem , welches Zeitverhalten zum Regeln eines bestimmten Prozesses eingesetzt wird. Mit den neueren Mikroprozessor-Regelgeräten sind die Preisunterschiede zwischen P-, PI- und PID-Regler zusammengeschrumpft. Es ist daher heutzutage nicht mehr entscheidend, ob man eine Regelaufgabe gerade noch mit einem P-Regler lösen kann.

Zum Zeitverhalten lässt sich allgemein sagen:
P-Regler besitzen eine bleibende Regelabweichung, die sich durch Einführung eines I-Anteils beseitigen lässt. Durch diesen I-Anteil erhöht sich aber die Neigung zum Überschwingen und die Regelung wird etwas träger. Verzögerungsbehaftete Strecken lassen sich mit einem P-Regler nur bei Vorhandensein eines I-Anteils stationär genau regeln. Bei einer Totzeit ist immer ein I-Anteil erforderlich, da ein P-Regler allein zu Schwingungen führt. Für Strecken ohne Ausgleich ist ein I-Regler ungeeignet.

Der D-Anteil lässt den Regler schnell reagieren. Bei stark pulsierenden Prozessgrößen, wie Druckregelung etc., führt dies jedoch zu Instabilitäten. Regler mit D-Anteil eignen sich dagegen gut für langsame Regelstrecken wie sie bei Temperaturregelungen auftreten. Ist die bleibende Regelabweichung unerwünscht, verwendet man dann einen sogenannten PI- oder PID-Regler.

Für den Zusammenhang zwischen Streckenordnung und Reglerstruktur gilt:
Für Strecken ohne Ausgleich oder Totzeiten (0. Ordnung) ist ein P-Regler ausreichend. Aber auch bei scheinbar verzögerungsfreien Strecken kann die Verstärkung eines P-Reglers nicht beliebig hoch gewählt werden, da der Regelkreis ansonsten durch kleinste immer vorhandene Totzeiten instabil würde. Zum vollständigen Ausregeln ist daher immer ein I-Anteil erforderlich.

Für Strecken 1. Ordnung mit kleinen Totzeiten ist ein PI-Regler gut geeignet.

Strecken 2. und höherer Ordnung (mit Verzugs- und Totzeiten) erfordern einen PID-Regler. Bei sehr hohen Ansprüchen sollte eine Kaskadenregelung, auf die in Kapitel 6 noch näher eingegangen wird, eingesetzt werden. Strecken 3. und 4. Ordnung sind mitunter mit PID-Reglern, meist aber nur noch mit Kaskadenregelung, befriedigend in den Griff zu bekommen.

Bei Regelstrecken ohne Ausgleich muss die Stellgröße nach dem Erreichen der Führungsgröße auf null zurückgenommen werden. Sie können daher nicht durch einen I-Regler geregelt werden, da diese durch ein Überschwingen der Regelgröße abgebaut werden müsste. Für Strecken ohne Ausgleich und höherer Ordnung (mit Verzugs- und Totzeiten) ist ein PD- oder PID-Regler geeignet.

Zusammenfassend ergeben sich aus den genannten Entscheidungskriterien folgende Tabellen:

	bleibende Regelabweichung		**keine bleibende Regelabweichung**	
	P	**PD**	**PI**	**PID**
Temperatur	Einfache Strecken für geringe Ansprüche		geeignet	sehr gut geeignet
Druck **Gas**			geeignet	
Wasser			reiner I-Anteil, meist besser	
Durchfluss		geeignet	brauchbar, aber I-Regler allein oft besser	
Niveau	bei kleiner Totzeit	geeignet	geeignet	sehr gut geeignet
Förderung	ungeeignet wegen Totzeit		brauchbar, aber I-Regler alleine besser	

Tabelle 3: Auswahl der Reglertypen zum Regeln der wichtigsten Regelgrößen

Strecke	Reglerstruktur			
	P	PD	PI	PID
reine Totzeit			gut geeignet oder reiner I-Regler	
1. Ordnung mit kleiner Totzeit			gut geeignet	geeignet
2. Ordnung mit kleiner Totzeit			schlechter als PID	gut geeignet
höhere Ordnung			schlechter als PID	gut geeignet
ohne Ausgleich mit Verzugszeit	geeignet	geeignet	geeignet	sehr gut geeignet

Tabelle 4: Geeignete Reglertypen für die unterschiedlichsten Regelstrecken

4.5 Optimierung

Regleroptimierung bedeutet die Anpassung des Reglers an den gegebenen Prozess bzw. Regelstrecke. Die Regelparameter (X_P T_n, T_v) müssen so gewählt werden, dass bei den gegebenen Betriebsverhältnissen ein möglichst günstiges Verhalten des Regelkreises erzielt wird. Dieses günstige Verhalten kann jedoch unterschiedlich definiert sein, z. B. als ein schnelles Erreichen der Führungsgröße bei kleinerem Überschwingen oder ein überschwingungsfreies Anfahren bei etwas längerer Ausregelzeit.

Neben den recht unscharfen Formulierungen, wie "möglichst schwingungsfreies Ausregeln", existieren natürlich in der Regelungstechnik exaktere Beschreibungen, wie u. a. die Betrachtung der von den Schwingungen eingeschlossenen Flächen und andere Kriterien. Solche Einstellkriterien sind jedoch eher geeignet, einzelne Regler und Einstellungen unter speziellen Bedingungen (Laborbedingungen) zu vergleichen. Für den Praktiker an der Anlage ist der Zeitaufwand und die Realisierbarkeit vor Ort von wichtiger Bedeutung.

Die in diesem Kapitel angegebenen Formeln und Einstellwerte sind gewisse Erfahrungswerte aus den unterschiedlichsten Quellen. Sie beziehen sich auf bestimmte idealisierte Prozesse und sind für den Anwendungsfall nicht immer zutreffend. Bei Kenntnis der verschiedenen Einstellparameter, z. B. eines PID-Reglers, sollte es jedoch jedem möglich sein, das Regelverhalten an eine entsprechende Anforderung anzupassen.

Neben der mathematischen Erfassung der Streckenparameter und den daraus resultierenden Reglerdaten existieren verschiedene empirische Verfahren. Eine Methode besteht darin, die Stellgröße periodisch zu ändern und zu untersuchen wie die Regelgröße diesen Änderungen folgt. Wird dies für verschiedene Schwingungsfrequenzen der Führungsgröße durchgeführt, kann aus der Amplitude und der Phasenverschiebung der folgenden Regelgrößenschwankung der Frequenzgang der Strecke ermittelt werden. Hieraus lassen sich die Regelparameter ableiten. Solche Verfahren sind sehr aufwendig, mit einem erhöhten mathematischen Aufwand verknüpft und für die Praxis unbrauchbar.

Andere Reglereinstellungen beruhen auf Erfahrungswerten, die teilweise in langwierigen Untersuchungen gefunden wurden. Auf solche Verfahren, besonders erwähnt seien die Einstellregeln von Ziegler und Nichols sowie Chien, Hrones und Reswick, wird noch näher eingegangen.

4.5.1 Maßstab für die Regelgüte

Die in der Literatur üblicherweise gemachten Angaben für die Regleroptimierung beziehen sich meist auf sprungweise Änderungen von z. B. Stör- oder Führungsgröße. Hierbei werden Störgrößenänderungen meist am Anfang der Regelstrecke angenommen.

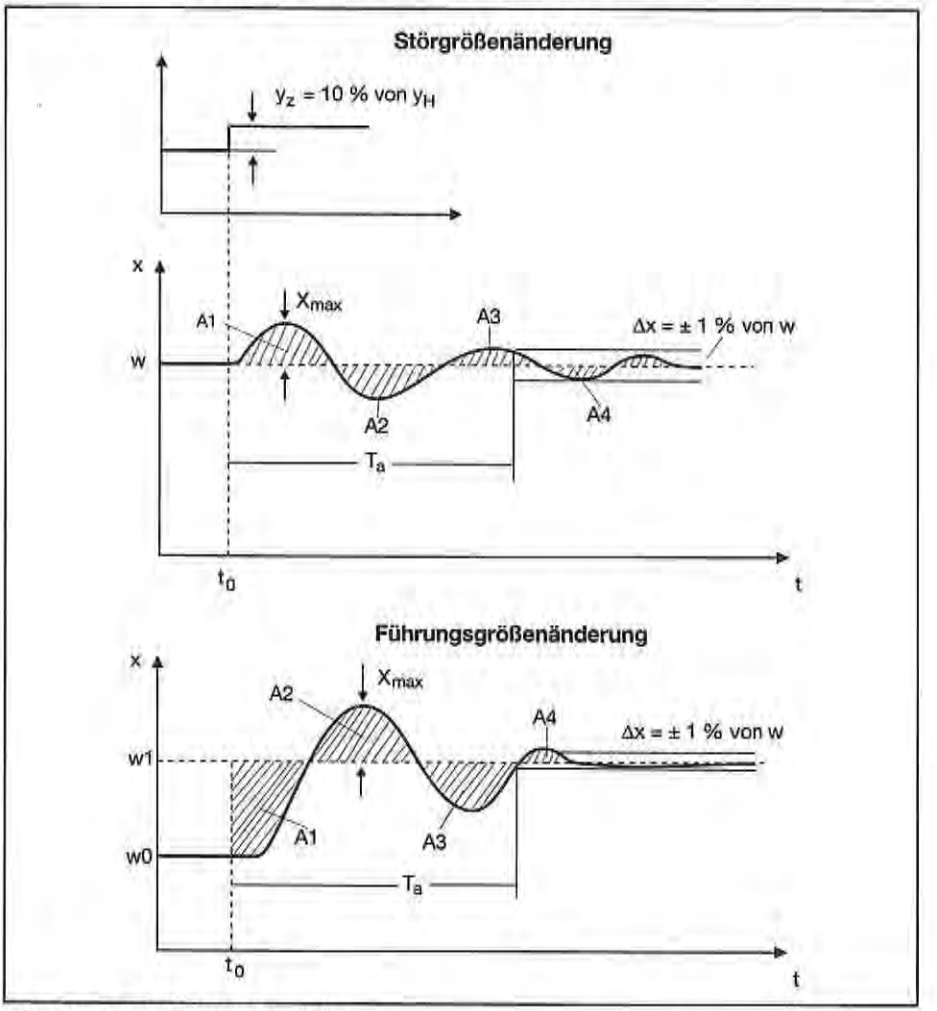


Abb. 46: Maßstab für die Regelgüte

Wegen ihres häufigen Auftretens im Betrieb, der leichten Realisierbarkeit im Versuch und der übersichtlichen rechnerischen Behandlung kommt dieser Störung auch die größte Bedeutung zu. In Abbildung 46 wird gezeigt, dass für eine sprungweise Störung sich ebenfalls als Gütemaßstäbe die Überschwingweite X_{max} und die Ausregelzeit T_a anbieten. Um die Ausregelzeit genauer zu defi-

nieren ist es erforderlich festzuhalten, wann der Regelvorgang als beendet anzusehen ist. Praktisch wird das Ausregeln einer Störung als beendet angesehen, wenn die Regeldifferenz unterhalb +/- 1 % vom Sollwert w bleibt. Zweckmäßig wird eine Störung 10 % von y_H gewählt.

Neben der Überschwingweite und der Ausregelzeit werden auch weiterhin für mathematische Untersuchungen als Gütemaßstäbe die Regelfehlerfläche herangezogen (Abbildung 46).

Lineare Regelfläche
(Lineares Optimum): $[A]_{min} = A_1 - A_2 + A_3 \ldots$

Betrags-Regelfläche
(Betrags-Optimum): $[A]_{min} = |A_1| + |A_2| + |A_3| + \ldots$

Quadratische Regelfläche
(Quadratisches Optimum): $[A]_{min} = A1^2 + A2^2 + A3^2 + \ldots$

Zweifellos weist, ganz unabhängig von sonstigen Gesichtspunkten, eine Reglereinstellung gegenüber einer anderen eine höhere Regelgüte auf, je kleiner Überschwingweite und Ausregelzeit sind. Gewisse Versuche zeigen jedoch, dass es innerhalb bestimmter Grenzen möglich ist, entweder die Überschwingweite klein zu halten, dafür aber eine längere Ausregelzeit in Kauf zu nehmen oder umgekehrt. Für die angegebene Regelfehlerfläche gibt es eine eindeutige Reglereinstellung, bei welcher diese Flächen zu einem Minimum werden.

Wie bereits mehrfach erwähnt, siehe hier auch Abschnitt 4.3 „Führungs- und Störverhalten des Regelkreises", werden den unterschiedlichen Gütemaßstäben unterschiedliche Gewichtung beigemessen, je nach Art der Regelgröße und Zweck der Anlage.

4.5.2 Einstellung nach der Schwingungsmethode

Bei der Schwingungsmethode nach Ziegler und Nicols werden die Regelparameter so verstellt, dass die Stabilitätsgrenze erreicht ist und der aus Regler und Strecke gebildete Regelkreis zu schwingen beginnt, das heißt die Regelgröße periodische Schwingungen um die Führungsgröße durchführt. Aus den so gefundenen Parametern können die Werte zur Reglereinstellung ermittelt werden. Dieses Verfahren ist nur auf Regelstrecken anwendbar, bei denen ein Überschwingen keine Gefahr birgt und die überhaupt instabil gemacht werden können. Um Schwingungen der Regelgröße zu erhalten, wird die Reglerverstärkung zunächst minimal gemacht, d. h. der Proportionalbereich auf den maximalen Wert gestellt. Der Regler muss als reiner P-Regler arbeiten, dafür wird der I-Anteil (T_n) sowie der D-Anteil (T_v) ausgeschaltet. Nun wird der Proportionalbereich X_P so lange verkleinert, bis die Regelgröße ungedämpfte Schwingungen mit konstanter Amplitude ausführt.

Hieraus ergeben sich:

- der kritische Proportionalbereich X_{Pk} sowie
- die Schwingungsdauer T_K der Regelgröße (Abbildung 47)

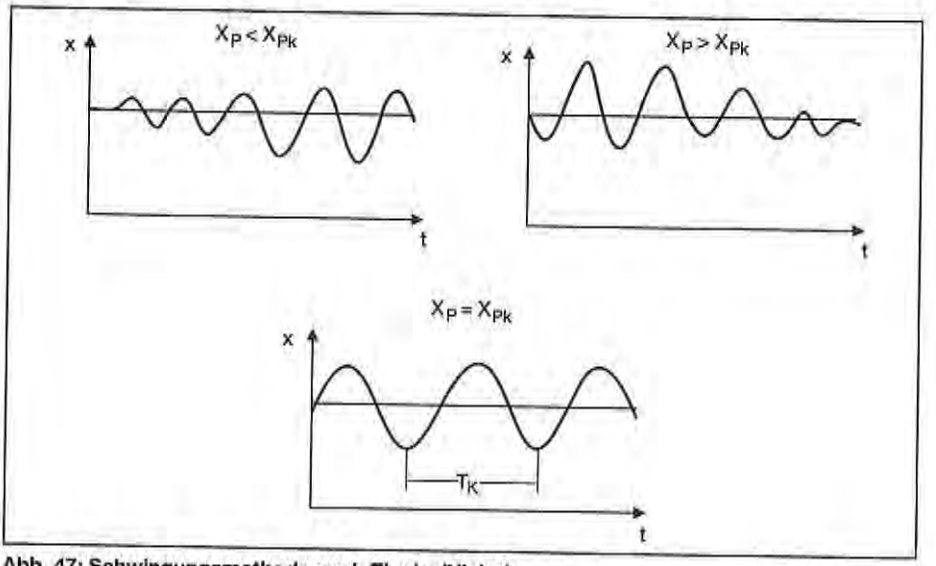


Abb. 47: Schwingungsmethode nach Ziegler/Nichols

Zur Einstellung können dann folgende Werte genutzt werden:

Reglerstruktur	
P	$X_P = X_{Pk} / 0{,}5$
PI	$X_P = X_{Pk} / 0{,}45$ $T_n = 0{,}85 \cdot T_K$
PID	$X_P = X_{Pk} / 0{,}6$ $T_n = 0{,}5 \cdot T_K$ $T_v = 0{,}12 \cdot T_{KP}$

Tabelle 5: Formeln zur Einstellung nach der Schwingungsmethode

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt zweifelsohne darin, dass die Untersuchung der Regelparameter sogar während des Betriebes stattfinden kann, sofern es gelingt, durch die beschriebenen Einstellungen Schwingungen um die Führungsgröße zu erreichen. Der Regelkreis braucht nicht geöffnet zu werden. Die Auswertung eines Schreiberprotokolls ist problemlos, bei langsamen Prozessen können die Werte auch durch Beobachten der Regelgröße und mit einer Uhr ermittelt werden. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass es nur auf solche Strecken angewendet werden kann, die, wie bereits erwähnt, instabil gemacht werden können.

Die Einstellregeln von Ziegler/Nicols gelten im wesentlichen für Strecken mit kleinen Totzeiten und einem Verhältnis $T_g / T_u > 3$.

4.5.3 Einstellung nach der Übergangsfunktion bzw. Streckensprungantwort

Eine weitere Möglichkeit der Parameterbestimmung beruht auf der Aufnahme der streckentypischen Parameter, wie bereits in Abschnitt 2.6 beschrieben wurde, durch Aufzeichnung der Streckensprungantwort. Es eignet sich auch für Strecken, die nicht zum Schwingen gebracht werden können. Der Regelkreis muss allerdings geöffnet werden, z. B. indem man ein Regelgerät in den Handbetrieb umschaltet, um direkt auf die Stellgröße Einfluss zu nehmen. Der Stellgradsprung sollte nach Möglichkeit in der Nähe der Führungsgröße stattfinden.

Ein Verfahren, mit dessen Hilfe die Regelparameter berechnet werden können, wenn die Parameter der Strecke bekannt sind, ist von den Herren Chien, Hrones, Reswick (CHR) entwickelt worden. Dieses Näherungsverfahren liefert günstige Regelparameter nicht nur für Änderung der Störgröße, sondern auch für Änderung der Führungsgröße und ist geeignet für Regelstrecken mit PTn-Verhalten mit ($n \geq 2$).

Aus der Sprungantwort werden ermittelt die Verzugszeit T_u, die Ausgleichszeit T_g sowie der Übertragungsbeiwert der Strecke K_S (Abbildung 46).

$$K_S = \frac{\text{Regelgrößenänderung}}{\text{Stellgrößenänderung}} = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

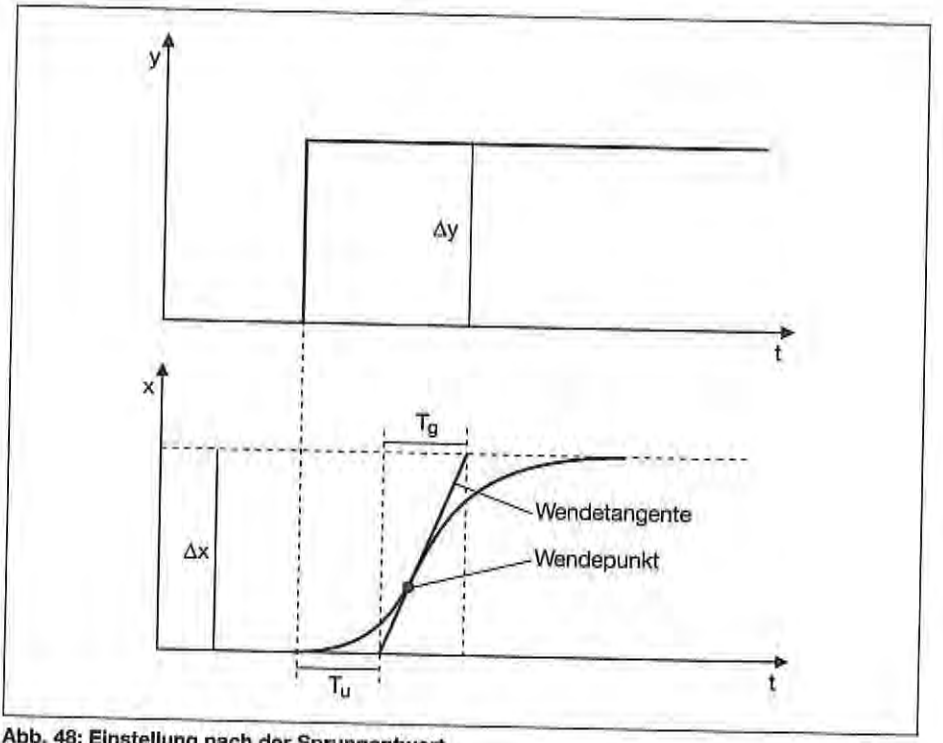


Abb. 48: Einstellung nach der Sprungantwort

Aus den gefundenen Werten ergeben sich dann folgende Einstellregeln:

Reglerstruktur	Führung	Störung
P	$X_P = 3{,}3 \cdot K_S \cdot (T_u/T_g) \cdot 100\%$	$X_P = 3{,}3 \cdot K_S \cdot (T_u/T_g) \cdot 100\%$
PI	$X_P = 2{,}86 \cdot K_S \cdot (T_u/T_g) \cdot 100\%$ $T_n = 1{,}2 \cdot T_g$	$X_P = 1{,}66 \cdot K_S \cdot (T_u/T_g) \cdot 100\%$ $T_n = 4 \cdot T_u$
PID	$X_P = 1{,}66 \cdot K_S \cdot (T_u/T_g) \cdot 100\%$ $T_n = 1 \cdot T_g$ $T_v = 0{,}5 \cdot T_u$	$X_P = 1{,}05 \cdot K_S \cdot (T_u/T_g) \cdot 100\%$ $T_n = 2{,}4 \cdot T_u$ $T_v = 0{,}42 \cdot T_u$

Tabelle 6: Formeln zur Einstellung nach der Sprungantwort

Beispiel:
T_n, T_v und X_P sollen bei einer Temperaturregelstrecke ermittelt werden. Der spätere Arbeitsbereich liegt bei 200°C. Die Heizleistung kann mit einem Stelltransformator kontinuierlich gesteuert werden und beträgt max. 4 kW. Es sind die Parameter für Störverhalten bei einer PID-Struktur zu ermitteln.

Die Heizleistung wird zunächst so eingestellt, dass sich eine Temperatur in Nähe des späteren Arbeitspunktes einstellt, beispielsweise 180°C bei 60% Heizleistung. Nun wird die Heizleistung schlagartig auf 80 % erhöht und der Temperaturverlauf mit einem Schreiber aufgezeichnet. Durch Einzeichnen der Wendetangente werden T_u mit 1 Minute und T_g mit 10 Minuten bestimmt. Sollte sich der Wendepunkt schwer bestimmen lassen, muss die Stellgrößenänderung erweitert werden, d. h. bei einer geringeren Heizleistung begonnen und bei einer höheren die Messung beendet werden. Die Endtemperatur betrage im hier geschilderten Fall 210°C.

Dann ergibt sich:

$$K_S = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{210\ °C - 180\ °C}{80\ \% - 60\ \%} = \frac{30\ K}{20\ \%} = 1{,}5\ K/\%$$

Mit den ermittelten Werten für T_u und T_g ergeben sich folgende Parameter:

$$T_n = 2{,}4 \bullet T_u = 2{,}4 \bullet 1 = 2{,}4\ min = 144\ s$$

$$T_v = 0{,}42 \bullet T_u = 0{,}42 \bullet 1 = 0{,}42 min = 25 s$$

$$X_P = 1{,}05 \bullet K_S \bullet \frac{T_u}{T_g} = 1{,}05 \bullet 1{,}5 \frac{K}{\%} \bullet \frac{1\ min}{10\ min} \bullet 100\ \% = 15{,}75\ K$$

Ein gewisser Nachteil bei diesem Verfahren soll nicht verschwiegen werden. In der Praxis fällt die Kurve nur in den seltensten Fällen so aus, dass der Wendepunkt wirklich völlig eindeutig bestimmt werden kann. So ergeben sich beim Einzeichnen der Wendetangente mehr oder weniger gravierende Fehler bei der Ermittlung von T_u und T_g. Das geschilderte Verfahren ist jedoch sehr hilfreich, um zunächst einen Eindruck über die ungefähre Reglereinstellung zu erhalten. Diese kann dann nach anderen Kriterien noch verfeinert werden.

