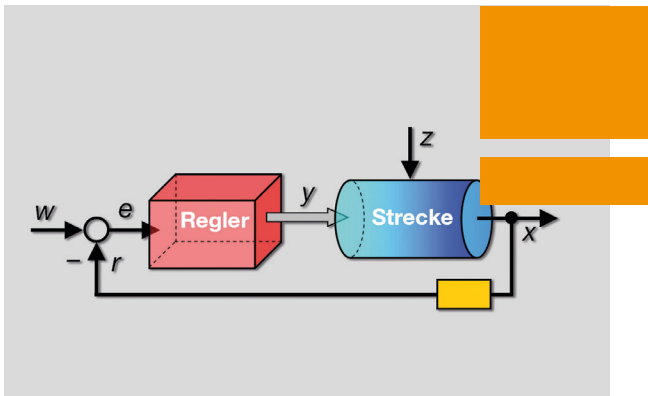


# Leseprobe

**Christiani**

Technisches Institut für  
Aus- und Weiterbildung

## Regelungstechnik – Crashkurs



## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Aufgaben und Anwendungen der Regelungstechnik.....</b>	<b>3</b>
1.1 Allgemeines zur Regelungstechnik.....	3
1.2 Aufgaben eines Regelungstechnikers .....	3
1.3 Anwendungen für Regelungen.....	4
<b>2 Begriffe der Regelungstechnik.....</b>	<b>7</b>
2.1 Grundprinzipien von Steuerung und Regelung .....	7
2.1.1 Steuerung .....	7
2.1.2 Regelung .....	8
2.2 Komponenten des Regelkreises .....	9
2.3 Benennungen und Abkürzungen regelungstechnischer Größen .....	9
<b>3 Symbole der Regelungstechnik .....</b>	<b>15</b>
3.1 Das Blockschaltbild (Wirkungsplan) .....	15
3.1.1 Elemente von Blockschaltbildern.....	15
3.1.1.1 Wirkungslinie .....	16
3.1.1.2 Linearer Verarbeitungsblock .....	16
3.1.1.3 Additionsstelle.....	19
3.1.1.4 Verzweigungsstelle.....	20
3.1.1.5 Nichtlinearer Block.....	20
3.1.2 Umformen von Blockschaltbildern .....	22
3.2 Grafische Symbole für lösungsbezogene Darstellungen .....	24
<b>4 Regelungsverfahren und -strukturen .....</b>	<b>27</b>
4.1 Arten von Regelungen.....	27
4.2 Auslegung auf Führungs- oder Störungsverhalten.....	30
4.3 Festwertregelung .....	31
4.4 Folgeregung.....	31
4.5 Regelung mit Hilfsregelgrößen-Aufschaltung.....	31
4.6 Kaskadenregelung .....	32
4.7 Verhältnisregelung.....	36
4.8 Störgrößenaufschaltung.....	37
4.8.1 Konstanthalten der Störgröße.....	38
4.8.2 Additive Störgrößenaufschaltung .....	38
4.8.3 Multiplikative Störgrößenaufschaltung .....	39
4.9 Grob-/Feinregelung.....	40
4.10 Mehrkomponentenregelung.....	41
4.11 Regelung mit Hilfsstellgröße .....	41
4.12 Regelung mit Vorsteuerung (Vorwärtssteuerung) .....	42
4.13 Adaptive Regelung .....	43