4.5.4 Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit

Mitunter ergeben sich bei der geschilderten Methode allerdings Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Ausgleichszeit T_g. In vielen Fällen kann in einem Prozess nur zwischen 0 oder 100% Stellgröße gewählt werden. Wird der Prozess aber kontinuierlich mit 100%iger Stellgröße betrieben, droht eventuell die Zerstörung.

Man kann sich nun damit behelfen, dass man auf die Ermittlung von Tg verzichtet und dafür die Anstiegsgeschwindigkeit V_{max} bestimmt. Hierzu gibt man der Regelstrecke als Stellgrad schlagartig 100% vor und beobachtet den Ausgang der Regelstrecke (Abbildung 49). Die Regelgröße wird sich erst einige Zeit nach dem Stellgradsprung verändern. Diese Veränderung wird bis zum Wendepunkt immer schneller von statten gehen. Am Wendepunkt nähert sich dann die Regelgröße immer langsamer ihrem Endwert. Es gilt, bei diesem Verfahren den Wendepunkt abzuwarten und den Stellgrad dann wieder auf 0 zu setzen. Hierbei ist zu beachten, das insbesondere bei Strecken mit großer Verzugszeit, z. B. Öfen, die Regelgröße auch nach dem Abschalten der Heizung noch beträchtlich weiter steigen kann.

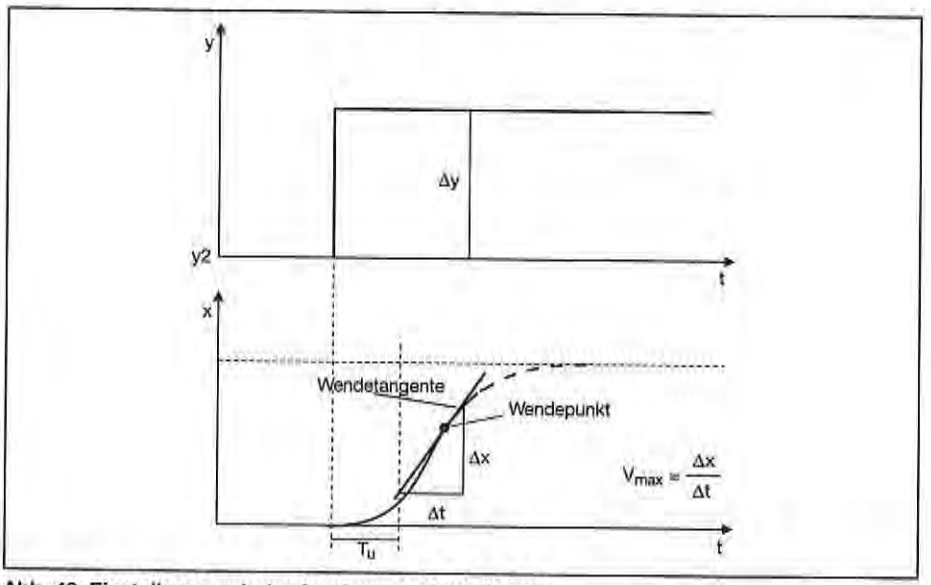


Abb. 49: Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit

Am Wendepunkt ist nun die Tangente einzuzeichnen, und aus dem Steigungsdreieck V_{max} zu bestimmen. Mit der ebenfalls aus der Sprungantwort ermittelten Verzugszeit, können gemäß der später folgenden Tabelle die Reglereinstellungen vorgenommen werden.

Das beschriebene Verfahren liefert noch günstigere Werte, wenn der Regler und die möglicherweise vorhandenen Stellglieder beliebige Stellgrade zulassen. In diesem Fall sollte der Stellgradsprung um den später gewünschten Sollwert gelegt werden:

Beispiel:
Der spätere Arbeitspunkt eines Ofen liegt bei 300°C. Der vorhandene Regler wird in den Handbetrieb geschaltet und der Stellgrad soweit manuell erhöht, bis sich 280°C im Ofen ergeben; diese Temperatur wird beispielsweise bei 60% Stellgrad erreicht. Nun wird der Stellgrad schlagartig auf

100 % erhöht und der Wendepunkt abgewartet. Um die Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit für dieses Beispiel anzuwenden, benötigen wir zusätzlich für unsere später folgenden Formeln die Höhe des Stellgradsprunges Δy (40 %) und den Stellbereich y_H (da wir mit dem Regler 100 % Stellgrad vorgeben können, sind dies 100 %).

Reglerstruktur	Stellgradsprung 100 %	beliebige Stellgradsprünge
P	$X_P = V_{max} \cdot T_u$	$X_P = V_{max} \cdot T_u \cdot y_H/\Delta y$
PI	$X_P = 1{,}2 \cdot V_{max} \cdot T_u$ $T_n = 3{,}3 \cdot T_u$	$X_P = 1{,}2 \cdot V_{max} \cdot T_u \cdot y_H/\Delta y$ $T_n = 3{,}3 \cdot T_u$
PID	$X_P = 0{,}83 \cdot V_{max} \cdot T_u$ $T_n = 2 \cdot T_g$ $T_v = 0{,}5 \cdot T_u$	$X_P = 0{,}83 \cdot V_{max} \cdot T_u \cdot y_H/\Delta y$ $T_n = 2 \cdot T_g$ $T_v = 0{,}5 \cdot T_u$
PD	$X_P = 0{,}83 \cdot V_{max} \cdot T_u$ $T_v = 0{,}25 \cdot T_u$	$X_P = 0{,}83 \cdot V_{max} \cdot T_u \cdot y_H/\Delta y$ $T_v = 0{,}25 \cdot T_u$

Tabelle 7: Formeln zur Einstellung nach der Anstiegsantwort für Strecken mit Ausgleich

4.5.5 Einstellung ohne Kenntnis der Regelstrecke

Mitunter muss ein Regler an eine Strecke angepasst werden, ohne dass die Aufnahme einer Übergangsfunktion bzw. ein Auftrennen des Regelkreises möglich ist. Bei nicht allzu trägen Prozessen stellt man hierzu zunächst eine reine P-Struktur mit möglichst großem Proportionalbereich ein, um ein reines P-Verhalten zu erreichen.

Eine Führungsgröße in der Nähe des späteren Betriebspunktes wird vorgegeben und die Istwertanzeige am Regler beobachtet. Nach einiger Zeit wird sich ein Istwert stabilisieren, der relativ weit von der Führungsgröße entfernt liegt. Dies liegt an der geringen Verstärkung durch den großen Proportionalbereich. X_P wird nun verkleinert und dadurch wird die Abweichung zur Führungsgröße immer kleiner. Bei weiterer Verkleinerung von X_P wird schließlich ein Punkt erreicht, bei dem der Istwert periodisch zu schwingen beginnt. Ein weiteres Verkleinern von X_P würde die Amplitude der Schwingung nur vergrößern und ist somit sinnlos. Diese Schwingungen sind meist nicht symmetrisch um die Führungsgröße, sondern ihr Mittelwert liegt oberhalb oder unterhalb. Dies liegt, wie bereits festgestellt wurde, an der immer noch vorhandenen Regelabweichung, die ein P-Regler erzeugt.

Nun wird der Proportionalbereich wieder so weit vergrößert, bis der Istwert einen stabilen Wert annimmt.

Jetzt wird der I-Anteil hinzugenommen (PI-Struktur) und in Schritten die Nachstellzeit T_n verkleinert. Durch den I-Anteil geht der Istwert langsam an die Führungsgröße heran. Ein weiteres Verkleinern von T_n beschleunigt zwar das Annähern an die Führungsgröße, hat aber auch Schwingungen zur Folge. Auf den Prozess wird nun eine Störung gegeben, sei es durch eine Führungsgrößenänderung oder eine Störgröße. Es wird beobachtet, wie sich die neue Führungsgröße einstellt. Schwingt der Istwert über, muss T_n vergrößert werden. Nähert er sich nur sehr langsam an, kann eine noch kürzere Nachstellzeit eingestellt werden.

Nun kann, je nach Bedarf, noch ein D-Anteil (PID-Struktur) aktiviert werden, indem für T_v ein Wert von ca. $T_n/4{,}5$ eingegeben wird.

Dieses hier erwähnte Verfahren stellt eine gängige praktische Methode dar und eignet sich für einfache Regelstrecken.

4.5.6 Kontrolle der Reglereinstellung

Man kann nicht erwarten, dass der Regelkreis nach der ersten Parameter-Einstellung bereits optimal arbeitet. Besonders bei schwer regelbaren Strecken mit $T_g/T_u < 3$ muss meist nachjustiert werden. Die Sprungantwort der Regelgröße auf eine Führungsgrößenänderung zeigt Fehlanpassungen der Regelparameter recht deutlich. Aus den sich ergebenden Einschwingvorgängen können Rückschlüsse auf notwendige Korrekturen gezogen werden. Man kann jedoch auch eine Störgröße, z. B. das Öffnen einer Ofentür, auf den Prozess geben und deren Auswirkungen analysieren. Mit einem Schreiber wird die Regelgröße protokolliert und die Reglereinstellung gegebenfalls verändert (Abbildung 50).

Mit einer Vergrößerung des Proportionalbereiches X_P - was der Verkleinerung der Reglerverstärkung entspricht - wird der Einschwingvorgang stabiler. Ohne I-Anteil ist eine bleibende Regelabweichung feststellbar. Beim Verkleinern von X_P verringert sich die Regelabweichung, ein weiteres Verkleinern des Proportionalbereiches führt schließlich zu ungedämpften Schwingungen. Eine Reglereinstellung knapp unter der Selbsterregung durch ein kleines X_P führt zwar zu einer geringen Regelabweichung, ist aber nicht optimal, da der Regelkreis in diesem Fall nur sehr wenig gedämpft ist. Als Folge davon, führen auch kleine Störungen zu Schwingungen in der Regelgröße.

Der I-Anteil baut die bleibende Regelabweichung entsprechend der Nachstellzeit T_n ab. Ist der I-Anteil zu gering (T_n zu groß), so ist die Auswirkung darin sichtbar, dass sich die Regelgröße nur kriechend der Führungsgröße nähert. Ein größerer I-Anteil (T_n klein) wirkt wie eine zu große Regelverstärkung und macht den Regelkreis instabil, was Schwingungen zur Folge hat.

Eine große Vorhaltezeit T_v wirkt anfangs stabilisierend, sie kann jedoch bei einer pulsierenden Regelgröße den Regelkreis auch instabil machen.

Die Abbildung 50 zeigt Hinweise auf mögliche Fehleinstellung. Als Beispiel ist hier das Führungsverhalten einer Regelstrecke 3. Ordnung für einen PID-Regler aufgezeichnet.

Bei der Regleroptimierung sollte immer nur ein Parameter verstellt und erst die Wirkung dieser Veränderung abgewartet werden bis weitere Parameter verändert werden. Ferner ist immer zu berücksichtigen, ob der Regler auf Störungs- oder Führungsverhalten optimiert werden soll.

So zeigt sich z. B., dass eine „straffe" Reglereinstellung mit einer hohen Verstärkung des Reglers zwar ein schnelles Anfahren an die Führungsgröße bringt, der Regelkreis wegen der hohen Verstärkung jedoch schlecht gedämpft ist. Dies könnte bedeuten, dass bei einer kurzfristigen Störung eine Schwingung auftritt. Das heißt, eine geringere Reglerverstärkung bringt zwar ein etwas langsames Anfahren, macht aber den gesamten Regelkreis insgesamt stabiler.

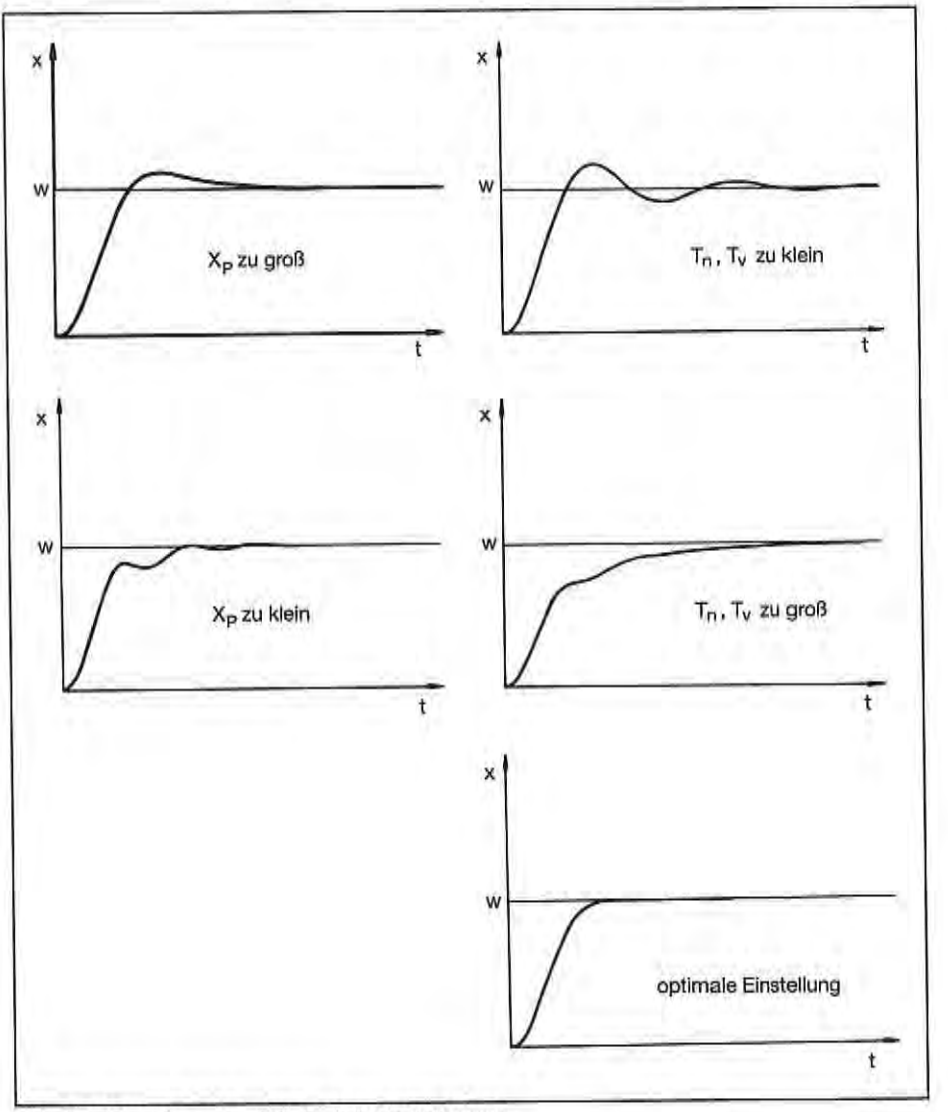


Abb. 50: Hinweise auf mögliche Fehleinstellungen

5.1 Unstetige und stetigähnliche Regler

Die bisher behandelten stetigen Regler mit P-, PD-, I-, PI- und PID-Verhalten gestatteten jeden Wert der Stellgröße y zwischen den Grenzwerten y = 0 und $y = y_H$ einzustellen. Dadurch ist es dem Regler möglich, die Regelgröße im ausgeregelten Zustand immer gleich der Führungsgröße w zu halten.

Unstetige und stetigähnliche Regler besitzen im Gegensatz zu den stetigen kein kontinuierliches Ausgangssignal, sondern der Ausgang kann nur den Status Ein oder Aus besitzen. Die Ausgänge solcher Regler sind vielfach als Relais ausgeführt, aber auch Spannungs- und Stromausgänge sind üblich. Anders als beim Stetig-Regler handelt es sich jedoch hier um Binärsignale, die nur die Werte 0 oder Maximal annehmen. Hierüber lassen sich z. B. Halbleiterrelais ansteuern.

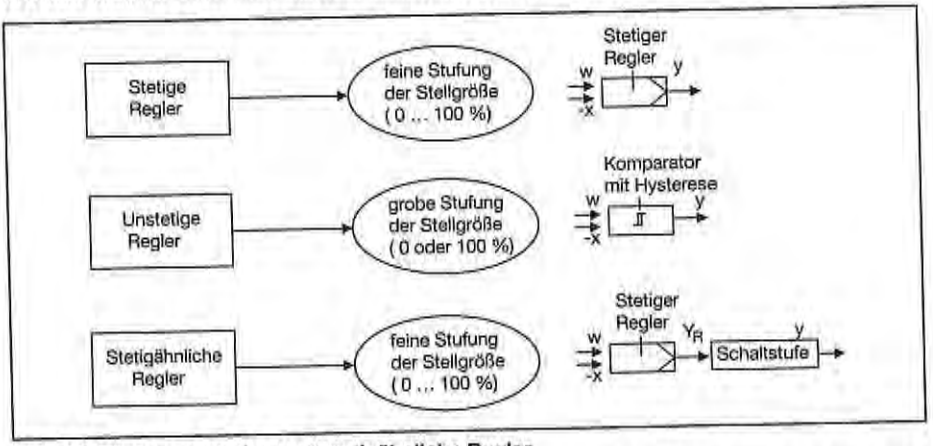


Abb. 51: Stetige, unstetige und stetigähnliche Regler

Neben den genannten Reglern mit einem binären Ausgangssignal unterscheidet man noch Dreipunktregler bzw. Mehrpunktregler. Hier kann die Stellgröße drei bzw. mehrere Werte annehmen. Einen Dreipunktregler verwendet man z. B. für Heizen und Kühlen oder Be- und Entfeuchten etc.

Man könnte annehmen, dass Regler, deren Ausgänge nur den Zustand ein oder aus annehmen können, nur ein unbefriedigendes Regelverhalten ergeben. Überraschenderweise lässt sich aber, insbesondere mit einem stetigähnlichen Regler, bei vielen Regelstrecken ein für den vorgesehenen Zweck ausreichendes Ergebnis erzielen. Wegen des einfachen Aufbaus der Ausgangsstufe bzw. der erforderlichen Stellglieder und der damit verbundenen geringeren Kosten, sind unstetige und stetigähnliche Regler sehr stark verbreitet. Man findet sie in vielen Gebieten der Verfahrensregelung überall da, wo die Regelstrecken relativ langsam und mit schaltenden Stellgliedern gut zu beherrschen sind.

Der einfachste Regler mit binärem Ausgang ist der unstetige Regler, dieser stellt praktisch einen Grenzwertschalter dar, welcher die Stellgröße beim Unter- bzw. Überschreiten eines fest vorgegebenen Sollwertes lediglich ein- oder ausschaltet. Als einfaches Beispiel lässt sich hier ein Zweipunkt-Bimetall-Temperaturregler in einem Bügeleisen oder ein Kühlschrankthermostat nennen.

Stetigähnliche Regler lassen sich z. B. dadurch aufbauen, indem man einen stetigen Regler am Ausgang um eine Schaltstufe erweitert (siehe Abbildung 51), das stetige Ausgangssignal wird somit in Schaltfolgen umgewandelt. Für diese Regler lassen sich ebenfalls P-, PD-, I, PI- und PID-Verhalten realisieren (Abbildung 51) und es gelten weitestgehend die bisher beim stetigen Regler getroffenen Aussagen.

5.2 Der Unstetige Regler

Der Unstetige Regler besitzt nur zwei Schaltzustände, d. h., das Ausgangssignal wird bei Unter- bzw. Überschreiten einer Führungsgröße bzw. eines Grenzwertes ein- bzw. ausgeschaltet. Man setzt diese Geräte auch öfters als Grenzwertmelder ein, die beim Überschreiten eines Sollwertes eine Alarmmeldung absetzen.

Ein einfaches Beispiel für einen mechanischen unstetigen Regler ist, wie bereits erwähnt, der Bimetallschalter eines Bügeleisens, der die Heizwicklung beim Erreichen der eingestellten Temperatur aus- und beim Unterschreiten einer festen Schalthysterese einschaltet. Es existieren aber auch Beispiele auf dem Gebiet elektronischer Regler. Beispielsweise ein Widerstandsthermometer (Pt 100), dessen Auswerteelektronik bei der Unterschreitung einer Temperatur von z. B. 5° C eine Heizung einschaltet und als Frostschutz in einer Anlage dient. Das Widerstandsthermometer ersetzt in diesem Fall gemeinsam mit der erforderlichen Auswertelektronik den Bimetallschalter.

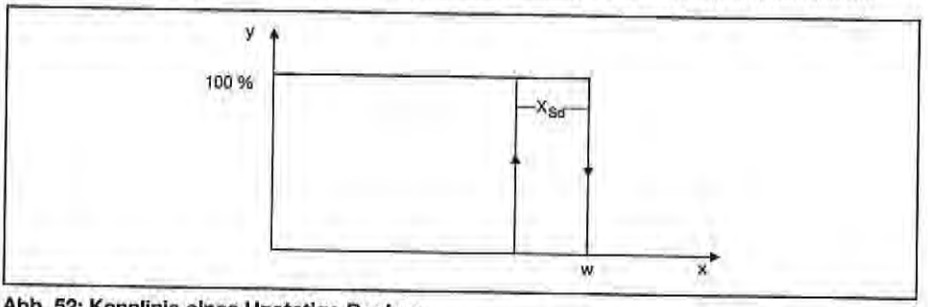


Abb. 52: Kennlinie eines Unstetige Reglers

Der im Bild gezeigte Unstetige Regler gibt bis zum Erreichen des Sollwertes 100% der Leistung in die Strecke, steigt die Regelgröße über den Sollwert, wird die Leistung auf 0% zurückgenommen. Sieht man einmal von der Hysterese ab, entspricht der Unstetige Regler einem stetigen Regler mit einem X_P von 0, seine Verstärkung ist somit unendlich.

5.2.1 Verlauf der Regelgröße bei Strecken 1. Ordnung

Schalten wir einen Unstetigen Regler, z. B. einen Stabtemperaturregler, an eine Regelstrecke mit 1. Ordnung (ein Temperierbad, bei dem das Wasser umgewälzt wird und über einen Tauchsieder erwärmt wird), so erhalten wir den in Abbildung 53 wiedergegebenen zeitlichen Verlauf von Regel- und Stellgröße. Rein theoretisch würde der Regler die Energie beim Erreichen der Führungsgröße abschalten, die Regelgröße würde sofort absinken und die Führungsgröße wieder unterschreiten, der Regler würde sofort wieder einschalten usw. Da eine Strecke 1. Ordnung idealisiert keine Verzugszeit hat, würde das Relais dauernd ein- und ausschalten und in kürzester Zeit zerstört sein.

Ein Unstetiger Regler besitzt daher meist eine Schaltdifferenz X_{Sd} (auch Hysterese genannt) um den Sollwert, innerhalb der sich der Schaltzustand nicht ändert. In der Praxis ist es häufig so, dass die Schalthysterese einseitig um den Sollwert liegt, unterhalb (beispielsweise beim Heizen) oder oberhalb (beispielsweise beim Kühlen). In Abbildung 53 sei ein Fall betrachtet, bei dem die Schalthysterese unterhalb des Sollwertes liegt. Der Ausschaltpunkt des Reglers liegt bei der Führungsgröße w. Da es sich in der Praxis meist nicht um ideale Regelstrecken handelt (Regelstrecke ist etwas mit Verzugszeit behaftet), wird sich der obere und untere Wert der Regelgröße nicht exakt mit den Schaltflanken der Hysterese (X_{Sd}) decken.

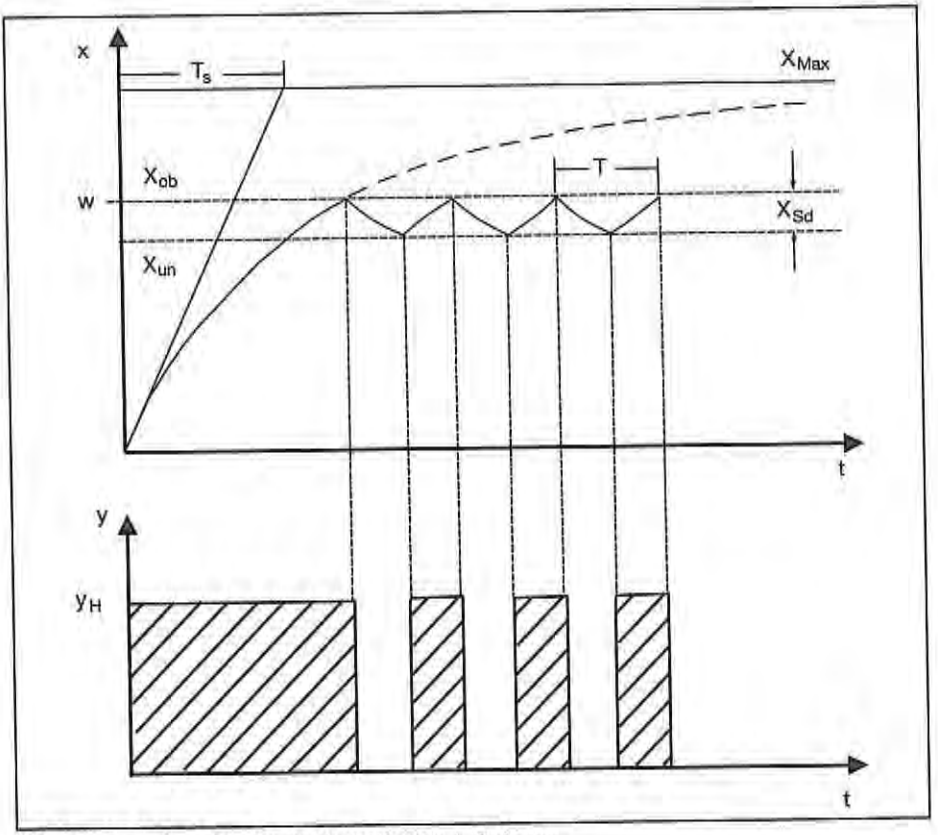


Abb. 53: Unstetiger Regler an einer Strecke 1. Ordnung

Jedoch gilt, der Regler schaltet erst, wenn die Regelgröße das hierdurch festgelegte Band verlassen hat. Die Regelgröße pendelt also dauernd mindestens zwischen dem Wert X_{ob} und X_{un} hin und her. Die Schwankungsbreite der Regelgröße wird somit durch die Schaltdifferenz mitbestimmt.

Der Unstetige Regler kann also bei einer Regelstrecke mit einer Verzögerung die Regelgröße nur innerhalb X_{ob} und X_{un} konstant halten. Das Ein- und Ausschalten kommt daher, dass die Stellgröße im eingeschalteten Zustand zu groß, im ausgeschalteten Zustand zu klein ist, um die Regelgröße konstant zu halten.

Bei sehr vielen Regelaufgaben, wo es nur auf ein ungefähres Konstanthalten der Regelgröße ankommt, stören solche Schwankungen nicht. Als Beispiel sei hier ein elektrisch beheizter Haushaltsbackofen genannt, bei dem es nicht stört, wenn bei einer Backtemperatur von 200°C die tatsächliche Temperatur im Ofen zwischen 196°C und 200°C hin und her pendelt.

Stören die dauernden Schwankungen der Regelgröße, so lassen sich diese etwas minimieren, wenn man eine kleinere Schaltdifferenz X_{Sd} wählt. Damit erhalten wir jedoch automatisch mehr Schaltungen pro Zeiteinheit, d. h. die Schaltfrequenz wächst. Dies ist jedoch nicht immer erwünscht, weil es auf die Lebensdauer des Relais im Regler einwirkt.

5 Schaltende Regler

Durch eine mathematische Herleitung , auf die hier nicht detailliert eingegangen wird, erhalten wir für die Schaltfrequenz (f_{sch}) über die Größen T_S, X_{Max} und X_{Sd} folgende Beziehung:

$$f_{sch} = \frac{1}{T_{sch}} = \frac{1}{4} \bullet \frac{X_{Max}}{X_{Sd}} \bullet \frac{1}{T_S} \qquad \text{gültig für} \quad x = \frac{X_{Max}}{2}$$

f_{sch} : Schaltfrequenz
T_{sch} : Schwingungsdauer
X_{Max} : max. Istwert der mit dauerhaft eingeschaltetem Regler erreicht wird
X_{Sd} : Schaltdifferenz
T_S : Zeitkonstante der Strecke 1. Ordnung

Wir sehen aus dieser Beziehung weiterhin, je kleiner die Zeitkonstante (T_S) ist, um so größer wird ebenfalls die Schaltfrequenz. Bei einer Regelstrecke mit kleiner Zeitkonstanten wird sich also eine sehr hohe Schaltfrequenz einstellen, die ebenfalls zu einem schnellen Abnutzen der Schaltstufe des Reglers beitragen würde. Aus diesem Grund ist ein Unstetiger Regler für diese Art Regelstrecke ungeeignet.

5.2.2 Verlauf der Regelgröße bei Strecken höherer Ordnung

Bei einer Regelstrecke mit einer Verzögerung haben wir gesehen, dass idealsiert die Schwankungsbreite allein durch die Schaltdifferenz X_{Sd} des Reglers bestimmt ist. Ein Einfluss der Strecke ist hier nicht vorhanden. Bei einer Regelstrecke mit mehreren Verzögerungen, die durch Verzugszeit, Ausgleichszeit und Übertragungsbeiwert beschrieben werden kann, ist dies nicht mehr der Fall. Sobald Verzögerungen vorliegen, wird die Regelgröße auch nach Abschalten weiter steigen oder fallen und nach Erreichen eines Maximum erst zurückgehen. In Abbildung 54 ist zu sehen, wie die Regelgröße beim Ein- und Ausschalten der Stellgröße über die Ansprechgrenze des Relais hinaus schwingt.

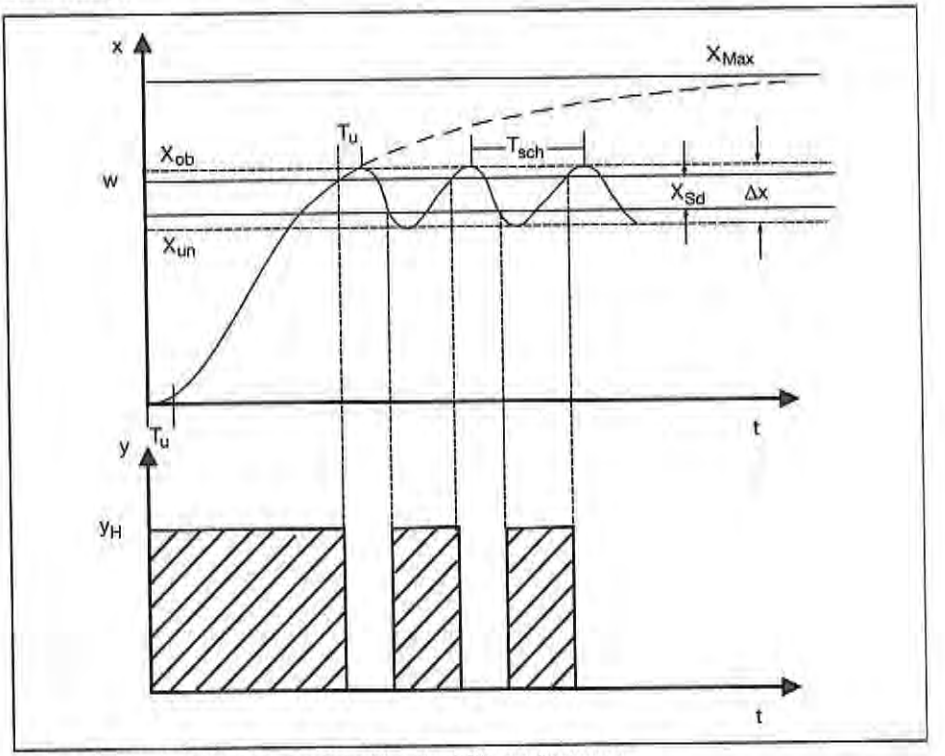


Abb. 54: Unstetiger Regler an einer Strecke höherer Ordnung

Somit erhalten wir ein Überschwingen der Regelgröße, deren Grenzen durch die Werte X_{ob} und X_{un} angegeben sind. Das heißt, Schwankungen der Regelgröße wären selbst dann vorhanden, wenn die Schaltdifferenz des Reglers null wäre. Dies liegt daran, dass die Strecke erst nach Verstreichen der Verzugszeit auf die Stellgrößenänderungen reagiert.

Als Beispiel dient wiederum der elektrobeheizte Ofen. Wird die Energiezufuhr bei Erreichen der Führungsgröße abgeschaltet, so erhöht sich die Temperatur dennoch weiter. Dies liegt daran, dass sich die Temperatur im Ofen nur langsam ausbreitet und der Heizstab bereits eine höhere Temperatur hat, als die vom Sensor beim Erreichen der Führungsgröße gemeldete. Daher heizt der Stab und das Ofenmaterial noch nach. Auch das Aufheizen beim Wiedereinschalten der Heizung erfolgt

mit einer gewissen Trägheit und die Temperatur sinkt zunächst nach dem Einschalten noch etwas weiter.

Je stärker die Heizung dimensioniert ist, um so stärker weichen, wegen der Verzögerung der Strekke, die Temperatur des Heizstabes und des Sensors beim Aufheizen voneinander ab, und um so mehr schwingt die Regelgröße beim Aufheizen über die Führungsgröße. In diesem Zusammenhang spricht man auch vom Leistungsüberschuss und meint damit, um welchen Prozentsatz die maximale Leistung eines Ofen größer ist als die Leistung, die zum Anfahren an einen Sollwert benötigt wird.

Beispiel: Ein Ofen, der zum Ausregeln eines Sollwertes von 200°C eine Stellgröße von durchschnittlich 2kW benötigt, bei dauerhaft eingeschaltetem Kontakt jedoch eine Leistung von 4kW verbraucht, besitzt im Arbeitspunkt 200°C einen Leistungsüberschuss von 100%.

Das heißt, je größer der Leistungsüberschuss, um so größer ist die Schwankungsbreite Δx der Regelgröße um die Führungsgröße.

Nun soll die sich einstellende, aber unerwünschte, Schwankungsbreite der Regelgröße für den Fall abgeschätzt werden, dass ein 100%iger Leistungsüberschuss zur Verfügung steht:

Es wird angenommen, das die Schalthysterese $X_{Sd} = 0$ ist.

$$\Delta x = X_{Max} \bullet \frac{T_u}{T_g} \quad \text{gültig für} \quad x \approx \frac{X_{Max}}{2}$$

Wie wir sehen, ist die Schwankungsbreite neben X_{max} (bei einer linearen Strecke ist dies proportional dem Leistungsüberschuss) ebenfalls von dem Verhältnis T_u/T_g abhängig, dessen Kehrwert wir schon in Kapitel 2 als Maß für die gute Regelbarkeit einer Regelstrecke kennengelernt haben. Je kleiner die Verzugszeit im Vergleich zur Ausgleichszeit ist, desto kleiner ist die Schwankungsbreite. Die genannte Formel für die Schwankungsbreite Δx gilt für $X_{Sd} = 0$. Ist eine Schaltdifferenz vorhanden, so addiert sich diese zur Schwankungsbreite hinzu.

Damit ergibt sich:

$$\Delta x = X_{Max} \bullet \frac{T_u}{T_g} + X_{Sd}$$

Für die Schwingungsdauer gilt: $T_{sch} = 4T_u$ (gültig für $X_{Sd} = 0$)

Wird eine Schaltdifferenz X_{Sd} eingestellt, ist die Schwingungsdauer geringfügig größer. Hieraus lässt sich direkt die maximale Schaltfrequenz angeben, mit deren Hilfe Aussagen über die zu erwartende Kontaktlebensdauer getroffen werden können:

$$f_{sch} = \frac{1}{4T_u}$$

5.2.3 Verlauf der Regelgröße bei Strecken ohne Ausgleich

Da die Sprungantworten an einer integrierenden Regelstrecke linear sind, ist das Verhalten eines unstetigen Reglers einfach zu beschreiben und zu berechnen. Die Regelgröße pendelt ebenfalls zwischen den durch die Grenzen X_{ob} und X_{un} gegebenen Werten hin und her (Abbildung 55). Betrachtet man idealisiert eine Strecke ohne Verzugszeit T_u, so decken sich die Grenzwerte der Regelgröße mit der Schaltdifferenz X_{Sd}.

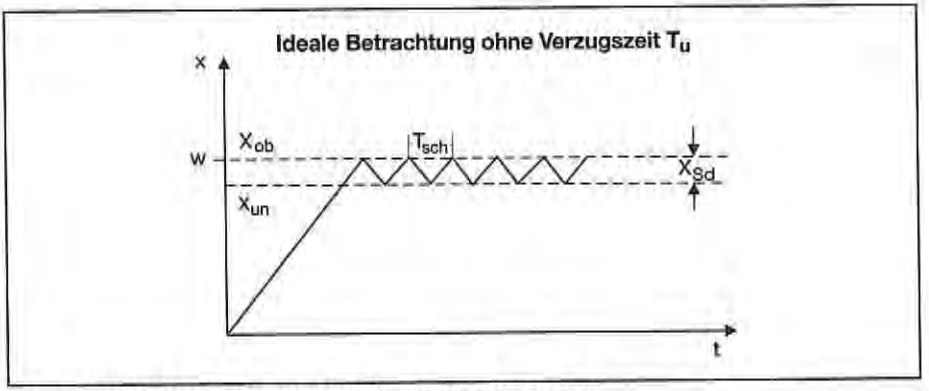


Abb. 55: Unstetiger Regler an einer Strecke ohne Ausgleich

Für die Schaltfrequenz f_{sch} gilt dann:

$$f_{sch} = \frac{1}{T_{sch}} = \frac{K_{IS} \bullet y_H}{2 \bullet X_{Sd}}$$

K_{IS} : Übertragungsbeiwert der Strecke

y_H : Maximalwert der Stellgröße

Ein Beispiel für einen solchen Anwendungsfall ist ein Unstetiger Regler, der als Grenzwertschalter bei einer Niveau-Regelung eines Wasserbehälters eingesetzt wird. Der Behälter dient als Vorratsbecken, von dem Wasser je nach Bedarf entnommen wird oder auch eine konstante Menge zufließt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Unstetige Regler den Vorteil eines einfachen Aufbaus und wenigen Parametern zum Einstellen bietet. Der Nachteil ist das Schwanken der Regelgröße um die Führungsgröße. Diese Schwankungen können bei unlinearen Strecken im unteren Betriebsbereich der Regelstrecke größer sein als im oberen, da hier die Strecke einen Leistungsüberschuss besitzt. Beim Anfahren von Sollwerten im unteren Betriebsbereich kommt es dann häufig zu größeren Schwankungen als im oberen Betriebsbereich.

Das Einsatzgebiet von solchen Unstetigen Reglern ist auf Anwendungsfälle beschränkt, wo kein exaktes Ausregeln gefordert wird. In der Praxis werden diese Regler meist durch mechanische Thermo-, Niveau-Schalter etc. realisiert. Wird ein elektronischer Regler mit einem Sensor eingesetzt, wird der Regler fast immer mit einer Dynamik versehen.

5.3 Stetigähnliche Regler: Der Proportionalregler

Ein Stetigähnlicher Regler besteht, wie wir bereits erfahren haben, aus einem stetigen Regler und einer Schaltstufe. Wird dieser Regler nun als reiner Proportionalregler betrieben, gelten ebenfalls die Kennlinien wie wir sie im Kapitel 3.2.1 „Der Proportionalbereich" kennengelernt haben.

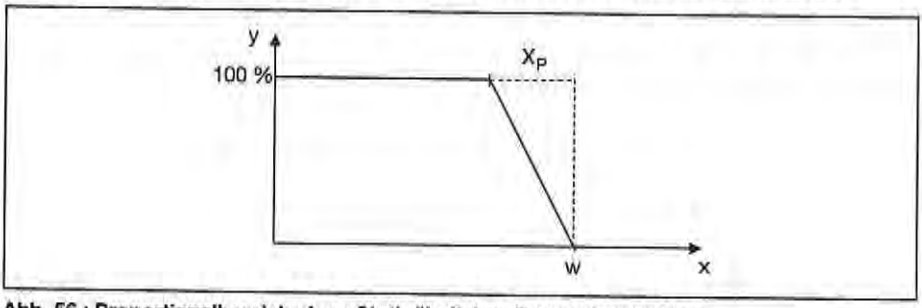


Abb. 56 : Proportionalbereich eines Stetigähnlichen Proportionalreglers

Der Stetigähnliche Regler, dessen Kennlinie in Bild 56 gezeigt ist, gibt, solange der Istwert unterhalb des Proportionalbandes liegt, ebenfalls 100% Stellgrad aus. Gelangt der Istwert in das Proportionalband weiter in Richtung zum Sollwert, wird immer weniger Stellgrad ausgegeben.

Wie lässt sich aber mit einem schaltenden Ausgang die Energiezufuhr nahezu stetig, d. h. stufenlos, dosieren?

Letztlich bleibt es über die Zeit gesehen doch gleich, ob ein Ofen mit 50 % des Heizstromes betrieben wird, oder der volle Strom nur die Hälfte der Zeit in die Heizung des Ofen fließt. Der stetigähnliche Regler ändert statt der Größe des Ausgangssignales das Einschaltverhältnis bzw. Tastverhältnis des Ausgangssignales. Ein Tastverhältnis von 1 entspricht 100 % der Stellgröße, 0,25 entsprechen 25 % der Stellgröße usw.

Das Tastverhältnis lässt sich wie folgt definieren:

$$T = \frac{T_e}{T_e + T_{au}}$$

T_e = Einschaltzeit
T_{au} = Ausschaltzeit

Durch Multiplikation mit 100 % erhält man die relative Einschaltdauer angegeben in % T (%), die dem Stellgrad entspricht.

$$T(\%) = y = T \bullet 100\%$$

Bei einem Stetigähnlichen Regler übt die Charakteristik der Regelstrecke (vor allem die vorhandenen Zeitkonstanten) einen starken Einfluss auf den Verlauf der Regelgröße aus. Eine Regelstrecke, bei welcher die Ausbreitung einer Störung relativ lange dauert (Strecke mit hohen Zeitkonstanten) und die Energie speichern kann, wird auf Impulse ausgleichend wirken. Bei entsprechender Schalthäufigkeit wird bei diesen Strecken mit einem stetigähnlichen Regler ein ähnliches Ergebnis wie mit einem stetigen Regler erzielt.

Anders ist es bei einer sehr schnellen Regelstrecke. Sie glättet den laufend wechselnden Energiefluss kaum und entsprechend schwankt die Regelgröße.

Daher finden Stetigähnliche Regler bevorzugt dort Anwendung, wo es sich um vergleichsweise langsame Regelstrecken handelt. Sie werden daher bevorzugt bei Temperaturregelungen eingesetzt.

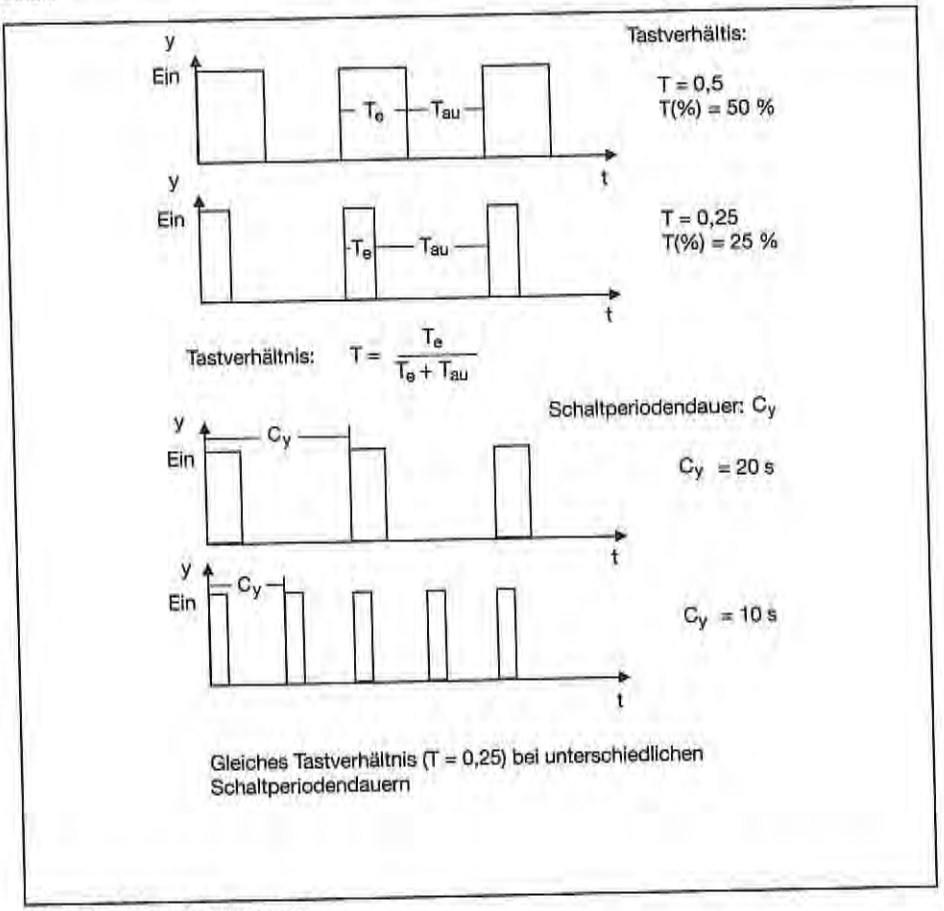


Abb. 57: Leistungssteuerung

Die Definition des Tastverhältnisses bzw. der relativen Einschaltdauer besagt, in welchem Verhältnis die Einschaltdauer eines Reglerausganges zur Summe aus Ein- und Ausschaltdauer steht, z. B. ein Tastverhältnis von 0,25 besagt, dass die Energiezufuhr 25 % der Gesamtzeit eingeschaltet ist. Es wird hierbei aber keine Aussage über die Dauer des Zeitraumes gemacht, in dem sich der Einschaltvorgang wiederholt.

Daher definiert man die sogenannte Schaltperiodendauer (C_y), die diesen Zeitraum festlegt. Sie spiegelt den Zeitraum wieder, in dem einmal ein- und ausgeschaltet wird, d. h. sie setzt sich aus der Summe von Ein- und Ausschaltzeit zusammen (Abbildung 57). Die Schaltfrequenz ergibt sich aus dem Kehrwert der Schaltperiodendauer.

5 Schaltende Regler

Die Abbildung 57 zeigt unter anderem ein gleiches Tastverhältnis (T = 0,25) bei unterschiedlicher Schaltperiodendauer.

Beträgt bei dem gegebenen Tastverhältnis von 0,25 C_y = 20s, so bedeutet dies, dass die Energiezufuhr für 5s eingeschaltet und für 15s ausgeschaltet ist.

Bei einer Periodendauer von 10s ist die Energiezufuhr für 2,5s eingeschaltet und 7,5s ausgeschaltet. Bei beiden Fällen beträgt jedoch die zugeführte Leistung 25 % der Maximalleistung, sie wird jedoch bei C_y = 10s feiner dosiert. Die Schwankungen der Regelgröße fallen im zweiten Fall geringer aus.