4.14	Stetige und unstetige Regelung.....	44
4.15	Analoge und digitale Regelung.....	45
4.16	Fuzzy-Regler .....	46
<b>5</b>	<b>Regelstrecken.....</b>	<b>49</b>
5.1	Allgemeines zu Regelstrecken .....	49
5.1.1	Theoretische Prozessanalyse .....	50
5.1.2	Experimentelle Prozessanalyse .....	51
5.2	Einteilung von Regelstrecken.....	53
5.2.1	Ordnung eines Systems.....	53
5.2.2	Regelstrecken mit Ausgleich.....	55
5.2.3	Regelstrecken ohne Ausgleich .....	55
5.2.4	Regelstrecken mit Totzeit.....	56
5.3	Kennlinien von Regelstrecken mit Ausgleich.....	57
5.3.1	Ermittlung der statischen (stationären) Kennlinie.....	57
5.3.2	Ermittlung der dynamischen Kennlinie .....	59
5.4	Arten von Regelstrecken.....	60
5.4.1	P-Strecke ohne Zeitverzögerung .....	60
5.4.2	P-Strecke mit Totzeit ( $T_1$ -Strecke).....	61
5.4.3	$PT_1$ -Strecke (Verzögerungsglied erster Ordnung).....	63
5.4.4	$PT_2$ -Strecke (Verzögerungsglied zweiter Ordnung).....	65
5.4.5	$pT_n$ -Strecke (Verzögerungsglied n-ter Ordnung) .....	67
5.4.6	Nachbildung einer $PT_n$ -Strecke.....	67
5.4.6.1	Wendetangenten-Methode.....	68
5.4.6.2	Zeitprozentkennwert-Methode.....	69
5.4.7	Regelbarkeit von Strecken höherer Ordnung .....	72
5.4.8	I-Strecke (Integrierglied) .....	73
5.4.9	$IT_1$ -Strecke (Integrierglied mit Verzögerung 1. Ordnung) .....	74
<b>6</b>	<b>Regler.....</b>	<b>75</b>
6.1	Aufgabe des Reglers, Reglereingriff.....	75
6.2	Arten von Reglern .....	77
6.2.1	Regler mit und ohne Hilfsenergie.....	78
6.2.2	Stetige Regler.....	78
6.2.3	Unstetige Regler.....	78
6.2.4	Unterscheidung nach mechanischem Aufbau.....	80
6.2.5	Analoge und digitale Regler.....	80
6.3	Sollwertvorgabe .....	87
6.4	Erfassen des Istwertes.....	88
6.5	Stellglieder.....	88
6.6	P-Regler .....	90
6.6.1	Proportionalbeiwert.....	90
6.6.2	Proportionalbereich.....	92
6.6.3	Bleibende Regelabweichung .....	97
6.6.4	Einstellung des Arbeitspunktes .....	98
6.6.5	Zusammenfassung P-Regler .....	101

6.6.6	Regler mit Dynamik .....	101
6.7	I-Regler .....	102
6.7.1	Eigenschaften.....	102
6.7.2	Nachstellzeit .....	104
6.7.3	Zusammenfassung I-Regler.....	106
6.8	D-Regler .....	106
6.8.1	Eigenschaften.....	106
6.8.2	Vorhaltzeit.....	109
6.8.3	Zusammenfassung D-Regler .....	111
6.9	PI-Regler.....	111
6.9.1	Eigenschaften.....	111
6.9.2	Zusammenfassung PI-Regler .....	115
6.10	PD-Regler .....	116
6.10.1	Eigenschaften.....	116
6.10.2	Zusammenfassung PD-Regler.....	122
6.11	PID-Regler.....	123
6.11.1	Eigenschaften.....	123
6.11.2	Zusammenfassung PID-Regler.....	127
6.12	Symbole für stetige Regler.....	128
6.13	Arbeitsweise von Regelkreisen mit stetigen Reglern .....	128
6.13.1	Stabilität .....	128
6.13.2	Führungsverhalten des Regelkreises.....	131
6.13.3	Störverhalten des Regelkreises .....	131
6.14	Unstetige Regler.....	132
6.14.1	Zweipunktregler.....	133
6.14.2	Dreipunktregler.....	139
6.14.3	Dreipunktschrittregler .....	139
6.15	Auswahl eines stetigen Reglers .....	140
<b>7</b>	<b>Einstellung der Reglerparameter .....</b>	<b>145</b>
7.1	Allgemeines zu Optimierung und Einstellregeln .....	145
7.2	Schwingungsmethode nach Ziegler und Nichols.....	146
7.3	Auswertung der Sprungantwort nach Ziegler und Nichols .....	148
7.4	Auswertung der Sprungantwort nach Strejc .....	150
7.5	Einstellregeln nach Oppelt .....	152
7.6	Einstellregeln nach Rosenberg .....	152
7.7	Auswertung der Sprungantwort nach Chien, Hrones, Reswick.....	153
7.7.1	$PT_n$ -Strecken .....	153
7.7.2	$PT_1$ -Strecken .....	154
7.7.3	$IT_1$ -Strecken.....	155
7.8	Einstellregeln nach dem T-Summen-Verfahren .....	156
7.9	Reglerauslegung nach dem Betragsoptimum .....	159
7.10	Empirisches Anpassen der Reglerparameter .....	162
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>167</b>
<b>9</b>	<b>Stichwortverzeichnis.....</b>	<b>169</b>

## Vorwort

Dieses Lehrbuch richtet sich an alle, die in Ausbildung oder Beruf sowohl theoretisches als auch praxisbezogenes Wissen über die Grundlagen der Regelungstechnik benötigen. Das Werk vermittelt Kenntnisse über Fachbegriffe, Symbole und Darstellungsarten, Verfahren und Strukturen von Regelungen, Eigenschaften und Arten von Regelstrecken und Reglern und die Einstellung der Regelparameter.

Auszubildende in Lehrberufen finden einen Einstieg in das Fachgebiet, Teilnehmer von Meisterlehrgängen erhalten das notwendige Rüstzeug für die Prüfung. Studierende an Akademien, Techniker- und Fachhochschulen sowie Universitäten, die zum ersten Mal mit der Regelungstechnik in Berührung kommen, sind die speziellen Begriffe und Denkweisen häufig fremd. Dieser Personenkreis findet hier ein Basiswissen, welches den Einstieg in ein weiteres Studium erleichtert. Berufstätige können ihr Wissen wiederholen oder vertiefen und erhalten Anregungen für praktische Anwendungen. Das Buch kann unterrichtsbegleitend und zum Selbststudium verwendet werden.

Alle Ausführungen erfolgen in leicht verständlicher Weise und in kompakter Form. Es werden keine Kenntnisse in höherer Mathematik vorausgesetzt. Selbst wer mit mathematischen Formeln, mit denen manche Funktionsweisen zusätzlich zu den Erläuterungen untermauert sind, nicht vertraut ist, wird durch die ausführlichen Beschreibungen verstehen, auf welche Art bestimmte Teile eines Regelkreises ausgelegt werden müssen, um ein festgelegtes Ziel zu erreichen.

Die Regelungstechnik als wichtiges Teilgebiet der Automatisierungstechnik greift in die unterschiedlichsten technischen Prozesse ein. Allen Regelungsaufgaben gemeinsam ist aber der geschlossene Wirkungsablauf, der als Regelkreis bezeichnet wird. Alle Anwendungsfälle beinhalten grundsätzliche Probleme des Regelkreises. Dieser wird hier in seinen Teilen und als Ganzes betrachtet, um eine einfache Vorgehensweise zu ermöglichen. Der Einsatz regelungstechnischer Methoden wird dadurch weitgehend unabhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. Die Definition von Regelungsstruktur und Reglertyp und damit der Art des Eingriffes in den Prozess kann anhand bestimmter, einfacher Kriterien festgelegt werden. Dadurch ist eine einheitliche Vorgehensweise möglich, denn die Grundgesetze der Regelungstechnik gelten für alle Regelkreise, egal wie unterschiedlich sie realisiert sind.

In den meisten Fällen kann man ohne komplizierte Berechnungen auskommen, wenn man genügend Vorstellungsvermögen im Hinblick auf Regelvorgänge besitzt. Erforderlich ist es aber, die in der Regelungstechnik üblichen Begriffe und Bezeichnungen, die Arten unterschiedlicher Regelstrecken mit ihren charakteristischen Eigenschaften und die Wirkungsweise und Einstellmöglichkeiten gebräuchlicher Reglertypen zu kennen. Durch Vermittlung dieses Grundwissens soll das vorliegende Buch bei der Auswahl und Einstellung des geeigneten Reglers für unterschiedliche Anwendungsfälle helfen.

Haag a. d. Amper, im Januar 2013  
Leonhard Stiny

### 5.3 Kennlinien von Regelstrecken mit Ausgleich

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. Für die Auswahl eines geeigneten Reglers muss also das Verhalten der Regelstrecke bekannt sein. Man versucht das Verhalten der Regelstrecken durch die Angabe von **Kennlinien** und **Zeitfunktionen** zu beschreiben, um daraus die Regelstreckenparameter abzuleiten. Eventuell muss zur Festlegung der Parameter (falls möglich) ein fester Arbeitspunkt (Betriebspunkt) auf einer statischen Kennlinie festgelegt werden.