In der Theorie ergibt sich dann für die Einschaltzeit des Reglers folgender Zusammenhang:

$$T_e = \frac{y \bullet C_y}{100\ \%}$$

T_e = Einschaltzeit
y = Stellgrad in %
C_y = Schaltperiodendauer

Das heißt, bei einer kleinen Periodendauer wird die zugeführte Energie feiner dosiert. Demgegenüber steht jedoch ein häufiges Schalten des Stellgliedes (Relais/Schütz). Aus der Periodendauer lässt sich die Schalthäufigkeit leicht ermitteln.

Beispiel:
Die Periodendauer eines Reglers, eingesetzt für die Temperaturregelung, betrage C_y = 20s. Das verwendete Relais habe eine Kontaktlebensdauer von 1 Mio. Schaltungen.

Bei dem gegebenen C_y ergeben sich drei Schaltspiele pro Minute, d. h. 180/h. Bei 1 Mio. Schaltungen ergibt sich eine Lebensdauer von 5.555 Stunden = 231 Tage. Rechnet man eine Betriebsdauer von 8h/Tag, so ergeben sich ca. 690 Tage. Bei ca. 230 Arbeitstagen pro Jahr erhalten wir eine Lebensdauer von ca. 3 Jahren.

Allgemein wird die Schaltperiodendauer so gewählt, dass der Regelprozess die stoßweise zugeführte Energie noch glätten kann, um möglichst keine periodischen Schwankungen der Regelgröße zu erhalten. Dabei sollte man jedoch die Anzahl der Schaltspiele immer in Betracht ziehen. Der Mikroprozessor-Regler hält jedoch den eingestellten Wert für die Schaltperiodendauer C_y nicht kontinuierlich für seinen ganzen Arbeitsbereich ein. Dieses im einzelnen zu erläutern ist zu kompliziert und führt an dieser Stelle zu weit. Falls die Möglichkeit besteht, einen schaltenden P-Regler im Handbetrieb zu betreiben, dann kann man hier durch direkte Vorgabe einer Stellgröße den Einfluss auf C_y beobachten.

Wenn C_y an das Zeitverhalten der Strecke angepasst ist, kann das Verhalten eines stetigähnlichen Reglers (als Proportionalregler mit Dynamik) durchaus mit dem eines stetigen Reglers verglichen werden, womit sich auch dessen Name erklärt. Beim stetigähnlichen Regler resultieren die unterschiedlichen Stellgrößen zwar durch eine Variation des Einschaltverhältnisses, man kann aber am Regelgrößenverlauf keinen Unterschied zum stetigen Regler erkennen.

5.4 Stetigähnliche Regler: Der Regler mit Dynamik

Ein Stetigähnlicher Regler, betrieben als reiner Proportionalregler, zeigt bei entsprechender Anpassung von C_y ein nahezu gleiches Verhalten an einer Regelstrecke wie ein stetiger Regler mit P-Verhalten. Er reagiert zwar sehr schnell auf Änderungen in der Regeldifferenz, jedoch ist er, wie ein stetiger Proportionalregler auch, nicht in der Lage, die Regeldifferenz auf null zu bringen. Einen Stetigähnlichen Regler kann man ebenfalls als PID-Regler konfigurieren, dass heißt, auch er bremst beim Anfahren an den Sollwert und regelt genau auf den Sollwert aus.

Man kann sich (auch bei den P-Reglern) einen Stetigähnlichen Regler als eine Kombination aus einem stetigen Regler und einer nachgeschalteten Schaltstufe vorstellen. Der stetige Regler ermittelt aus dem Verlauf der Regelgrößenabweichung seinen Stellgrad und schaltet diesen der Schaltstufe auf. Die Schaltstufe berechnet die relative Einschaltdauer des Schaltstufenausganges. Entsprechend der relativen Einschaltdauer und dem eingestellten C_y wird der Ausgang der Schaltstufe getaktet.

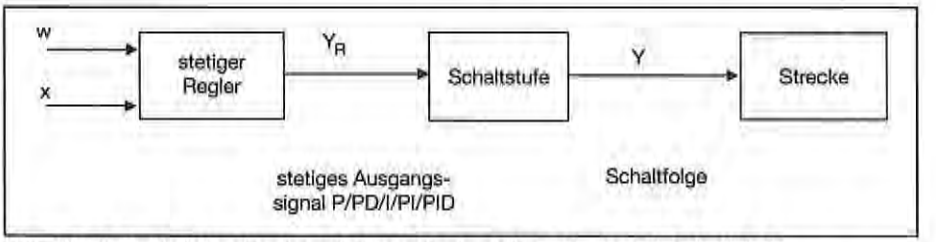


Abb. 58: Stetigähnlicher Regler mit Dynamik als stetiger Regler mit Schaltstufe

Beispiel: Am gezeigten Stetigähnlichen Regler gibt der stetige Regler einen Stellgrad von 50% aus. Für die Schaltstufe bedeuten 50% Stellgrad eine relative Einschaltdauer von ebenfalls 50%. Nehmen wir einmal an, dass das eingestellte C_y 10s beträgt, dann setzt die Schaltstufe, immer im Wechsel von 5s, den Eingang ein und aus.

5.4.1 Besonderheit der Schaltstufe

Wie bereits beschrieben, berechnet die Schaltstufe die relative Einschaltdauer des Schaltstufenausganges aufgrund des Stellgrad des stetigen Reglers. Entsprechend der relativen Einschaltdauer und dem eingestellten C_y wird der Ausgang der Schaltstufe getaktet.

In der Analogtechnik ergab sich durch die technische Realisierung der Schaltstufe ein zusätzliches D-Verhalten. Wurde der stetige Regler vor der Schaltstufe als P-Regler betrieben, ergab sich gemeinsam mit der Schaltstufe ein PD-Verhalten. Das heißt, hatte der erwähnte analoge Regler reines P-Verhalten (es konnte also nur X_P eingestellt werden), hatte der entstandene stetigähnliche Regler durch die nachgeschaltete Schaltstufe zusätzlich ein D-Verhalten, was sich nicht einstellen ließ. Da sich diese Eigenschaft als recht günstig erwies, wurde sie auch in den Mikroprozessor-Reglern beibehalten. Die Höhe des D-Anteil der Schaltstufe ist meist vom Hersteller festgelegt und lässt sich somit auch nicht verändern.

5 Schaltende Regler

Die folgende Tabelle zeigt die Reglerkonfiguration eines Stetigähnlichen Reglers und das tatsächliche Verhalten:

Eingestelltes Reglerverhalten	Tatsächliches Reglerverhalten
P	PD
PD	PDD
I	PI
PI	PID
PID	PD/PID

Tabelle 8: Reglerkonfiguration eines Stetigähnlichen Reglers und tatsächliches Verhalten

Beispiel: Ein als Proportionalregler konfigurierter Stetigähnlicher Regler hat durch die nachgeschaltete Schaltstufe tatsächlich PD-Verhalten.

Hat der stetige Regler eine PID-Struktur, besitzt der bestehende schaltende Regler einen P, einen I- und zwei D-Anteile. Ein derartiger PD/PID-Regler ist bei schaltenden Temperaturreglern recht verbreitet, da er für diese Anwendung das beste Anfahrverhalten besitzt. Je nach Reglerstruktur ergeben sich für den Stetigähnlichen Regler unterschiedliche Einstellparameter:

PD	PDD	PI	PID	PD/PID
X_P	X_P	-	X_P	X_P
C_y	C_y	C_y	C_y	C_y
-	-	T_n	T_n	T_n
-	T_v	-	-	T_v

Tabelle 9: Einstellparameter für die unterschiedlichen Zeitverhalten

5.4.2 Bemerkungen zu unstetigen und stetigähnlichen Reglern mit einem Ausgang

In der Praxis werden unstetige und stetigähnliche Regler mit einem Ausgang oft unter dem Begriff Zweipunktregler zusammengefasst. Der Grund ist der, dass der Ausgang dieser Regler nur zwei Zustände, nämlich ein oder aus, annehmen kann. Konfiguriert werden diese Regler, indem man die Reglerart, nämlich Zweipunktregler, im Gerät definiert. Setzt man das X_P nun auf 0, ergibt sich ein unstetiger Regler. Wird ein X_P größer 0 gewählt, ergibt sich ein stetigähnlicher Regler, bei dem die entsprechenden Regelparameter (T_n, T_v und C_y) eingestellt werden können.

5.5 Regler mit zwei Ausgängen: Der Dreipunktregler

5.5.1 Unstetiger Regler mit zwei Ausgängen

Einen Unstetigen Regler mit zwei Ausgängen kann man sich vereinfacht aus der Zusammenschaltung zweier untereinander verkoppelter unstetiger Regler mit einem Ausgang aufgebaut denken. Mit ihnen kann beispielsweise bei der Unterschreitung der Führungsgröße geheizt und bei der Überschreitung gekühlt werden. Andere Anwendungen wären z. B. das Be- und Entfeuchten einer Klimakamer etc. Im Regler wird je ein Ausgang einer Stellgröße zugeordnet: So wird beispielsweise zum Heizen oftmals der 1. Reglerausgang, zum Kühlen der 2. Reglerausgang, genutzt, alle Parameter die den „Heizregler" betreffen, werden mit einem $Index_1$ gekennzeichnet; alle Parameter die den „Kühlregler" betreffen werden mit einem $Index_2$ gekennzeichnet

Bewegt sich die Regelgröße in einem festgelegten Intervall um die Führungsgröße, dem Kontaktabstand X_{Sh}, ist kein Ausgang aktiv (Abbildung 59). Dieser Kontaktabstand ist erforderlich, damit bei unruhiger Regelgröße nicht dauernd zwischen beiden Stellgrößen umgeschaltet wird, z. B. Heiz- und Kühlregister. Für den Kontaktabstand ist auch die Bezeichnung Totband gebräuchlich.

Unstetiger Regler mit zwei Ausgängen besitzen neben dem Kontaktabstand noch je eine Hysterese, für den Heiz- bzw. Kühlkontakt, welche meist mit der Schaltdifferenz X_{Sd1} bzw. X_{Sd2} bezeichnet werden. Durch diese beiden Parameter vermeidet man das „Flattern" der Kontakte, wenn die Regelgröße aus dem Heiz- bzw. Kühlbereich in den Bereich des Kontaktabstandes kommt.

Hinsichtlich der Schaltdifferenz X_{Sd1} bzw. X_{Sd2} und der damit verbundenen Schalthäufigkeit bzw. Regelgüte im Zusammenhang mit den Streckeneigenschaften, gelten die gleichen Zusammenhänge wie bei einem unstetigen Regler mit nur einem Ausgang.

Die erreichbare Regelgenauigkeit wird bei diesem Regler durch die Schalthysteresen und den Kontaktabstand begrenzt (Abbildung 59).

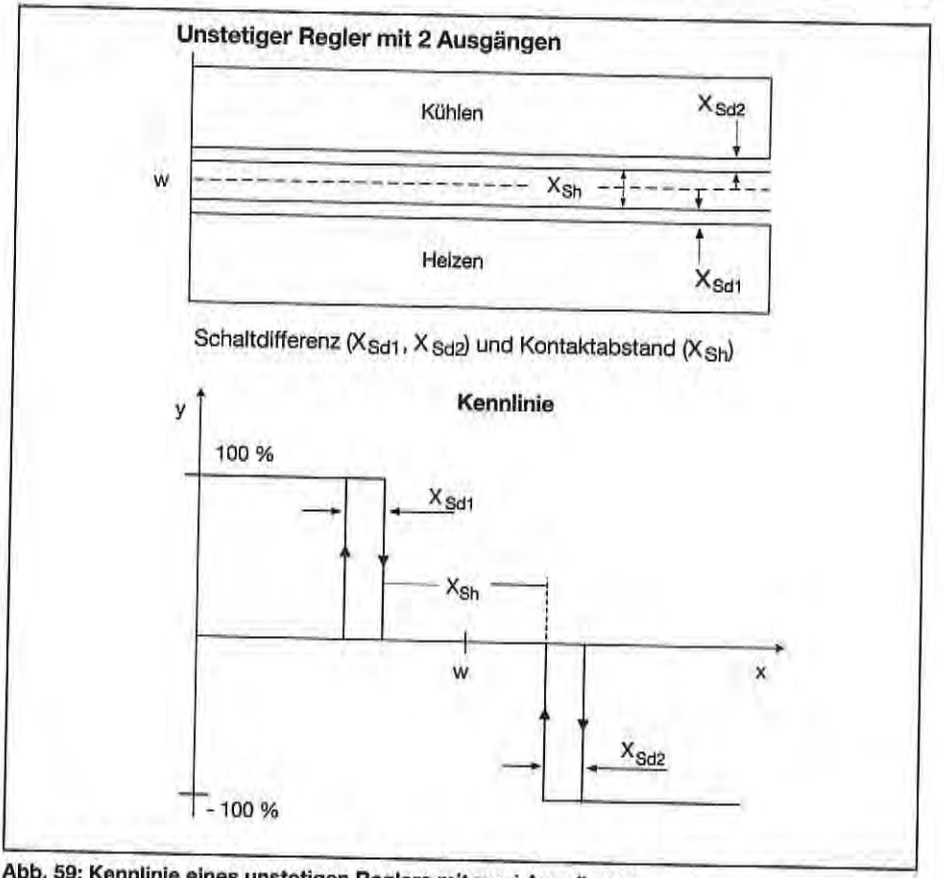


Abb. 59: Kennlinie eines unstetigen Reglers mit zwei Ausgängen

5.5.2 Stetigähnlicher Regler mit zwei Ausgängen als Proportionalregler

Auch ein Stetigähnlicher Dreipunktregler, bei dem beide Ausgänge von je einem Proportionalregler angesteuert werden, kann man sich vereinfacht aus der Zusammenschaltung zweier untereinander verkoppelter stetigähnlicher Regler aufgebaut denken. Hier entfällt die Schaltdifferenz, ein Kontaktabstand kann aber ebenfalls eingestellt werden.

Abbildung 60 zeigt die Kennlinie eines stetigähnlichen Dreipunktreglers, der zur Ansteuerung eines Klimaschrankes verwandt wird.

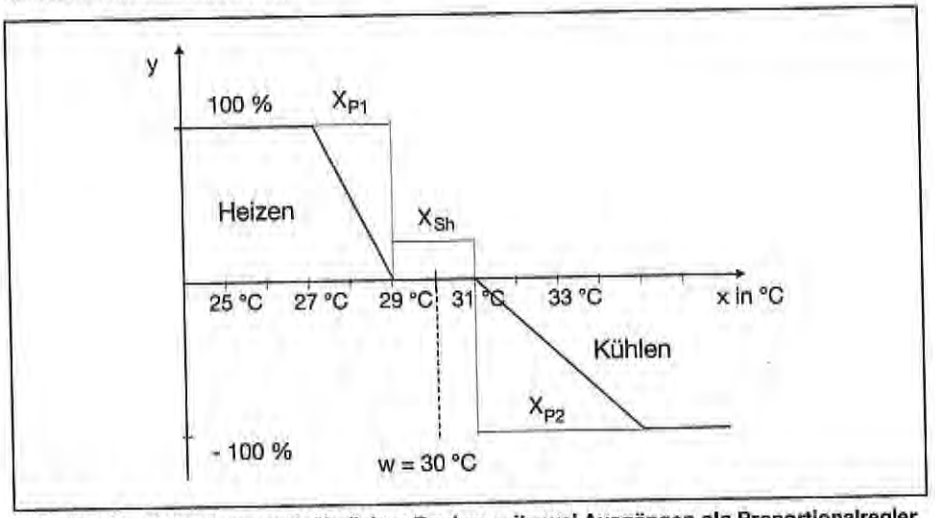


Abb. 60: Kennlinie eines stetigähnlichen Reglers mit zwei Ausgängen als Proportionalregler

Wie in Abbildung 60 dargestellt, lassen sich bei dem Stetigähnlichen Regler mit zwei Ausgängen X_{P1} und X_{P2} getrennt einstellen. Dies ist erforderlich, da die Streckenverstärkung im allgemeinen für die zwei Stellgrößen unterschiedlich ist, da beispielsweise ein Heizregister wesentlich anders in den Prozess eingreift wie die Kühlung (z. B. über einen Lüfter).

Im folgenden soll die Arbeitsweise dieses Reglers beschrieben werden: Der Istwert in der Klimakammer sei 26°C. Nun wird die Regelung eingeschaltet:

Heizen: Das Heizrelais zieht an und die Heizung heizt mit 100% Stellgrad, woraufhin der Istwert größer wird. Der Stellgrad der Heizung wird ab einem Istwert von 27°C (Erreichen des Proportionalbandes) kontinuierlich kleiner, das Relais für die Heizung beginnt zu takten und die Einschaltzeiten werden immer kürzer. Die Regeldifferenz und somit der Stellgrad werden solange kleiner, bis sich ein Stellgrad ergibt, der ausreicht, den Istwert aufrechtzuerhalten. Der Istwert befindet sich nun unterhalb des Kontaktabstandes, wir erhalten einen positiven Stellgrad (Beispielsweise 28,5°C und 25% Stellgrad).

Kühlen: Nun kommt es zu einer höheren Umgebungstemperatur (Störung), wodurch der Innenraum der Klimakammer erhitzt wird. Der Istwert steigt - ab dem Einfahren in das Totband (29°C) ist der Stellgrad 0%, es wird weder geheizt noch gekühlt. Erst ab einer Temperatur von 31°C beginnt das Relais für die Kühlung zu takten (der Stellgrad wird negativ). Die Regeldifferenz wird ebenfalls so groß, dass der sich aufbauende Stellgrad ausreicht um den entstehenden Istwert aufrechtzuerhalten.

5.5.3 Stetigähnlicher Regler mit zwei Ausgängen und Dynamik

Bei einem Stetigähnlichen Regler mit zwei Ausgängen und Dynamik kann man für die zwei Stellgrößen zusätzlich je ein T_n und ein T_v einstellen. Bei diesem Regler wirken nur außerhalb des Totbandes alle drei Regleranteile (P, I und D). Gelangt ein Prozess innerhalb des Totbandes, ist kein Proportionalanteil wirksam. Im Totband wirken nur die Anteile I und D, die Regelgröße kann somit prinzipiell exakt ausgeregelt werden.

Da im Totband kein P-Anteil vorhanden ist, wirkt sich ein großes Totband schlecht auf die Regeldynamik aus, der Regler ist im Totband langsam. Die Größe des Totbandes sollte nur so groß als nötig gewählt werden, jedoch: Weder beim Anfahren an den Sollwert (mögliches Überschwingen der Regelgröße über den Sollwert) noch beim Ausregeln auf den Sollwert (Schwankungen der Regelgröße um den Sollwert) soll ein ungewolltes Umschalten zwischen den Stellgrößen erfolgen.

Ein zu klein eingestelltes Totband kann in einer Anlage sinnlos Energie vernichten

Tabelle 10 zeigt die Einstellparameter eines Stetigähnlicher Regler mit zwei Ausgängen und Dynamik:

	eingestellt	wirksam						
Unstetig			$X_{P1} = 0$ $X_{P2} = 0$	–	–	–	X_{Sh}	X_{d1}; X_{d2}
stetigähnlich	P	PD	X_{P1}; X_{P2}	–	–	C_{y1}; C_{y2}	X_{Sh}	–
	PI	PID	X_{P1}; X_{P2}	T_{n1}; T_{n2}	–	C_{y1}; C_{y2}	X_{Sh}	–
	PID	PD/PID	X_{P1}; X_{P2}	T_{n1}; T_{n2}	T_{v1}; T_{v2}	C_{y1}; C_{y2}	X_{Sh}	–
	PD	PDD	X_{P1}; X_{P2}	–	T_{v1}; T_{v2}	C_{y1}; C_{y2}	X_{Sh}	–
	I	PI	–	T_{n1}; T_{n2}	–	C_{y1}; C_{y2}	X_{Sh}	–

Tabelle 10: Einstellparameter eines Stetigähnlichen Reglers mit zwei Ausgängen und Dynamik

5.5.4 Bemerkung zu Reglern mit zwei Ausgängen

Wir haben in dem Kapitel 5.5 Regler kennengelernt, die eine Regelgröße durch Ihre beiden Ausgänge in zwei Richtungen beeinflussen können. Die beschriebenen Regler hatten immer zwei Ausgänge der gleichen Art (unstetig oder stetigähnlich). In der Praxis können diese Ausgänge auch unterschiedlich ausfallen . Es könnte beispielsweise sein, dass ein Regler zum Kühlen einen unstetigen und für das Heizen einen stetigähnlichen Ausgang bereitstellen muss. Ein solcher Regler würde sich in keines der Kapitel 5.5.1, 5.5.2 oder 5.5.3 einordnen lassen.

Um die Vielfalt der Bezeichnungen einzuschränken, werden in der Praxis alle Regler mit zwei Ausgängen, die eine Regelgröße in zwei Richtungen beeinflussen können...

. . . Dreipunktregler

genannt, gleich ob die Ausgänge unstetig, stetigähnlich oder stetig(!) sind. Als Beispiel soll ein Regler erwähnt werden, der einen Thyristor-Leistungssteller und ein Kühlaggregat betreibt und somit eine Temperatur in einer Klimakammer auf einem konstanten Wert hält. Auch diese beiden Aggregate benötigen zwei Ausgänge eines Reglers. Der Regler muss aber zum Heizen einen stetigen und zum Kühlen einen schaltenden Ausgang bereitstellen.

5.6 Der Dreipunktschrittregler

Stellantriebe besitzen drei Schaltzustände: Öffnen, Halt, Schließen.

Hier haben besonders elektrische Antriebe große Verbreitung gefunden, bei denen ein für Rechts- und Linkslauf ansteuerbarer Motor über ein Schneckengetriebe auf ein Ventil eine Drosselklappe, ein Stelltransformator oder dergleichen wirkt. Als Motoren finden Gleichstrom- und Drehstrommotoren, bei kleineren Stellantrieben auch Einphasen-Motoren, Anwendung, die über Schütze oder Relais geschaltet werden (siehe auch Abschnitt 1.7).

Eine Besonderheit unterscheidet diese Stellantriebe jedoch von den vorhergenannten Anwendungsfällen für Regler: Anders als bei einem Ofen, wo das Einschalten der Heizung sofort auch ein Heizen mit voller Leistung und das Abschalten einen sofortigen Stop bedeutet, brauchen Stellantriebe eine gewisse Zeit bis die maximale Stellgröße (Ventilöffnung etc.) erreicht wird. Außerdem verbleibt ein elektrischer Stellantrieb in der erreichten Stellung, wenn der Regler kein Signal abgibt. Der Antrieb kann also beispielsweise zu 60% geöffnet bleiben, obwohl er zu diesem Zeitpunkt nicht vom Regler angesteuert wird. Diesen Eigenschaften muss der Regler Rechnung tragen.

Für derartige Stellantriebe werden Dreipunktschrittregler eingesetzt.

Der Dreipunktschrittregler besteht aus einem stetigen Regler (P oder PD) und einem Schaltglied. Betrachtet man die Ventilstellung als Stellgrad, zeigt die Einheit Dreipunktschrittregler-Stellventil PI- oder PID-Verhalten.

Zum Verständnis der Funktion des Dreipunktschrittregler schauen wir uns Abbildung 61 an:

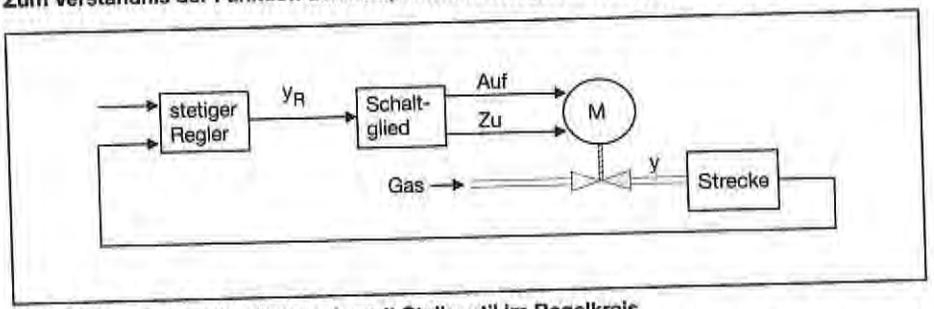


Abb. 61: Der Dreipunktschrittregler mit Stellventil im Regelkreis

Der gezeigte Dreipunktschrittregler regelt mit dem Stellventil über den Gasfluss die Temperatur in einem Ofen. Das Schaltglied stellt zwei Relaisausgänge zur Verfügung, die über einen Motor ein Ventil im Bereich von 0 ... 100% auf- und zufahren.

Man muss sich den Regler, das Schaltglied und das Stellventil als Einheit denken: Den Dreipunktschrittregler (hier ist der Stetige Regler und das Schaltglied gemeint) kann man auf PI oder PID-Verhalten konfigurieren. Tritt nun eine Regeldifferenz auf, zeigt das Ventil das entsprechende PI oder PID Verhalten. Stellt man also am Regler beispielsweise PI-Verhalten ein, so hat die Einheit Dreipunktschrittregler-Stellventil (mit der Ventilöffnung als Stellgrad) PI-Verhalten.

Beispiel: Der Dreipunktschrittregler aus Abbildung 61 wurde als PI-Regler konfiguriert. Das X_P wurde auf 25K, das T_n auf 120s eingestellt. Das angeschlossene Stellventil hat eine Stellgliedlaufzeit T_T (Zeit, die das Stellglied benötigt, um von 0 ... 100% oder 100 ... 0% Stellgrad zu fahren) von 60s. In Abbildung 63 ist die Sprungantwort des Systems gezeigt:

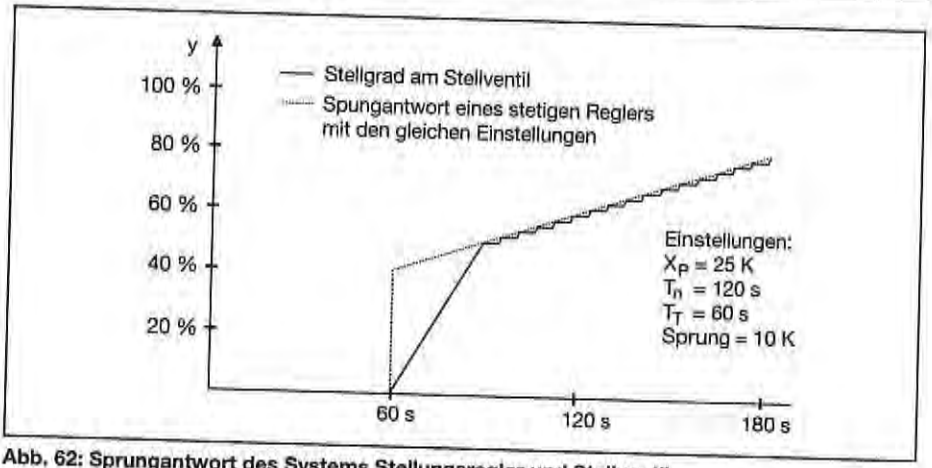


Abb. 62: Sprungantwort des Systems Stellungsregler und Stellventil

In Abbildung 62 ist zum einen die Sprungantwort eines PI-Reglers mit den Parametern X_P = 25K und T_n = 120s gezeigt. Der Sprung der Regeldifferenz wird bei t = 60s vorgenommen und beträgt 10K. Am Dreipunktschrittregler wurde X_P = 25K, T_n = 120s und die Stellgliedlaufzeit T_T = 60s eingestellt. Durch Ansteuern mit dem Ausgang „Auf" des Stellungsreglers wird nun das PI- Verhalten der Einheit Stellungsregler-Stellventil realisiert. Die Öffnung des Ventils folgt natürlich nur verzögert dem Stellgrad eines vergleichbaren PI-Reglers, da es eine Stellgliedlaufzeit von 60s hat.

Der Dreipunktschrittregler erhält keine Rückmeldung über die tatsächliche Position des Ventils. Er geht davon aus, das sich das Ventil mit genau gleichbleibender Geschwindigkeit öffnet und schließt. So rechnet der Dreipunktschrittregler die Zeit aus, die der Kontakt „Auf" geschlossen sein muss, bis die Ventilstellung theoretisch dem Stellgrad des entsprechenden PI-Reglers entspricht. Damit dies funktioniert, muss der Dreipunktschrittregler Kenntnis von der Stellgliedlaufzeit erhalten.

Auch beim Dreipunktschrittregler wird ein Kontaktabstand eingestellt, der symmetrisch um den Sollwert liegt. Innerhalb des Kontaktabstandes erfolgt keine Ansteuerung des Stellgliedes, dass heißt, gelangt der Istwert innerhalb des Kontaktabstandes, bleibt das Ventil in seiner alten Position.

Beim Dreipunktschrittregler kann eine Mindestimpulsdauer T_{Mmin} berücksichtigt werden. Dies kann durch gewisse Mindesteinschaltzeiten von Stellantrieben (z. B. Getriebespiel) erforderlich sein, sie ist bei einem Mikroprozessor-Regler jedoch mindestens die Abtastzeit bzw. Zykluszeit des Reglers. Bei manchen Regelgeräten lässt sich diese Mindestimpulsdauer T_{Mmin} direkt einstellen.

Die Mindestimpulslänge hat jedoch einen direkten Einfluss auf die Positioniergenauigkeit des Stellgliedes und damit auf die zu erwartende Regelgenauigkeit.

Für lineare Regelstrecken gilt allgemein folgender Zusammenhang:

$$\Delta x = X_{Max} \bullet \frac{T_{Mmin}}{T_T}$$

Δx : Regelgenauigkeit
X_{Max} : maximaler Istwert
T_{Mmin} : Mindestimpulslänge
T_T : Stellzeit

Es ist wichtig, den Kontaktabstand X_{Sh} bei einem Dreipunktschrittregler nicht kleiner einzustellen als die Regelgenauigkeit Δx berechnet aus der Mindestimpulslänge. Wird der Kontaktabstand kleiner diesem Wert gewählt, so sind Dauerschwingungen der Regelgröße durch fortlaufendes Umschalten des Stellgliedes von Rechts- auf Linkslauf die Folge, die das Stellglied übermäßig beanspruchen.

Ist der Kontaktabstand richtig gewählt, wird die tatsächlich erreichte Regelabweichung günstiger wie der eingegebene Kontaktabstand sein. Dies liegt daran, dass der letzte Impuls das Stellglied in den Bereich des Kontaktabstandes hineinfährt und dadurch die Regelabweichung verringert.

Wegen der gleichen Eigenschaften des Stellantriebes für Rechts- und Linkslauf, wird im Gegensatz zum Dreipunktregler hier jeweils nur ein Wert für X_P T_n und T_v eingestellt. Wir erhalten somit folgende Einstellparameter:

Verhalten	PI	PID
	X_P	X_P
	T_n	T_n
	-	T_v
	T_T	T_T
	X_{Sh}	X_{Sh}

Tabelle 11: Einstellparameter beim Dreipunktschrittregler

5.7 Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler für Motorstellglieder

Besser zum Ansteuern von Motorstellglieder geeignet als ein Dreipunktschrittregler, ist ein „Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler" kurz Stellungsregler. Er stellt eine Art Kaskadenstruktur (Kapitel 6.6), bestehend aus einem stetigen Regler und einem unterlagerten Stellungsregler, dar (Abbildung 63).

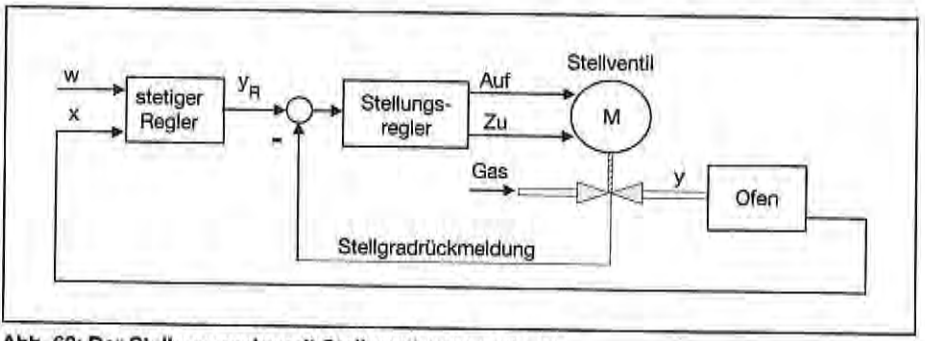


Abb. 63: Der Stellungsregler mit Stellventil im Regelkreis

Der stetige Regler gibt aufgrund des Regeldifferenzverlaufes und seiner eingestellten Parameter den Stellgrad aus (Abbildung 63). Für den stetigen Regler können die bekannten Reglerstrukturen P, PI, I, PD, PID eingestellt werden. Nun ist die Aufgabe des Stellungsreglers, diese Stellgröße am Stellventil auszuregeln. Der Stellungsregler steuert das Stellglied über zwei schaltende Ausgänge an, er erhält eine Stellgradrückmeldung vom Stellglied (meist ein Einheitssignal 0/4 ... 20mA, 0/2 ... 10V etc.), die ihm die Position des Stellgliedes zurückmeldet.

Beispiel: Der stetige Regler ermittelt aus dem Regeldifferenzverlauf einen Stellgrad von 20%. Der Stellungsregler regelt nun das Ventil auf 20% Öffnung. Das Ventil liefert eine Stellgradrückmeldung: 0 ... 10V entsprechen 0 ... 100% Öffnung des Ventils. Hat der Stellungsregler das Ventil auf 20% Öffnung ausgeregelt, beträgt die Stellgradrückmeldung 2V.

Auch beim Stellungsregler muss eine Stellgliedlaufzeit eingegeben werden, aus dieser bildet der Stellungsregler seine optimalen Regelparameter.

Sollte ein Motor mit größerem Nachlauf (schlechter Bremswirkung) betrieben werden, so kann durch Vergrößern des Kontaktabstandes (X_{Sh}) ein Rucken des Stellmotores vermieden werden.

Die Vorteile des Stellungsreglers im Vergleich zum Dreipunktschrittregler:
Im Gegensatz zum Dreipunktschrittregler bietet der Stellungsregler den Vorteil einer unterlagerten Reglerstruktur. Beim Auftreten einer Regelabweichung sorgt der Stellungsregler dafür, dass der Motor gezielt auf eine neue Position verfahren wird. Dies ist durch den Vergleich der Stellgliedposition mit der Stellgröße (y_R) des stetigen Reglers möglich.

Ein Dreipunktschrittregler erhält keine Stellgradrückmeldung und muss immer von einem linearen Verhalten des Stellgliedes ausgehen. Wenn ein Stellglied Nichtlinearitäten aufweist oder ein Spiel in der Mechanik des Stellgliedes vorhanden ist, funktioniert dies nur ungenau.

Ein Stellungsregler bietet für das entsprechende Verhalten die folgenden Einstellparameter:

Verhalten	PD	PDD	PI	PID	PD/PID
	X_P	X_P	-	X_P	X_P
	-	-	T_n	T_n	T_n
	-	T_v	-	-	T_v
	T_T	T_T	T_T	T_T	T_T
	X_{Sh}	X_{Sh}	X_{Sh}	X_{Sh}	X_{Sh}

Tabelle 12: Einstellparameter beim Stellungsregler

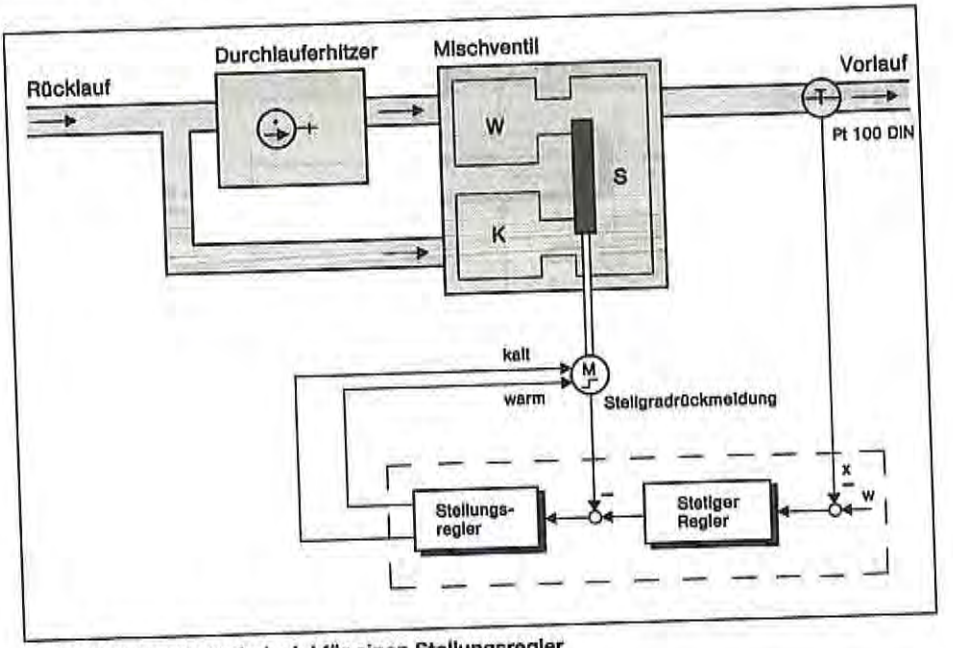


Abb. 64: Anwendungsbeispiel für einen Stellungsregler

Beispiel:
Mit Hilfe des beschriebenen Reglers soll die Vorlauftemperatur einer Heizungsanlage geregelt werden. Das Herzstück bildet ein Mischventil, dessen Kammern „K" und „W" für kaltes und warmes Wasser über eine Rohrleitung mit dem Wasserrücklauf verbunden sind. Zur Beeinflussung der mit dem Pt 100 gemessenen Mischtemperatur, wird die Position des Schiebers „S" durch einen Stellmotor verstellt. Eingangsgröße des Stellmotors sind die Schaltimpulse zum Auf- bzw. Zufahren der Ausströmöffnung.

5 Schaltende Regler

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen

Bisher wurden ausschließlich einschleifige Regelkreise, d. h. lediglich Regler und Strecke in einem kreisförmigen in sich geschlossenen Signalumlauf, betrachtet. Mit solchen einschleifigen Regelkreisen stößt man jedoch in manchen regelungstechnischen Prozessen an Grenzen, was die Regelgüte betrifft. Sogenannte mehrschleifige Regelkreise oder das Auf- und Zuschalten von Hilfsgrößen machen es möglich, die dem einschleifigen Regelkreisen im Bezug auf die Regelgüte gesetzten Grenzen zu überschreiten. Man kann mit recht einfachen Lösungen zum Teil ganz beträchtliche Verbesserungen der Regelgüte ermöglichen.

6.1 Grundlast

Bei einer Grundlastvorgabe wird nur ein Teil der gesamten Stellgröße vom Regler beeinflußt, während ein konstanter Teil kontinuierlich der Strecke zugeführt wird (Kombination von Regelung und Steuerung). Bei einem elektrobeheizten Ofen wäre das dann der Fall, wenn ein Teil der Heizwiderstände vom Regler angesteuert wird, während ein anderer Teil z. B. direkt an der Versorgungsspannung liegt (Abbildung 65).

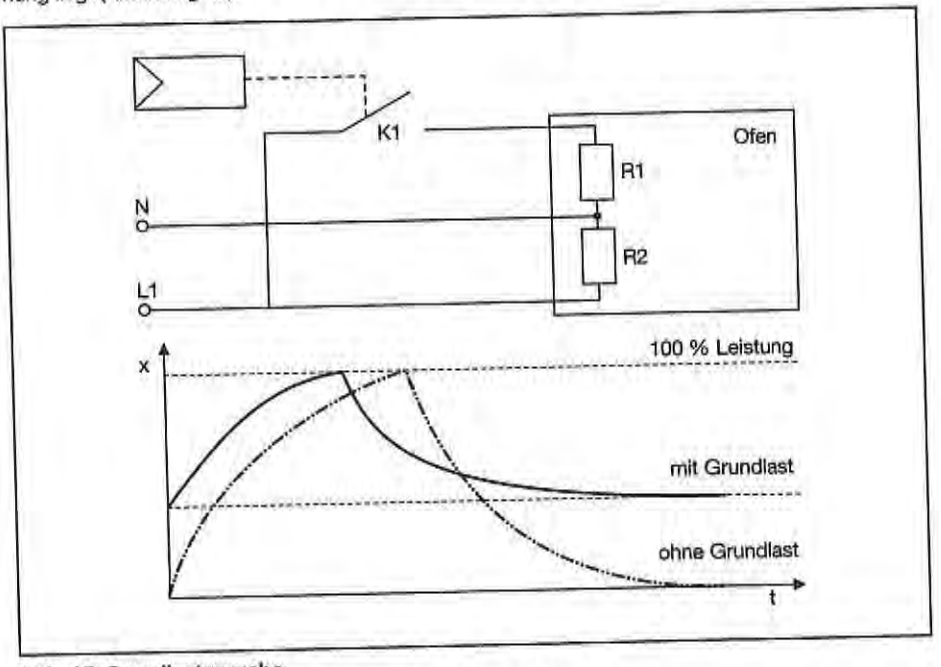


Abb. 65: Grundlastvorgabe

Die Grundlastvorgabe bietet im wesentlichen folgende Vorteile:

- Das Stellglied, z. B. ein Thyristorsteller, braucht nur eine geringe Leistung zu steuern, kann daher kleiner dimensioniert werden und ist preiswerter.
- Die wechselnde Netzbelastung, bei impulsweiser Leistungsaufnahme durch schaltende Regler, fällt ebenfalls geringer aus.
- Beim Ausfall der Regeleinheit kann der Prozeß mit dem Anteil der Grundlast von der Gesamtleistung weiter betrieben werden.

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen

Den hier gezeigten Vorteilen stehen jedoch auch eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

- Die Regeldynamik, gerade im Hinblick auf Störgrößen, verschlechtert sich. Da dem Regler nicht mehr die volle Stellgröße zur Verfügung steht, ist z. B. die Abkühlkurve nicht nur um die Grundlastvorgabe verschoben, sondern verläuft auch deutlich flacher (Abbildung 65). Sollte der Leistungsbedarf aus irgendeinem Grund plötzlich kleiner als die Grundlastvorgabe werden, so steht dem der Regler machtlos gegenüber, da er die Stellgröße nicht unter den Wert der Grundlast herunterdrücken kann.
- Ferner ist die Grundlastvorgabe ebenfalls auf die Führungsgröße abzustimmen. Bei geänderter Führungsgröße, z. B. nach unten, könnte plötzlich die Überschußleistung zu groß sein, bei einer Änderung nach oben zu klein. Dann müßte die Grundlast in solchen Fällen gleichzeitig mit der Führungsgröße verändert werden.

6.2 Leistungsumschaltung

Wird ein Prozess mit unterschiedlichen Führungsgrößen bzw. Arbeitspunkten betrieben, so ist eine Leistungsumschaltung günstiger als z. B. eine Grundlastvorgabe. Bei einem elektrobeheizten Ofen kann man dies dadurch erzielen, indem man einen Teil der Heizwiderstände über einen Grenzwertschalter (Limitkomparator als Vorkontakt) zuschaltet, um den Ofenbetrieb bei voller Leistung im oberen Temperaturbereich zu ermöglichen (Abbildung 66).

Es ergeben sich hiermit folgende Vorteile:

- Es ist möglich, den Prozess jeweils im oberen Drittel der jeweiligen gültigen Kennlinie zu betreiben (Abbildung 66). Der Leistungsüberschuss bei kleinen Werten der Regelgröße lässt sich hierdurch minimieren.
- Gegenüber der Grundlastvorgabe ist hier die Regeldynamik etwas besser, da die Steuerleistung hier auf null zurückgenommen werden kann (nach Unterschreiten des Umschaltpunktes).

Ein Nachteil bei dieser Schaltung könnte sich dann ergeben, wenn man eine Führungsgröße in Nähe des Umschaltpunktes betreibt, da hier der Prozeß zwei verschiedene Streckenverstärkungen besitzt.

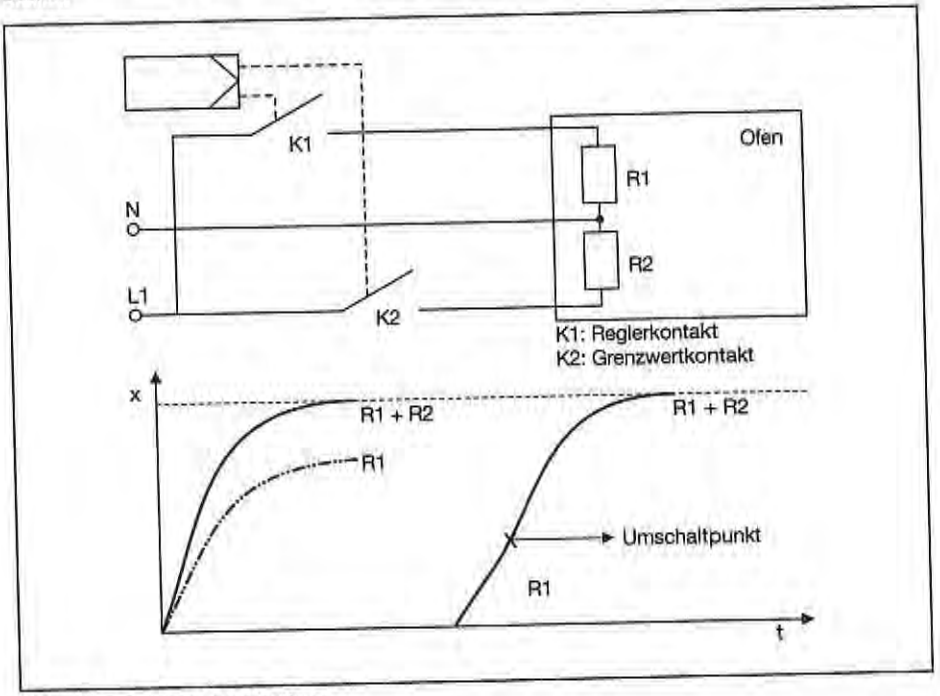


Abb. 66: Leistungsumschaltung

6.3 Störgrößenaufschaltung

Oftmals kann die Wirkung einer Störung in gewissen Grenzen vorausgesagt werden. Beispielsweise das Öffnen einer Ofentür, das zu einer Temperaturabsenkung von 30K führt. Statt nun erst die Regelstrecke auf diese Störung reagieren zu lassen und sie dann vom Regler auszuregeln, kann auch direkt auf die Störung reagiert werden. An der Ofentür wird hierzu ein Schalter angebracht, welcher bei der Öffnung die Stellgröße (z. B. Heizleistung) um einige Prozent erhöht.

Dieses Prinzip ist als Störgrößenaufschaltung bekannt. Es ist dort nützlich, wo Ursache und Wirkung einer Störung bekannt sind und diese häufig und reproduzierbar auftritt. Durch die schnelle Reaktion ohne das Zeitverhalten des Reglers und der Strecke kann die Störung schnell ausgeglichen werden.

Es sollen nun im folgenden drei verschiedene Möglichkeiten der Störgrößenaufschaltung vorgestellt werden:

Konstanthalten der Störgröße
Der Einfluß der Störgröße auf die Regelgröße wird dadurch beseitigt, daß die Störgröße durch einen getrennten Hilfsregelkreis konstant gehalten wird (Abbildung 67 a). Die Störgrößenkonstanthaltung ist da anzuwenden, wo eben diese Störgrößen messtechnisch erfasst und konstant gehalten werden können.