Die Aufgabe der Regelungstechnik besteht darin, für eine gegebene Regelstrecke und die zugrunde liegende Regelaufgabe die Struktur des Regelkreises und die zugehörigen Regler zu entwerfen und deren Parameter so einzustellen, dass die Regelgröße  $x$  möglichst gut den Sollvorgaben entspricht. Um dies zu erreichen, müssen alle Betriebszustände berücksichtigt werden. Dazu gehören stationäre Arbeitspunkte und der Verlauf dynamischer Änderungen.

#### Stationäre Arbeitspunkte

Dies sind Arbeitspunkte, in denen sich die Zustandsgrößen des Regelkreises oder des Übertragungsgliedes nicht mehr ändern. In einem stationären Arbeitspunkt sind alle Ausgleichsvorgänge abgeschlossen und das System verharrt in einem eingeschwungenen Zustand (Beharrungszustand). Trägt man alle Werte  $x = f(y)$  auf, so erhält man die stationäre (statische, von der Zeit unabhängige) Kennlinie.

#### Dynamische Kennlinie

Dies ist der zeitliche Verlauf des Übergangs zwischen zwei stationären Arbeitspunkten. Stabile Systeme gehen für  $t \rightarrow \infty$  in einen eingeschwungenen Zustand über, Es wird ein endlicher Wert am Systemausgang erreicht, der sich zeitlich nicht mehr ändert.

#### 5.3.1 Ermittlung der statischen (stationären) Kennlinie

Die Kennlinie einer Regelstrecke ist die grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Stellgröße  $y$  und Regelgröße  $x$ . Eine Kennlinie ist hier ein Diagramm, bei dem die Abhängigkeit einer physikalischen Größe von einer anderen physikalischen Größe (aber nicht der Zeit) dargestellt ist. Auf der senkrechten Achse kann z.B. die Raumtemperatur und auf der waagrechten Achse die Stellung eines Mischventils aufgetragen sein.

Die statische Kennlinie kann ermittelt werden, indem für verschiedene Werte der Eingangsgröße die Ausgangsgröße, welche sich *nach langer Zeit einstellt*, gemessen und in einem Diagramm aufgetragen wird.

Regelstrecken

Die Zeit spielt für die Änderung der Ausgangsgröße keine Rolle, weil die zu jeder Stellgrößenänderung sich ergebende Regelgrößenänderung abgewartet werden muss (Erreichen des Beharrungszustandes). Die Kennlinie zeigt den Zusammenhang zwischen Stellgröße  $y$  und Regelgröße  $x$  innerhalb des Laufbereichs beider Größen bei konstantem Einfluss der Störgrößen. Zu jedem Stellgrößenwert  $y$  ist der zugehörige Regelgrößenwert  $x$  im Beharrungszustand aufgetragen.

**Statische Kennlinien können linear oder nichtlinear sein.**

**Beispiel 23**

Ein Beispiel für ein Übertragungsglied mit linearer Kennlinie ist ein  $RC$ -Netzwerk. Die Ausgangsspannung  $U_2$  folgt zwar der angelegten Spannung  $U_1$  mit einem gewissen Zeitverhalten ( $U_2 = f(t)$ , ein exponentielles Aufladen des Kondensators), die einzelnen **Endwerte** sind jedoch proportional zur angelegten Spannung, somit gilt  $U_2 = f(U_1)$ . Nach langer Zeit ist der Kondensator auf die ladende Spannung  $U_1$  aufgeladen.

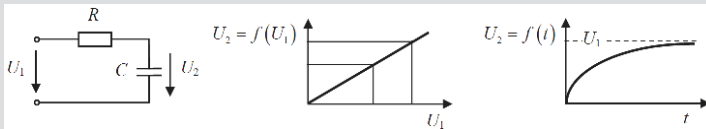


Abb. 43: Eine lineare Kennlinie (Mitte), rechts das Zeitverhalten  $U_2 = f(t)$

Man sagt auch, die **Streckenverstärkung  $K_s$  einer linearen Strecke ist konstant**, da eine Änderung der Eingangsgröße immer die gleiche Änderung der Ausgangsgröße zur Folge hat. Das Ergebnis ist eine lineare Kennlinie. Die Streckenverstärkung wird auch als **Übertragungsbeiwert** bezeichnet.