Ein Beispiel ist die Temperaturregelstrecke eines gasbeheizten Glühofens. Hier kann man die Hauptstörgröße, gleich Gasdruck, durch einen vorgeschalteten Druckregler konstant halten, der gleichzeitig auch als Druckminderer vom hohen Netzdruck auf den kleineren Brenndruck dienen kann. Das Schema dieses Verfahrens lässt sich auf unser kleines Beispiel übertragen:
Der Regler hat die Aufgabe, durch Ausgabe des Stellgrades y die Regelgröße x der Regelstrecke (die Temperatur des Glühofens) auf den Sollwert w zu bringen. Ohne Konstanthalten der Störgröße z (der Gasdruck) müsste der Regler bei Gasdruckschwankungen immer wieder seinen Stellgrad verändern, um den gleichen Sollwert anzufahren. Der Hilfsregler (der Druckregler) hält nun den Gasdruck konstant, somit beeinflusst diese Störgröße den Glühofen nicht mehr.

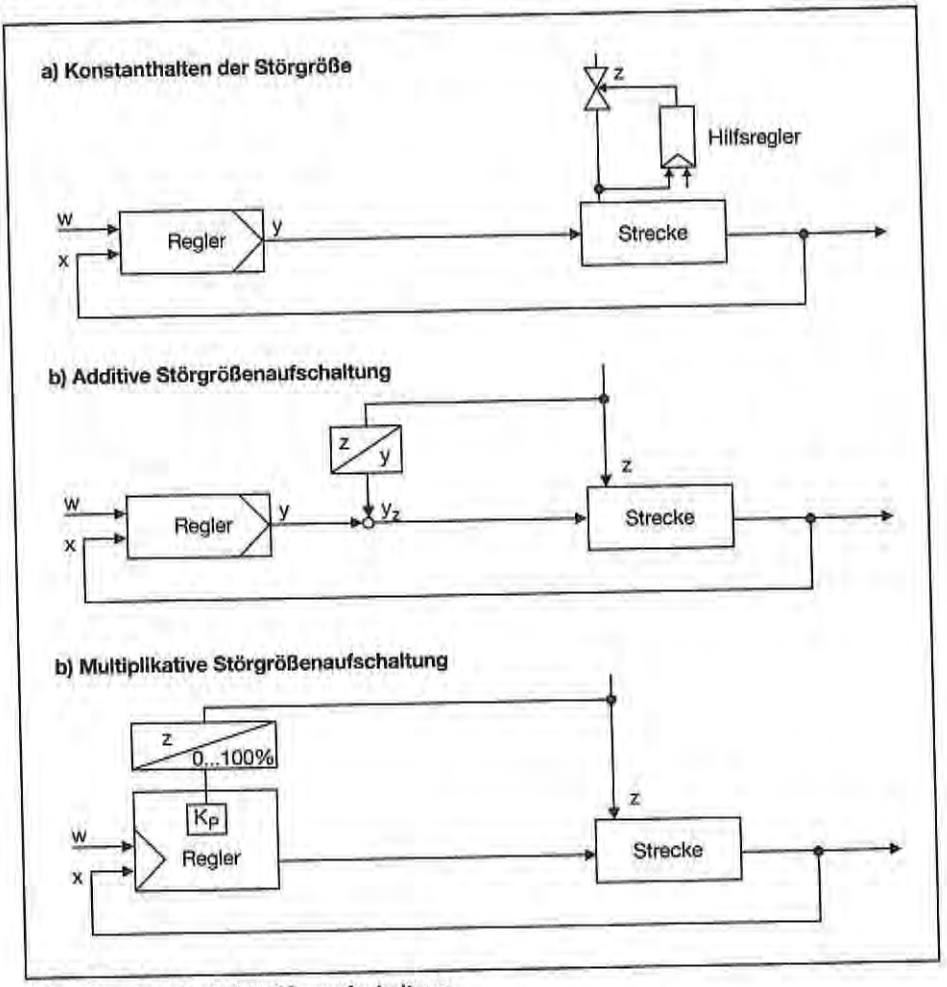


Abb. 67: Arten der Störgrößenaufschaltung

Additive/Multiplikative Störgrößenaufschaltung
Bei beiden Verfahren wird bei einer Änderung von Störgrößen die Stellgröße y des Reglers manipuliert, um der Störgröße entgegenzuwirken (Abbildung 67 b, c).

Bei der **additiven Störgrößenaufschaltung** (Abbildung 67 b) wird der Stellgrad (y) um einen der Störgröße proportionalen Betrag erhöht. Das heißt, diese Art der Störgrößenaufschaltung berücksichtigt Offsetverschiebungen in der Strecke. Regelgeräte (Kompaktregler), bei denen eine solche Störgrößenaufschaltung realisierbar ist, stellen meist einen Eingang für die Aufschaltung zur Verfügung. Man gibt ein zur Störgröße proportionales Signal auf den Eingang eines Reglers, welches die Stellgröße entsprechend der Vorgabe beeinflußt. Als Beispiel hierfür dient unser o. g. Beispiel mit der geöffneten Ofentür. Mit dem Öffnen der Ofentür wird die Stellgröße um einen festen Betrag erhöht.

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen

Die **multiplikative Störgrößenaufschaltung** nimmt Einfluss auf die Reglerverstärkung K_P Verändert die erfasste Störgröße ihren Wert, so wird das am Regler eingestellte K_P in gleichem Verhältnis im Bereich von 0 ... 100 % verändert (Abbildung 67 c). Anwendung findet dieses Verfahren, wenn in einem Prozess der Stellgrad des Reglers in gleichem Maße wie eine auftretende Störgröße verändert werden muss.

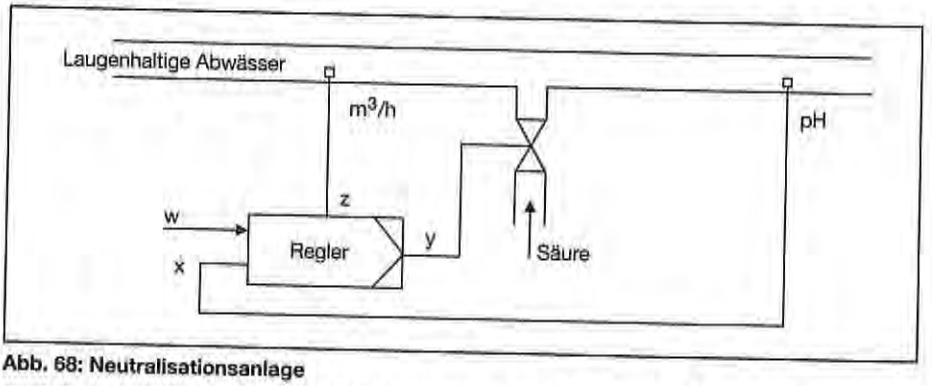


Abb. 68: Neutralisationsanlage

Als Beispiel sei eine Neutralisationsanlage (Abbildung 68) aufgeführt, in der laugenhaltige Abwässer mit Säure neutralisiert werden. Die Regelgröße ist der pH-Wert, der sich im neutralen Bereich befinden soll. Der Regler nimmt Einfluss auf den pH-Wert, in dem er den Zufluss der Säure verändert (y). Betrachten wir die Funktionsweise vorerst ohne multiplikative Störgrößenaufschaltung: Der Regler hat bei einer definierten Durchflussmenge ausgeregelt mit beispielsweise 30 % Stellgrad. Nun verändert sich die Störgröße Durchfluss, die Abwassermenge pro Zeit ist nun doppelt so groß. Der pH-Wert wird sich nun vergrößern und der Regler wird seinen Stellgrad erhöhen, bis die Regelgröße wieder den Sollwert erreicht hat. Dies wird bei 60 % Stellgrad (die doppelte Säuremenge) der Fall sein. Wir sehen, dass sich der Stellgrad für eine gleichbleibende Regelgröße bei sonst gleichen Bedingungen proportional zur Störgröße verhalten muss. Um dies zu erreichen, kann man die Störgröße Durchfluss erfassen und multiplikativ aufschalten. Man skaliert im Regler diese Störgröße von 0 bis zum maximal auftretenden Wert der Störgröße, der Regler verändert nun sein eingestelltes Proportionalverhalten in gleichem Maß von 0 ... 100 %.

Schauen wir nun wieder auf unser Beispiel:
Der Regler hat auch hier wieder ausgeregelt mit beispielsweise 30 % Stellgrad. Nun verändert sich die Störgröße Durchfluss auf den doppelten Wert. Durch die multiplikative Störgrößenaufschaltung wird nun die Proportionalverstärkung (das entspricht der Gesamtverstärkung, siehe auch Abbildung 41) ebenfalls auf den doppelten Wert gesetzt, somit beträgt der neue Stellgrad des Reglers sofort 60 % und es gibt keine größeren Regelabweichungen.

Die hier aufgezeigten Beispiele für eine Störgrößenaufschaltung gelten für unstetige Regler mit Zweipunktverhalten bzw. stetige Regler. Bei Dreipunkt-, Dreipunktschrittreglern und Stellungsreglern sind die Zusammenhänge etwas komplexer, auf die hier nicht eingegangen werden soll.

6.4 Hilfsregelgrößenaufschaltung

Kann z. B. eine Störgröße nicht erfasst oder lokalisiert werden, so gibt es die Möglichkeit, eine Hilfsregelgröße X_H mit kleinerer zeitlicher Verzögerung als die Regelgröße x der Regelstrecke zu entnehmen und entsprechend umgeformt auf den Reglereingang zu schalten (Abbildung 69). Dadurch werden die Störungen am Eingang der Regelstrecke (z. B. Versorgungsstörungen) dem Regler schnell gemeldet.

Um im ausgeregelten Zustand die Regelgröße jedoch nicht zu verfälschen, wird die Aufschaltung von X_H meist zeitlich nachgebend ausgeführt. Bei dieser Schaltung sind 2 Regelkreise, jeder mit einem vollständigen Signalumlauf, miteinander verkoppelt. Man muß hierbei beachten, daß evtl. bei zu starker Aufschaltung der Hilfsregelgröße und ungünstiger Reglereinstellung der Regelkreis instabil werden kann.

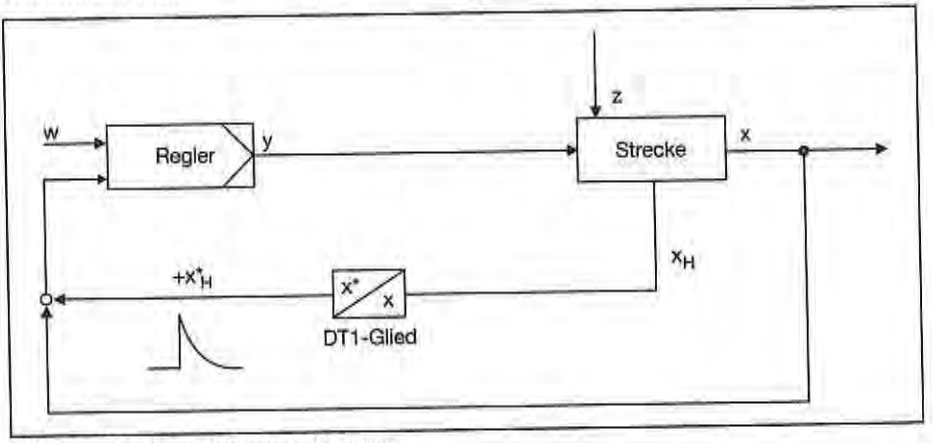


Abb. 69: Hilfsregelgrößenaufschaltung

6.5 Grob-/Fein-Regelung

Zwei in Reihe geschaltete Regelkreise halten eine bestimmte Eigenschaft eines Massen- oder Energiestromes konstant. Die vom ersten Regler, dem Grobregler (R1), zurückgelassene Regelabweichung wird vom zweiten, Feinregler (R2), ausgeregelt (Abbildung 70).

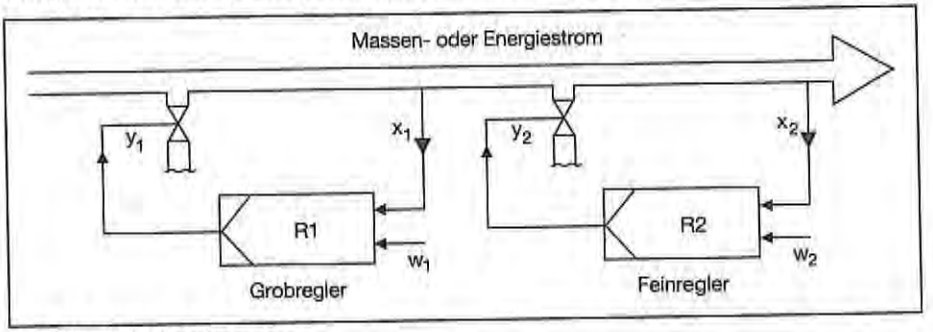


Abb. 70: Grob-/Fein-Regelung

Als Beispiel könnte hier wiederum eine pH-Regelanlage zur Neutralisation industrieller Abwässer dienen. In Folge der meist vorhandenen großen Zuflussschwankungen und Schwankungen in der Zusammensetzung ist es oft angebracht, zwei Regelkreise hintereinander zu schalten, um die Schwankung des pH-Wertes innerhalb der zulässigen Toleranzen zu halten.

6.6 Kaskadenregelung

Mit einer Kaskadenregelung kann die Regelgüte erheblich erhöht werden. Dies betrifft besonders das dynamische Verhalten des Regelkreises, also den Regelgrößenverlauf bei Änderungen der Führungsgröße oder Störeinflüssen. Regelstrecken mit einem Verhältnis $T_g/T_u < 2 - 3$ lassen sich mit einer einfachen Regelung nur sehr schwer regeln, da wegen der verhältnismäßig langen Verzugszeit der Regler erst sehr spät Kenntnis davon bekommt, wie er eingreifen muß. Man versucht daher, den Regelkreis in mehrere (meist zwei) Teilkreise zu zerlegen, die einzeln geregelt werden. Da diese Teilkreise nur einen Bruchteil der Gesamtverzugszeit besitzen, ist ihre Regelung erheblich einfacher. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von mehrschleifigen oder vermaschten Regelungen.

In Abbildung 71 ist der prinzipielle Aufbau der Kaskadenregelung zu sehen.

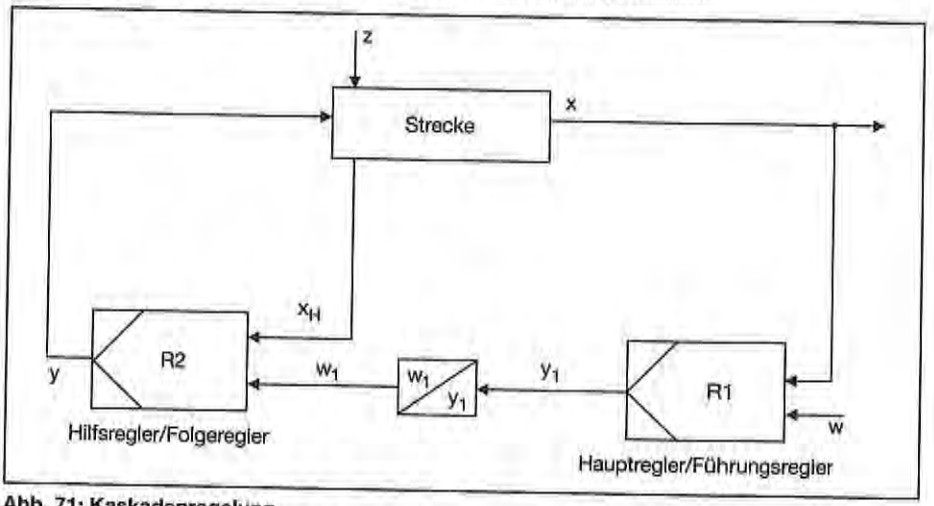


Abb. 71: Kaskadenregelung

Eine Hilfsregelgröße x_H wird in der Strecke abgegriffen und auf den Eingang eines Hilfsreglers geschaltet, dessen Ausgang die Stellgröße y steuert. Die Führungsgröße w_1 des Hilfsreglers wird von der Stellgröße des Führungsreglers so geführt, daß die Regelgröße den eingestellten Wert erreicht. Der Hilfsregelkreis, der schneller eingreifend eingestellt werden kann, beseitigt schnell alle Störungen am Eingang der Regelstrecke.

Der untergeordnete Hilfsregler kann in seiner Bauart einem normalen Regler entsprechen. Da seine Führungsgröße vom übergeordneten Regler vorgegeben wird, muß er allerdings einen Eingang für eine elektrische Sollwertvorgabe besitzen. Ansonsten muß er den Anforderungen seiner Aufgabe hinsichtlich Eingang, Ausgang etc. angepaßt sein. Da der Hilfsregler die Aufgabe hat, die Hilfsregelgröße recht zügig proportional zum Stellgrad des Führungsreglers zu verändern, wird hierfür meist ein P- oder PD-, seltener auch ein PI-Regler, eingesetzt. Als Führungsregler, auch auf Führungsverhalten ausgelegt, finden meist PI- oder PID-Regler Anwendung.

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen

Für eine Kaskadenregelung ist es wichtig, daß der untergeordnete Kreis mindestens 2-3 mal schneller wie der äußere ist, da der gesamte Regelkreis ansonsten zu Schwingungen neigt. Der Vorteil der Kaskadenregelung ist zum einen, daß sich das dynamische Verhalten des Regelkreises wesentlich verbessert. Ein weiterer Vorteil der Kaskadenregelung ist, daß die Regler wesentlich leichter einzustellen sind. Man schaltet den Führungsregler in den Handbetrieb und optimiert den Folgeregler, dann wird der Führungsregler optimiert (der Folgeregler bleibt hierzu im Automatikbetrieb).

Ein Beispiel für eine Kaskadenregelung ist eine Temperierung für einen Ofen, zu dessen Beheizung ein Gasbrenner dient (Abbildung 72).

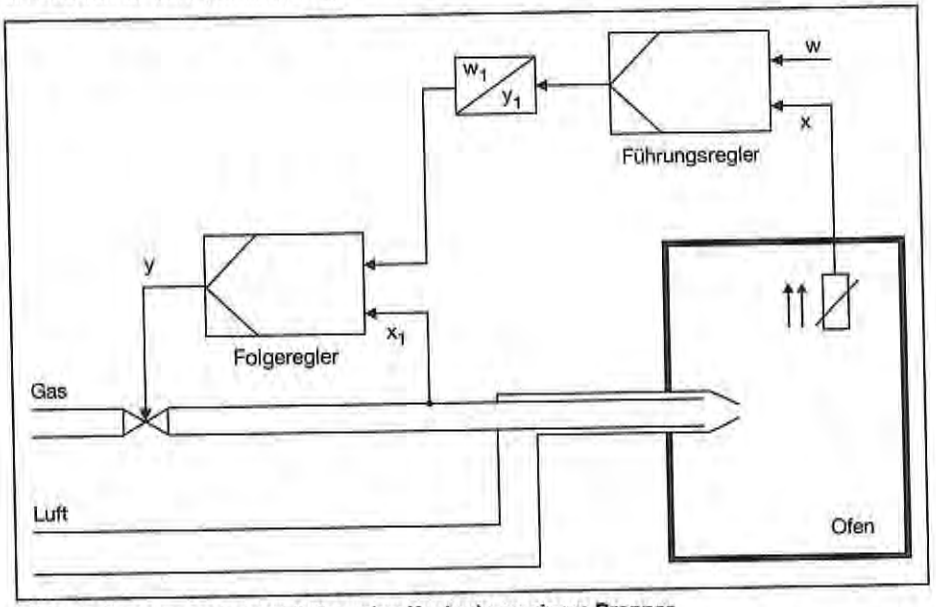


Abb. 72: Temperaturregelung über eine Kaskade an einem Brenner

Der Führungsregler gibt auf Grund der an ihm anliegenden Regeldifferenz einen Stellgrad y_1 im Bereich von 0 ... 100% aus. Diesen Stellgrad übernimmt nun der Folgeregler als Sollwert, wozu aber erst noch eine Normierung des Signals vorgenommen wird: auf Grund der Normierung beträgt der Sollwert für den Folgeregler (w_1) 0... „maximaler Gasfluss" bei 0 ... 100% Stellgrad des Führungsreglers. Der Führungsregler gibt also mit seinem Stellgrad praktisch die gewünschte Gasmenge/Zeit vor. Der Folgeregler hat nun die Aufgabe, diesen Gasstrom auszuregeln. Der Folgeregler übernimmt einen Teil der Zeitglieder und korrigiert Störungen am Anfang der Strecke, wie beispielsweise ein Schwanken des Gasdruckes. Aus diesem Grund verbessert sich das Regelverhalten und in einigen Fällen werden Strecken erst durch die Einführung einer Kaskadenregelung regelbar.

6.7 Verhältnisregelung

Verhältnisregler werden für Brennersteuerungen (Regelung des Gas-/Luftmischungsverhältnisses) in der Analysentechnik (Mischung von Reaktionspartner) und in der Verfahrenstechnik (Herstellung von Mischungen) verwendet. Diese Regler besitzen zwei Istwerteingänge. Das Verhältnis der beiden Eingangsgrößen ist die Regelgröße. Als Führungsgröße wird am Regler der geforderte Wert für das Verhältnis direkt eingestellt.

Der Verhältnisregler wird vielfach auch als Folgeregler eingesetzt. Der Regler hat hierbei die Aufgabe, zwei Stoffmengen derart zu regeln, daß ihr Verhältnis bei unterschiedlichem Bedarf an der Gesamtmenge konstant bleibt. Bei einer derartigen Folgeregelung gibt es zwei Führungsgrößen: das Mischungsverhältnis und die Gesamtmenge. Dementsprechend werden zwei Regler eingesetzt, von denen der eine die Gesamtstoffmenge/Zeit ausregelt und der andere durch die Dosierung der Komponenten das Verhältnis beeinflußt. Da die Gesamtmenge/Zeit der letztlich entscheidende Sollwert ist, wird dieser Regler als Führungsregler bezeichnet, nach dessen Anforderungen der untergeordnete Folgeregler die Substanzverhältnis regelt.

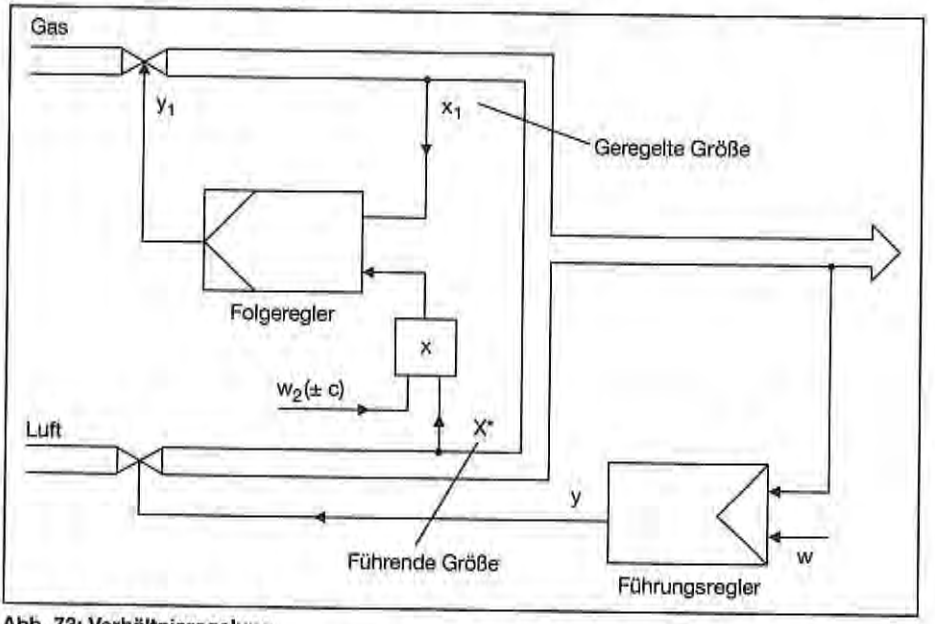


Abb. 73: Verhältnisregelung

Ein Beispiel hierzu ist eine Mischungsregelung (Abbildung 73): Zwei Medien sollen in einem festen Verhältnis miteinander gemischt werden, wobei der Bedarf an der Mischung nach produktionstechnischen Anforderungen schwankt. Hierfür sind zwei Regelungen erforderlich, zum einen die der Gesamtmenge beider Substanzen, zum anderen die Regelung des Verhältnisses. Für die Regelung der Gesamtmenge reicht die Beeinflussung einer Komponente aus, da die andere im eingestellten Verhältnis nachgeführt wird. Die Regelung des Mischungsverhältnisses erfolgt jedoch unabhängig vom Führungsregler, so daß dieser und das dazugehörige Ventil für die Luftregelung allein nicht hätte eingefügt werden müssen. Ohne diesen Führungsregler bleibt aber nur das Verhältnis konstant, während die Gesamtmenge beider Substanzen unberücksichtigt bleibt.

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen

Ein Verhältnisregler entspricht einem Standardregler, dessen Eingangsstufe der geänderten Aufgabenstellung entsprechend mit zwei Eingängen ausgerüstet ist. Hinsichtlich des Zeitverhaltens sind sämtliche Variationen wie beim Standardregler denkbar. Wegen der Natur der Prozesse, werden die Regler meist als stetige Regler oder Dreipunktschrittregler bzw. Stellungsregler mit PI- oder PID-Verhalten ausgeführt. Bei den Mikroprozessor-Regelgeräten lassen sich Funktionen wie eine Verhältnisregelung meist direkt konfigurieren.

6.8 Mehrkomponentenregelung

Bei einer Mehrkomponentenregelung wirken z. B. verschiedene prozeßabhängige Größen als Istwert für den Regler und legen somit die Regelabweichung fest. Beispielsweise bei einer Speisedampf-Regelung (Abbildung 74).

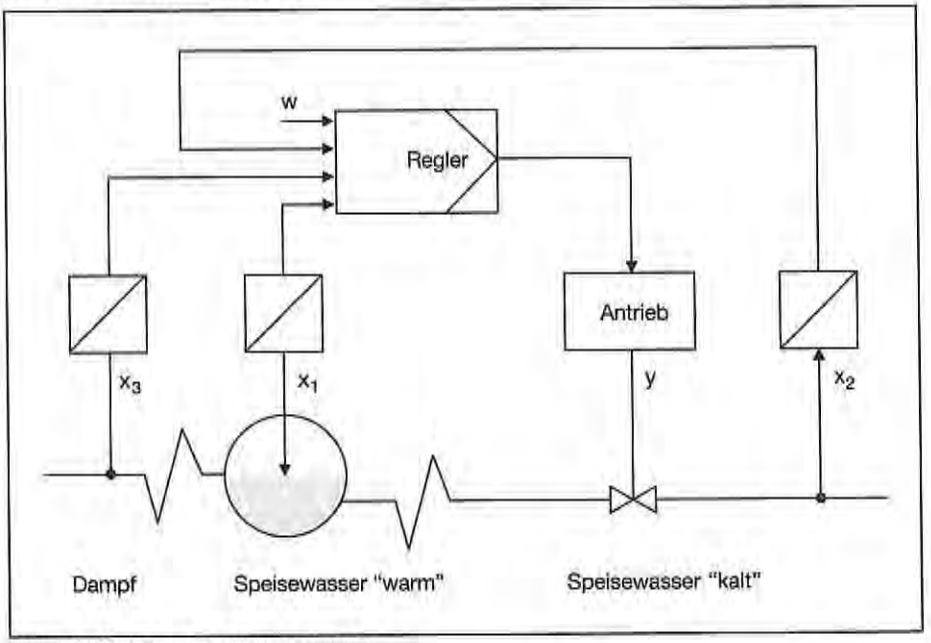


Abb. 74: Mehrkomponentenregelung

Hierbei können die einzelnen Istwerte z. B. mit verschiedenen Bewertungsfaktoren versehen werden, damit sie unterschiedlich stark auf die Regelabweichung wirken, wobei man meist die Hauptregelgröße am stärksten bewertet.

So wäre im genannten Beispiel folgender Zusammenhang denkbar:

$$x = x_1 + 2b(x_2 - (2ax_3 + c))$$

x_3 = Dampfstrom
x_2 = Speisewasserstrom
x_1 = Wasserstand

6 Bessere Regelgüte durch spezielle Reglerschaltungen

Betrachten wir nun den Zusammenhang bei o. g. Formel ohne die Konstanten, so ergibt sich:

$$x = x_1 + (x_2 - x_3)$$

Man sieht, ist der abgenommene Dampfstrom x_3 gleich dem zugeführten Kaltwasser x_2, so wird der Klammerausdruck zu 0 und der Istwert x ist nur noch x_1, dem Wasserstand, abhängig. Bei einer solchen Mehrkomponentenregelung muß der Regler eine entsprechende Anzahl von Eingängen besitzen und ggf. die Möglichkeit, die einzelnen Signale über gewisse Berechnungen miteinander zu verknüpfen. In dem genannten Beispiel handelt es sich um drei Komponenten, daher hat diese Schaltung auch den Namen "Dreikomponenten-Regelung" erhalten.

7 Sonderfunktionen von Reglern

Im Folgenden werden nun einige Zusatzfunktionen, d. h. gerätespezifische Eigenschaften von Regelgeräten vorgestellt, die für bestimmte Regelaufgaben benötigt werden. Bei den heutigen Mikroprozessor-Geräten lassen sich solche Optionen über entsprechende Software für die Geräte realisiert.

7.1 Leitgerät/Handbetrieb

Mit einem Leitgerät kann direkt auf die Stellgröße Einfluss genommen werden. Der Regelkreis ist dabei aufgetrennt, d. h. die Regelgröße ist ohne Bedeutung. Der Regler arbeitet nun als Steuergerät (Abbildung 75).

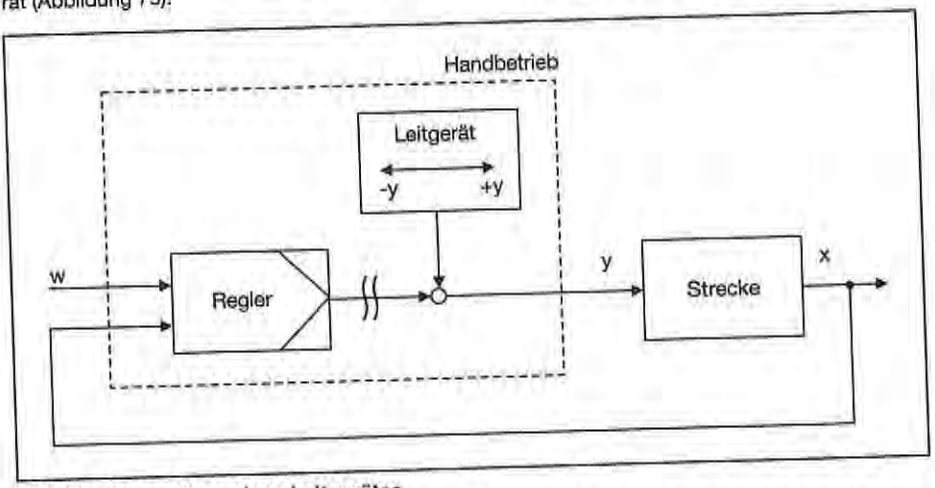


Abb. 75: Verwendung eines Leitgerätes

Dies ist dann von Nutzen, wenn Ventile oder Stellantriebe für eine Reinigung ganz auf- oder zugefahren werden sollen, was sonst nicht möglich ist. Leitgeräte sind auch für Test- und Prüfverfahren interessant, wenn die Stellgröße im Handbetrieb, d. h. ohne Regelung, betrieben werden soll. Sie können im Regler integriert oder auch als separates Gerät ausgeführt sein.

Die Funktion eines Leitgerätes findet sich heutzutage bei vielen Mikroprozessor-Reglern als sogenannter Handbetrieb. Wird ein Regler vom sogenannten Automatikbetrieb, hier versucht der Regler den Istwert auf den Sollwert auszuregeln, in den Hanbetrieb geschaltet, ist die Regelfunktion ausgeschaltet. Nun kann, durch manuelle Vorgabe des Stellgrades, das Stellglied, der Thyristorleistungssteller, die Kühlung etc. angesteuert werden. Der Hanbetrieb ist für alle Reglerarten möglich.

Der Bediener könnte nun im Handbetrieb einen Wert für das Stellglied eingeben, der von der aktuellen durch den Regler bewirkten Stellgröße stark abweicht. Eine derartige extreme Änderung kann aber auf das Stellglied zerstörend wirken. Bei der stoßfreien Hand/Automatikumschaltung wird dieser Effekt vom Leitgerät verhindert, indem die Stellgröße auf dem aktuellen Wert bleibt und dann manuell geändert werden kann.

Bei einem Fühlerbruch - man denke an einen Leitungsdefekt oder die mechanische Zerstörung des Sensors - ist keine Regelung mehr möglich und der Regler schaltet aus Sicherheitsgründen die Energiezufuhr ab. Bei einigen Prozessen ist dies gleichbedeutend mit der Zerstörung der Charge oder einem längeren Produktionsausfall, wegen langer Anheizzeiten oder dergleichen. Hier bieten Regler mit Handbetrieb den Vorteil, dass in derartigen Fällen der Prozess manuell weitergefahren und der Prozess, wenn auch mit verminderter Genauigkeit, zu Ende gebracht werden kann.

7.2 Rampenfunktion

Bei Prozessen mit empfindlichen Gütern oder zum Schonen von Heizpatronen setzt man häufig eine Rampenfunktion ein, die ein langsames Anfahren der Regelgröße an die Führungsgröße gewährt. Auch bei Regelstrecken mit großem Leistungsüberschuss ist es meist sinnvoll, die Anstiegsgeschwindigkeit der Regelgröße zu begrenzen. Bei dieser Funktion stellt der Anwender eine maximale Änderungsgeschwindigkeit (z. B. in °C pro Minute, pro Stunde etc.) ein, mit der ein Rampensollwert in Richtung der eingestellten Sollwerte läuft. Diesem Wert wird die Regelgröße kontinuierlich nachgeführt (Abbildung 76).

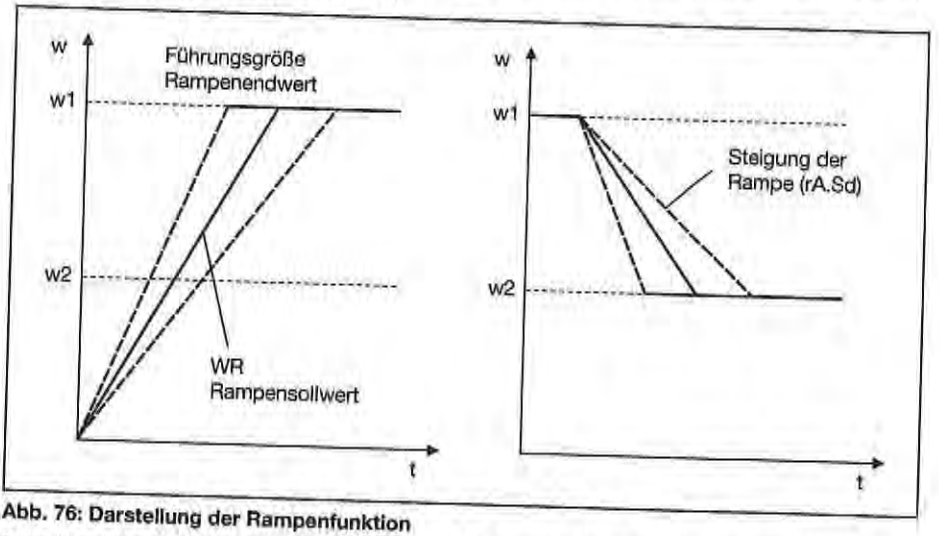


Abb. 76: Darstellung der Rampenfunktion

Beim Aktivieren der Rampenfunktion wird meist der Rampensollwert gleich dem momentanen Istwert gesetzt, der sich dann in Richtung Führungsgröße mit dem eingestellten Gradienten verändert. Beim Erreichen der Führungsgröße ist die Funktion der Rampe beendet, und das Gerät regelt auf den eingestellten Wert, so lange bis z. B. die Führungsgröße verändert wird, da dann der neue aktivierte Wert erneut durch eine Rampe angefahren wird. Somit kann eine ansteigende oder auch fallende Rampe realisiert werden.

7.3 Stellgradbegrenzung

Über eine Stellgradbegrenzung lässt sich das Reglerausgangssignal auf einen maximalen oder minimalen Wert begrenzen. Sie kann zum einen dort eingesetzt werden, wo ein überdimensioniertes Stellglied (z. B. Pumpe, Elektroheizung usw.) eingesetzt wird, um den Leistungsüberschuss und damit die verbundenen Schwierigkeiten, wie ein Überschwingen der Regelgröße, zu vermieden. Ferner kann z. B. eine minimale Stellgradbegrenzung bei der Regelung von Gasbrennern sinnvoll sein. Durch das Aktivieren eines minimalen Stellgrades (z. B. 3 %) wird vermieden, dass die Gaszufuhr unterbrochen wird und somit der Brenner verlischt. Der Regler gibt dann nur einen Stellgrad im Bereich des minimalen oder maximalen eingestellten Wertes heraus.

Bei einem stetigen Regler mit einem Ausgangssignal 0 ... 10V und einer Begrenzung von 5 ... 95 % würde dieser nur ein Signal von 0,5 ... 9,5V ausgeben.

7.4 Programmregler

Bisher wurde immer angenommen, dass die Regelgröße auf einen festen Wert der Führungsgröße konstant gehalten werden soll. Solche Regelungen werden auch als Festwertregelung bezeichnet. Daneben gibt es aber eine Reihe von Prozessen, bei denen für die Regelung die Führungsgröße keinen festen Wert, sondern eine über die Zeit veränderliche Größe darstellt, d. h., man wünscht einen bestimmten Plan für die Veränderung der Führungsgröße über die Zeit. Die für diesen Zweck eingesetzten Regler werden dann als Programmregler oder auch Zeitplanregler bezeichnet. Als Temperaturregler sind sie häufig anzutreffen, z. B. an Glühöfen für metallische Werkstoffe, an Brennöfen für keramische Massen, in der Chemie für das chargenweise Herstellen von Produkten, bei Klimakammern usw.

Die wählbare Programmzeit liegt meist im Bereich von Minuten, Stunden oder sogar auch Tagen. In Abbildung 77 ist ein solcher Zeitplan für den Verlauf der Führungsgröße aufgezeigt. Der Verlauf der Regelgröße zeigt meist, bedingt durch die Regelstrecke, nicht die scharfen Übergänge wie das Profil der Führungsgröße.

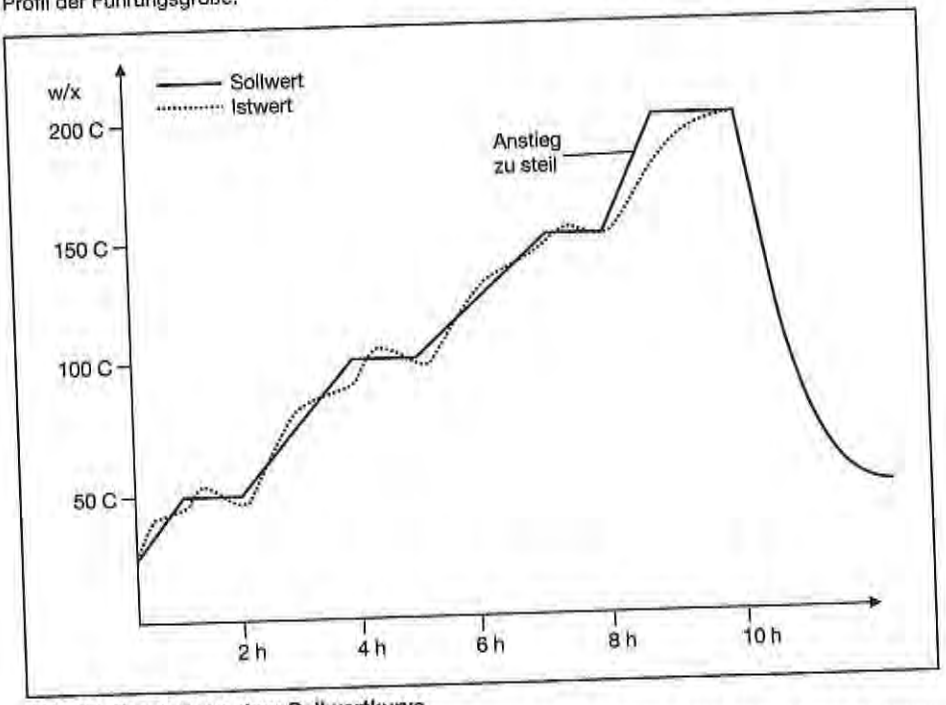


Abb. 77: Darstellung einer Sollwertkurve

Die Sollwertkurven werden meist von einem externen Programmgerät oder einem Rechner vorgegeben und vom Regler über die Schnittstelle oder einen separaten Sollwerteingang übernommen. Da die Regelgröße der sich ständig ändernden Führungsgröße folgen soll, spricht man auch von einer sogenannten Folgeregelung.

Die Anstiege der Sollwertkurve dürfen jedoch die Steigung der Streckenkennlinie nicht überschreiten, ansonsten folgt die Regelgröße nicht mehr der Programmkurve, sondern der durch die Streckenkennlinie vorgegebenen maximalen Steigung (Abbildung 77). Dies ist insbesondere bei nicht li-

nearen Prozessen wie Temperaturregelung zu beachten, wo die Streckenverstärkung zu höheren Werten abnimmt. Um dem vorzubeugen, kann jedoch unter Umständen durch eine entsprechende Geräteprogrammierung die Programmkurve gestoppt werden, sobald eine gewisse Regelabweichung auftritt, d. h. die Regelgröße dem Programmverlauf nicht mehr folgen kann.

7.5 Selbstoptimierung

Die optimale Einstellung eines Reglers auf die Regelstrecke kann eine zeitraubende Angelegenheit sein, erst recht wenn es sich um eine langsame Regelstrecke handelt. Weiterhin sind, wie wir in Kapitel 2.8 lesen konnten, die optimalen Werte für X_P T_v und T_n abhängig vom Arbeitspunkt. Es kann also durchaus möglich sein, dass für eine Regelstrecke mehrere sogenannte Regelparametersätze gefunden werden müssen.

Es liegt nun nahe, die Einstellung der Regelparameter durch den Regler selbst durchführen zu lassen. Bei Mikroprozessor-Reglern ist die Möglichkeit der selbsttätigen Reglereinstellung (Selbstoptimierung) vorhanden.

Prinzipiell kann man zwischen Reglern unterscheiden, welche die Regelparameter lediglich aufgrund der Aufforderung des Anwenders ermitteln und adaptiven Reglern, deren Einstellung fortlaufend überprüft und geändert wird.

Die angewendeten Verfahren von Selbstoptimierungen sind meistens als reine Softwarefunktionseinheit im Regler integriert und identifizieren aufgrund der Reaktion der Regelgröße auf Stellgradsprünge die Regelstrecke und ermitteln hierdurch die günstigen Regelparameter. Die ermittelten Größen X_P Tv, Tn etc. können durch den Anwender verfeinert werden (Abbildung 78).

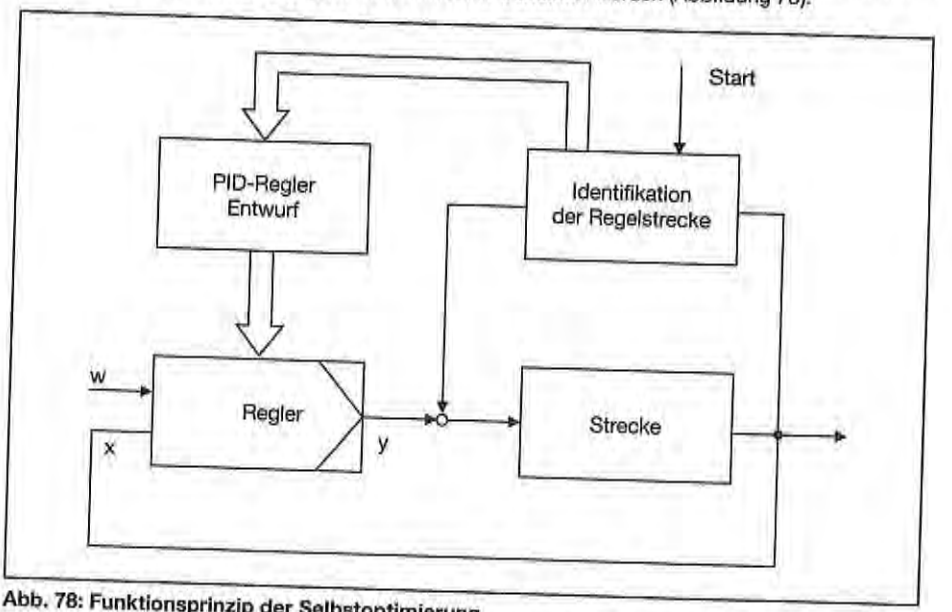


Abb. 78: Funktionsprinzip der Selbstoptimierung

Prinzipiell kann man eine Selbstoptimierung zum einen um den Sollwert erfolgen lassen: Hat der Regler die Regelgröße auf den Sollwert ausgeregelt und startet man die Selbstoptimierung, so werden im Wechsel 100 % und 0 % Stellgrad ausgegeben. Aus der um den Sollwert schwingenden

Regelgröße ermittelt der Regler die günstigen Parameter und übernimmt diese automatisch. Bei diesem Verfahren muß sichergestellt werden, das die Überschreitung der Regelgröße über den Sollwert keinen Schaden anrichtet.

Eine andere Art der Selbstoptimierung zeigt Abbildung 79: Hier liegt der Istwert unterhalb vom Sollwert und die Selbstoptimierung wird gestartet. Aus der ersten Reaktion der Regelgröße ermittelt der Regler die Verzugszeit der Strecke. Gemeinsam mit der Verzugszeit und der Steilheit des Regelgrößenverlaufs berechnet der Regler eine Schaltgerade, bei deren Überschreitung er den Stellgrad auf 0% setzt. Durch das Einfügen der Schaltgeraden wird bei einer linearen Strecke verhindert, das die Regelgröße über die Führungsgröße schwingt. Bei nichtlinearen Strecken wird das Überschwingen zwar nicht ganz verhindert, jedoch zumindest reduziert. Der Regler gibt insgesamt zweimal 100% Stellgrad aus, was durch die Ausgabe von 0% Stellgrad unterbrochen ist. Danach übernimmt der Regler die optimalen Parameter und regelt auf den Sollwert aus.