Die stationäre Kennlinie einer Regelstrecke kann auch gekrümmt und somit nichtlinear sein. Analysiert man das Verhalten von nichtlinearen Strecken mit Hilfe von Sprungantworten, so zeigt sich an jedem Betriebspunkt (**Arbeitspunkt**) ein anderes dynamisches Verhalten der Regelgröße. Die Streckenverstärkung ist nicht konstant, sie ändert sich in Abhängigkeit der Lage des Arbeitspunktes. Für die Regelung ist dieses Verhalten von Nachteil, da es zu einem betriebspunktabhängigen Regelverhalten der Strecke führt. Die Einstellung des Reglers vereinfacht sich, wenn eine nichtlineare Strecke in einem festen Betriebspunkt einer Anlage betrieben wird. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen.

Regelstrecken

**Beispiel 24**

Bei einem elektrorbeheizten Ofen handelt es sich um eine nichtlineare Strecke. Eine Änderung der Heizleistung von 500 W auf 1000 W hat z. B. eine größere Temperaturerhöhung zur Folge als eine Erhöhung von 2000 W auf 2500 W. Die Temperatur des Ofens steigt nicht im gleichen Maße wie die zugeführte Leistung, da die Temperaturabstrahlung bei höheren Temperaturen immer stärker wird. Man muss daher eine immer höhere Leistung aufwenden, um die Energieverluste aufzuheben. Die Streckenverstärkung  $K_S$  ist bei solchen Systemen nicht konstant, sie ist vom Arbeitspunkt (Betriebspunkt) AP abhängig und nimmt mit höheren Istwerten immer weiter ab (siehe Abb. 44 rechts).

Auch Prozesse mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung oder Zusammenhänge zwischen Motorleistung und Drehzahl sind z. B. nichtlinear.

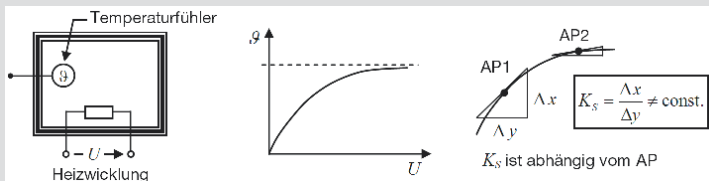


Abb. 44: Elektrisch beheizter Ofen (links) mit nichtlinearer Kennlinie (Mitte)

Hat eine Strecke eine nichtlineare Kennlinie, so ist auf alle Fälle zu beachten, dass die Streckenverstärkung für verschiedene Arbeitspunkte unterschiedlich ist.

Wird eine nichtlineare Strecke vorwiegend oder grundsätzlich an einem festen Arbeitspunkt betrieben, so passt man den Regler speziell an diesen Betriebspunkt an. Die Streckenparameter müssen dann nur für diesen Arbeitspunkt und evtl. dessen nähere Umgebung bestimmt werden. Dies entspricht einer **Linearisierung der Kennlinie im Arbeitspunkt**. Die Linearisierung erlaubt es, Werkzeuge und Entwurfsverfahren der linearen Regelungstechnik auf eine nichtlineare Strecke anzuwenden.

Wenn kein fester Arbeitspunkt definiert werden kann, wie z. B. bei einer Folgeregelung mit variablem Sollwert, bleibt die Einstellung der Reglerparameter ein Kompromiss. Dann wird der Regler zumeist bei mittlerer Streckenverstärkung eingestellt.

**5.3.2 Ermittlung der dynamischen Kennlinie**

Für die Charakterisierung des Regelkreises ist das Zeitverhalten der Strecke ausschlaggebend. Die dynamische Kennlinie beschreibt, wie sich das Ausgangssignal des Übertragungsgliedes (der Strecke) zeitlich verhält, wenn sich das Eingangssignal verändert.