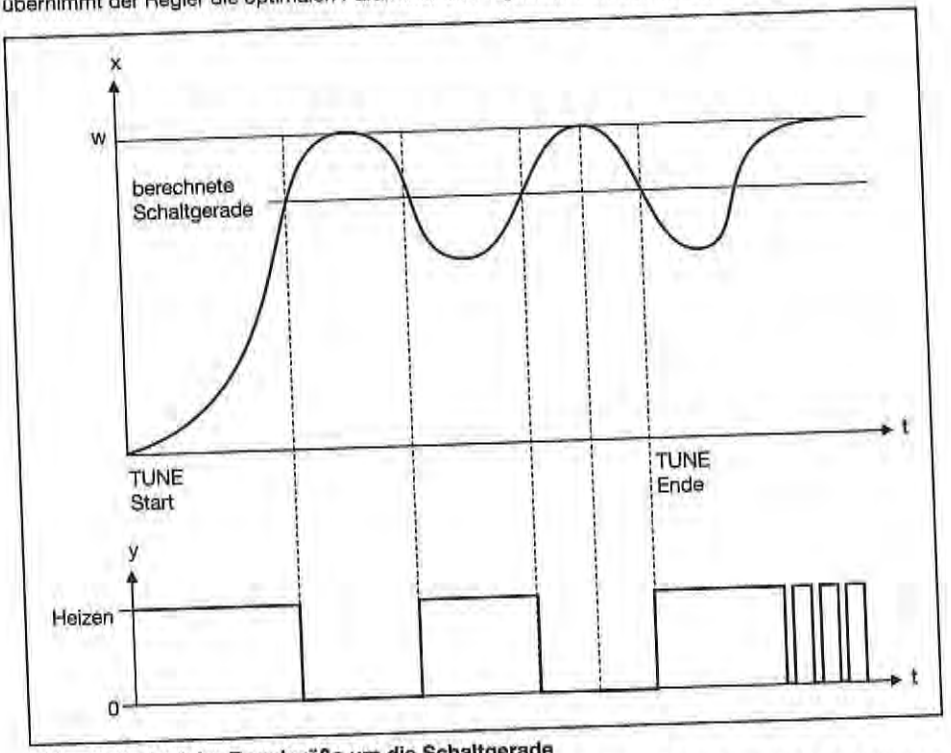


Abb. 79: Verlauf der Regelgröße um die Schaltgerade

Als Basis für die Ermittlung der Regelparameter werden von den Herstellern meisst Regelstrecken mit Ausgleich ohne Totzeitglieder angenommen. Die Selbstoptimierung arbeitet um so besser, je mehr die vorhandene Strecke den vorgenannten entsprechen.

7.6 Parameterumschaltung/Strukturumschaltung

Durch eine Parametersatzumschaltung wird es ermöglicht, den Regler innerhalb eines Regelprozesses mit unterschiedlichen Parametersätzen zu betreiben. Ein Satz kann nun diverse Parameter beinhalten, z. B. unterschiedliches Zeitverhalten, X_P-Bereiche, C_y etc. Manche Regelgeräte erlauben meist sogar, komplette Reglerstrukturen umzuschalten, wie die Umschaltung von PD- auf PID-Struktur.

Ausgelöst wird die Umschaltung eines Satzes über Binäreingänge des Reglers oder über programmierte Werte in Abhängigkeit der Regelabweichung bzw. diverser Sollwertbereiche (Abbildung 80).

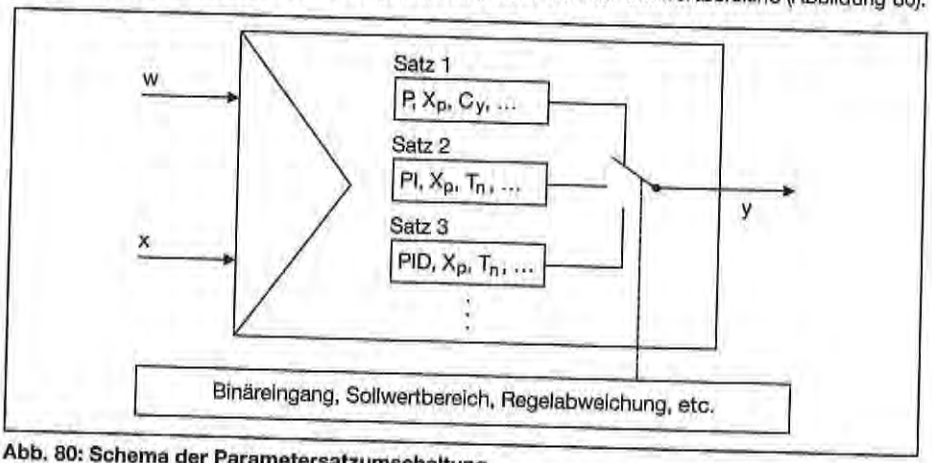


Abb. 80: Schema der Parametersatzumschaltung

Anwendung findet eine solche Parametersatzumschaltung beispielsweise bei immer wiederholten Anfahrvorgängen im Automatikbetrieb mit großer Regelabweichung, bei denen man nun in kürzester Zeit auf die Führungsgröße ausregeln will, jedoch ohne Überschwingen der Regelgröße x. Dies ist jedoch meist mit den für eine stabile Regelung nötigen Parametern nicht möglich. Man schaltet dann, z. B. in Abhängigkeit der Regelabweichung, den Regler von P-Betrieb mit etwas kleinerem X_P-Bereich vor dem Erreichen der Führungsgröße in den PI-Betrieb um. Einsetzen lässt sich dieses Hilfsmittel der Umschaltung ferner bei unterschiedlichen Beschickungen (Chargen) eines industriellen Ofens (Glühofen). Je nach Beschickung, halbe Charge, volle Charge, ändert sich das Regelverhalten der Strecken, und der Regler ist individuell anzupassen. Dies kann nach gewissen Vorversuchen unterschiedlichen Parametersätzen zugewiesen werden. Weiterhin ist diese Sonderfunktion von Vorteil, wenn unterschiedliche Arbeitspunkte über den gesamten Kennlinienbereich gefahren werden und es sich um eine unlineare Kennlinie handelt, bei der mit unterschiedlichem Leistungsüberschuss zu rechnen ist.

7.7 Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik, die man auch als unscharfe Logik bezeichnet, wurde bereits 1965 von Herrn Lotfi A. Zadeh in den USA entwickelt. Dieser mathematischen Methode liegt die sogenannte unscharfe Mengenlehre (Fuzzy-Set-Theory) zugrunde, die eine Erweiterung der Boolschen Algebra darstellt. Diese Technologie wurde immer weiter entwickelt, in Japan wurden die Vorteile recht schnell erkannt und man begann diese Technologie für eine Vielzahl von Regelaufgaben (Fuzzy-Control) einzusetzen. Diese Anwendung der Fuzzy-Logik in der Automatisierungs- und Regelungstechnik ergänzt die klassische Regelungstechnik in sehr sinnvoller Weise.

Es soll hier im Rahmen dieser Broschüre nicht detaillierter in diese Technologie eingestiegen werden, sondern nur die Anwendung in Kombination mit einem PID-Regler veranschaulicht werden. Es sei nur so viel erwähnt, dass die Fuzzy-Logik sich mit der subjektiven Unbestimmtheit von Begriffen, wie z. B. "zu hohe Temperatur", "zu niedriger Druck" oder "zu geringer Luftfeuchte", sowie mit der Ableitung von Entscheidungen aufgrund solcher sprachlicher Variablen beschäftigt. Sie erschließt somit die unscharfen Begriffe menschlichen Denkens.

Es wird nun im folgenden die Zusammenarbeit der Fuzzy-Logik mit einem digitalen PID-Regelalgorithmus zur Verbesserung des Stör- und Führungsverhaltens eines Regelkreises aufgezeigt. In Abbildung 81 ist das vereinfachte Blockschaltbild eines PID-Reglers in Kombination mit einem Fuzzy-Modul gezeigt. Eingangsgrößen in den Fuzzy-Regler sind die Regelabweichung, die zeitliche Ableitung der Regelgröße sowie eine Information, ob der Regler auf Führungsverhalten oder Störverhalten regeln soll. Die Ausgangsstellgröße des Fuzzy-Reglers wird mit einem Parameter Fc1 bewertet und zu der PID-Reglerstellgröße addiert. Die auf den Prozess wirkende Stellgröße setzt sich somit aus der PID-Reglerstellgröße und der Fuzzy-Reglerstellgröße zusammen. Ein zweiter Ausgang aus dem Fuzzy-Regler ist ein Steuerausgang, der über den Parameter Fc2 auf die PID-Regelparameter einwirkt. Mit lediglich zwei Parametern, Fc1 und Fc2, kann somit der Fuzzy-Regler an den Prozess angepasst werden.

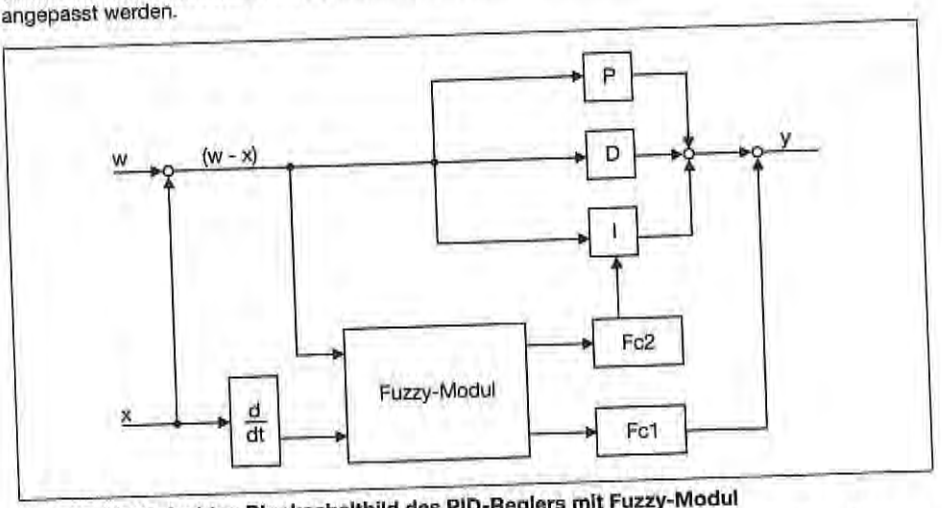


Abb. 81: Vereinfachtes Blockschaltbild des PID-Reglers mit Fuzzy-Modul

Im Fuzzy-Regler sind sogenannte linguistisch formulierte „Wenn-Dann-Regelblöcke" integriert. Diese sprachlichen Regeln bestimmen das Übertragungsverhalten des Fuzzy-Reglers für sein Stör- und Führungsverhalten.

Die Kombination eines Fuzzy-Reglers parallel zu einem konventionellen Regler hat mehrere Vorteile.

- Bei nicht linearem Prozessverhalten oder bei Regelstrecken höherer Ordnung kann der Fuzzy-Regler gezielt Ungenauigkeiten des PID-Reglers ausgleichen, indem er in kritischen Betriebszuständen unterstützend eingreift.

Zum Beispiel bei Systemen, dessen Verhalten sich über die Betriebszeit ändert. Das Fuzzy-Modul ist gegenüber Parameterveränderung der Regelstrecke unempfindlicher als der Regler mit seinen fest eingestellten Parametern. Das heißt, sich verändernde Streckeneigenschaften werden durch die Fuzzy-Logik in Kombination mit dem PID-Regler besser abgefangen.

- Die eingebauten Fuzzy-Regler erhöhen beim Führungsverhalten in bestimmten Situationen den

Dämpfungsgrad des Regelkreises. Das heißt, Schwingungsneigungen beim Anfahren an den Sollwert werden dadurch abgeschwächt sowie Überschwinger wesentlich gedämpft.

- Das Problem der Regleroptimierung gezielt auf Führungs- oder Störverhalten wird durch die Fuzzy-Komponenten abgeschwächt, da Fuzzy die regelungstechnischen Optimierungskriterien miteinander verbindet.
- Beim Auftreten von Störgrößen reagiert der Fuzzy-Regler dynamischer als der PID-Regler und regelt somit die Störung schneller aus. Das Gütekriterium wird verbessert, d. h. die entstandene Regelfehlerfläche ist kleiner als bei Ausregelung durch den PID-Regler alleine (Abbildung 82).

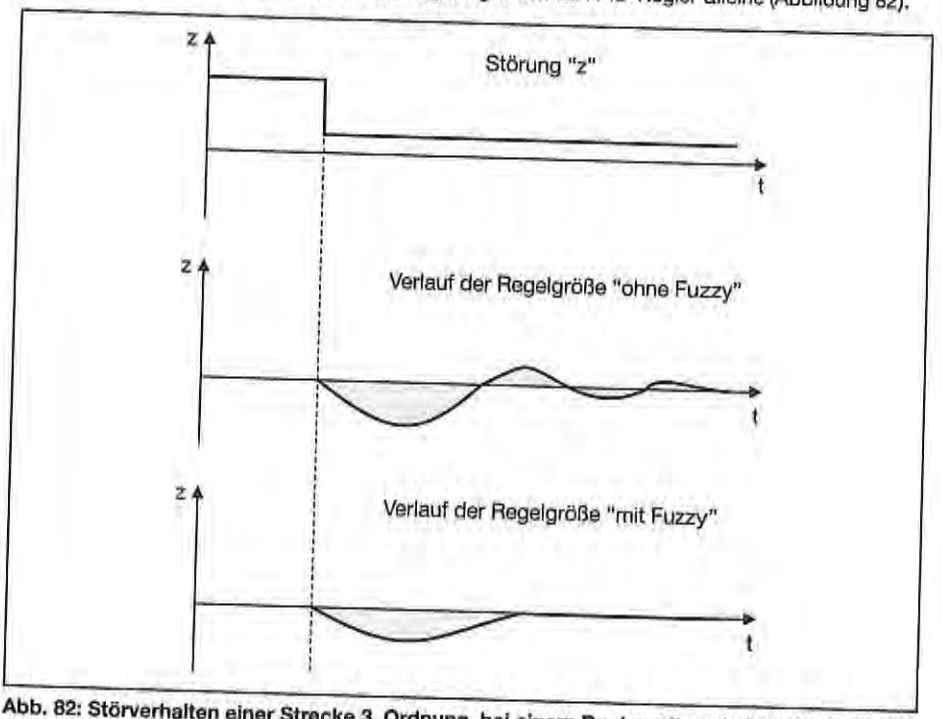


Abb. 82: Störverhalten einer Strecke 3. Ordnung, bei einem Regler mit und ohne Fuzzy-Modul

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Fuzzy-Logik in ihrer Anwendung als Fuzzy-Control der Automatisierungs- und Regelungstechnik sich heutzutage nach anfänglichen Akzeptanzproblemen dieser Technologie jedoch recht gut bewerten lässt. Gerade bei komplexeren Regelaufgaben erweist sich das Fuzzy-Konzept als leistungsfähig. Die klassische Regelungstechnik wird von der Fuzzy-Logik mit Sicherheit nicht ersetzt werden, aber es werden sich technische Prozesse herauskristallisieren, die mit die Fuzzy-Logik wirtschaftlicher und sicherer in den Griff zu bekommen sind. Die Kombination des Fuzzy-Reglers mit dem PID-Regler ist ein sinnvolles Beispiel hierzu.

Somit lässt sich festhalten, dass der Fuzzy-Regler im allgemeinen wie auch die Kombination von klassischen, konventionellen Reglern mit Fuzzy-Modulen eine Vergrößerung der Flexibilität ermöglicht, d. h. der Regler kann an unterschiedliche Regelstrecken und Regelungsziele besser angepasst werden.

8 Normen, Formelzeichen, Literatur

Normen

Von großer Bedeutung für die Technik - auch Regelungstechnik- sind Normen und Richlinien. In diesen werden sowohl Begriffe und Benennungen festgelegt, als auch Bauteilwerte, Bemessungen, sowie wichtige Zahlenwerte und Zahlenbereiche.

Aus der sehr großen Anzahl von erschienen Normen und Richtlinien sind im Folgenden nur die aufgeführt, die für die Grundlagen der Regelungstechnik sinnvoll sind bzw. zum Erstellen der Broschüre herangezogen wurden.

DIN 19221	1993-05	Messen, Steuern, Regeln; Formelzeichen der Regelungs- und Steuerungstechnik
DIN 19225	1981-12	Messen, Steuern, Regeln; Bennenung und Einteilung von Reglern
DIN 19226	(1-5)	Regelungs- und Steuerungstechnik; Begriffe und allgemeine Grundlagen
DIN 19236	1977-01	Messen, Steuern, Regeln; Optimierung, Begriffe

Richtlinie VDI/VDE 2189 Blatt 1	Beschreibung und Untersuchung von Zwei- und Mehrpunktreglern ohne Rückführung
Richtlinie VDI/VDE 2189 Blatt2	Beschreibung und Untersuchung von Zwei- und Dreipunktreglern mit Rückführung
Richtilinie VDI/VDE 2189 Blatt 3	Beschreibung und Untersuchung von Dreipunkt-Schrittreglern
Richtlinie VDI/VDE 2189 Blatt4	Beschreibung und Untersuchung digital arbeitender Kompaktregler
Richtlinie VDI/VDE 2190 Blatt1	Beschreibung und Untersuchung stetiger Regelgeräte Grundlagen

Formelzeichen

C_y	Schaltperiodendauer des Stetigähnlichen Reglers
e	Regelabweichung
f_{sch}	Schaltfrequenz des unstetigen Reglers
K_I	Integralbeiwert des Reglers
K_{IS}	Übertragungsbeiwert der Regelstrecke ohne Ausgleich
K_S	Übertragungsbeiwert der Regelstrecke
K_P	Proportionalbeiwert des Reglers
t	Zeit (laufend)
T	Tastverhältnis des stetigähnlichen Reglers
T_a	Ausregelzeit des stetigähnlichen Reglers
T_{an}	Anregelzeit
T_{au}	Ausschaltzeit des Stetigähnlichen Reglers
T_e	Einschaltzeit des stetigähnlichen Reglers
T_T	Stellgliedlaufzeit
T_S	Zeitkonstante Regelstrecke 1. Ordnung
T_{sch}	Schwingungsdauer des unstetigen Reglers
T_g	Ausgleichszeit
T_u	Verzugszeit
T_n	Nachstellzeit des Reglers
T(%)	Tastverhältnis des stetigähnlichen Reglers in %
T_v	Vorhaltezeit des Reglers
T_t	Totzeit

8 Normen, Formelzeichen, Literatur

T_{Mmin} Mindestimpulsdauer bei Dreipunktschritt- und Stellungsreglern

T_K Schwingungsdauer bei X_{Pk}

V_{max} maximale Anstiegsgeschwindigkeit

w Führunggröße

x Regelgröße

X_{max} Überschwingweite

X_{Max} Maximaler Istwert (Regelgröße)

X_{Sd} Schaltdifferenz eines unstetigen Reglers

X_{Pk} kritisches X_P bei dem Regelkreis mit P-Regler gleichmäßig schwingt

X_{Sh} Kontaktabstand oder Totband

X_P Proportionalbereich des Reglers

y Stellgröße

y_H Stellbereich

z Störgröße

Literatur

- Grundriß der Praktischen Regelungstechnik 18., Oldenburg; E. Samal / W. Becker
- Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik, Hüthig Verlag; Lenz / Oberst / Koegst
- Elementare Regelungstechnik, Vogel Verlag; P. Busch
- Elektrische Meß- und Regeltechnik, Vogel Verlag; Böttle / Boy / Grothusmann
- Regelungstechnik- Wirkunsweise und Einsatz elektronischer Regler, Expert Verlag; D. Weber
- Elektronische Regler- Grundlagen, Bauformen und Einstellkriterien, JUMO; D. Weber
- Betriebsanleitung- Universeller Programmregler JUMO DICON 401/501 M. K. Juchheim

A

Analoge und digitale Regler *18*
Änderungsgeschwindigkeit *65*
Anlaufwert *43*
Anregelzeit *11*
Anstiegsgeschwindigkeit vmax *43, 82*
Antriebsregelung *27*
Arbeitspunkt *44, 52*
Ausgleichszeit *41–42*
Ausregelzeit *11*

B

Bauformen des Reglers *12*

C

Chien, Hrones und Reswick *75*

D

D-Anteil *65*
Digitale und analoge Regler *18*
Drehzahlregelung *27*
Dreipunktregler *12, 25, 87, 99*
Dreipunktschrittregler *103*
Dynamik *55*
dynamische Kennlinie *31*

E

Einschaltdauer, relativ *94*
Einschaltverhältnis *96*

F

Feinregler *115*
Folgeregler *118*
Führungsgröße *10, 70*
Führungsregler *116*
Führungsverhalten *69, 71*
Fuzzy-Logik *126*
Fuzzy-Modul *127*
Fuzzy-Regler *127*

G

Grob-/Fein-Regelung *115*
Grobregler *115*
Grundlast *109*
Grundlastvorgabe *109*

H

Handbetrieb *121*
Hilfsregelgröße *115*
Hilfsregelkreis *112*
Hilfsregler *116*
Hysterese *88*, *99*

I

instabil *52*, *60*
I-Regler *56*, *67*
I-Strecken *33*

K

Kaskadenregelung *116*
Kennlinie *49*
- fallend *50*
- steigend *50*
Kontaktabstand *99*, *104*
Kursregelung *28*

L

Lageregelung *28*
Leistungssteuerung *95*
Leistungsumschaltung *111*
Leitgerät *121*

M

Mehrpunktregler *87*

N

Nachstellzeit *57–58*, *60*

P

PD-Regler *60*
Periodendauer *96*
PID-Regler *66–67*
PID-Verhalten *67*
PI-Regler *57, 65*
Proportionalbeiwert *48, 50*
Proportionalbereich *49*
PT1-Strecke *39*
PT2-Strecke *40*

R

Rampenfunktion *122*
Regelabweichung *10*
Regeldifferenz *10*
Regelfehlerfläche *77*
- linear *77*
Regelgröße *9, 47*
Regelgüte *62, 109, 116*
Regelkreis *10*
- einschleifig *109*
- mehrschleifig *109*
Regelkreis geschlossen *9–10*
Regelstrecke *43*
- 1. Ordnung *39*
- 2. Ordnung *40*
- höherer Ordnung *41*
- mit einer Verzögerung *38*
- mit und ohne Ausgleich *34*
- mit und ohne Totzeit *35*
- mit Verzögerung *38*
- mit zwei Verzögerungen *39*
- ohne Ausgleich *33, 93*
- reine Totzeit *35*
Regelstrecke mit Ausgleich *31*
Regler
- schaltend *12*
- stetig *12, 47*
- unstetig *12, 87, 98*
Regler mit Dynamik *13, 93, 97, 102*
Regler ohne Dynamik *12*
Reglerausgangsgröße *10*
Reglerbauformen *12*
Reglereinstellung *72*
- nach der Anstiegsgeschwindigkeit *82*
- nach der Schwingungsmethode *78*
- nach der Übergangsfunktion *80*
Reglerverstärkung *78*

S

Schaltdifferenz *88, 90, 92, 99*
Schaltfrequenz *89–90*
Schalthäufigkeit *94*
Schaltperiodendauer *95*
Schwankungsbreite *89, 92*
Schwingungsdauer *90, 92*
Schwingungsmethode *78*
Signalarten *18*
Signale *18*
- analoge *19*
- binär *19*
- digitale *15*
- Dreipunkt *19*
Sprungantwort *16, 31, 41*
stabil *57, 62*
Statische *30*
Statische Kennlinie *30*
statische Streckenkennlinie *52*
statischen Streckenkennlinie *52*
Stellantrieb *24*
Stellantriebe *25*
Stellbereich *10*
Stellglieder *23*
Stellgliedlaufzeit *103, 106*
Stellgradrückmeldung *106*
Stellgröße *10*
Stellungsregler *106*
Stellzeit *104*
Stetige Regler *47*
Stetiger Regler *12*
Steuern *26*
Störgröße *10, 112*
Störgrößenaufschaltung *112*
- additiv *113*
- multiplikativ *113*
Störverhalten *69, 71*
Streckensprungantwort *80*
Streckenverstärkung *30*

T

Tastverhältnis *94*
Toleranzgrenze *11*
Tt-Strecken *35*

U

Übergangsfunktion *38*, *80*
Überschwingweite *11*, *73*
Übertragungsbeiwert *30*, *33*, *44*, *80*

V

Verhalten *66*
- dynamisch *69*
- statisch *69*
Verhältnisregelung *118*
Verstärkung *47*
Verzugszeit *41*
Vorhaltezeit *62*

W

Wendepunkt *81*
Wendetangente *42*, *81*

X

Xp-Bereich *49*
- symmetrisch *50*
- unsymmetrisch *51*

Z

Zeitverhalten *74*
Ziegler und Nichols *75*

Index

messen · regeln · registrieren

JUMO

Mess- und Regeltechnik AG
Seestrasse 67 CH-8712 Stäfa

Telefon 01-928 24 44
Fax 01-928 24 48