

# HANSER



## Leseprobe

zu

## Regelungstechnik

von Thomas Beier und Petra Wurl

Print-ISBN: 978-3-446-47277-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-47403-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472778>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort zur 3. Auflage

Die Autoren freuen sich über die Möglichkeit, mit der 3. Auflage noch kleine Fehler beseitigen zu können. Wir haben viele positive Rückmeldungen bekommen. Als Zielgruppe waren ursprünglich Studierende an Technikerschulen vorgesehen, doch hat sich gezeigt, dass das Buch auch als Einstiegsliteratur und Prüfungsvorbereitung an den Fachhochschulen benutzt wird. Das Buch enthält die allgemeinen Grundlagen der Regelungstechnik ohne große Anforderungen an die Mathematik. Es ist ein Anwendungsbuch der Regelungstechnik in der 3. Auflage. Die einzelnen Abschnitte des Buches wurden sehr aufmerksam gelesen und wir haben die konstruktiven Anregungen und Vorschläge in die 3. Auflage einfließen lassen. Das Buch wurde an einigen Stellen erweitert. Den Autoren war es wichtig, neben den Grundlagen zu den Operationsverstärkern auch die Modellierung eines Systems 2. Ordnung aufzunehmen. Die Themen vermaschte Regelkreise und digitale Regler wurden durch Beispiele erweitert. Wir möchten die Leser weiter ermutigen, uns Anregungen und konstruktive Kritik mitzuteilen. Bei unseren Studierenden bedanken wir uns für das akribische Fehlersuchen und Finden. Bedanken möchten wir uns auch wieder für die sehr gute Zusammenarbeit mit dem Lektorat des Hanser Verlags.

*Berlin, Januar 2022*

*Petra Wurl, Thomas Beier*



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung in die Regelungstechnik</b> .....	<b>11</b>
1.1	Grundbegriffe der Regelungstechnik .....	12
1.1.1	Steuern oder Regeln? .....	12
1.1.2	Die Größen des Regelkreises .....	14
1.1.3	Die Regelkreisglieder .....	16
1.2	Darstellung von Regelkreisen .....	19
1.2.1	Das Übertragungsglied .....	19
1.2.2	Der elementare Regelkreis .....	24
1.2.3	Darstellung in Fließbildern .....	30
1.3	Der Operationsverstärker als Bauelement in der Regelungstechnik .....	32
1.3.1	Der invertierende Verstärker .....	35
1.3.2	Der nicht invertierende Verstärker .....	35
1.3.3	Der Impedanzwandler .....	36
1.3.4	Der Summierer .....	37
1.3.5	Der Differenzverstärker .....	37
1.3.6	Der Integrierer .....	39
1.3.7	Der Differenzierer .....	39
1.3.8	Der Tiefpass .....	40
1.4	Übungen .....	41
<b>2</b>	<b>Das stationäre Verhalten von Regelkreisen</b> .....	<b>43</b>
2.1	Die Kreisverstärkung .....	44
2.2	Das Führungsverhalten .....	46
2.3	Der stationäre Regelfehler .....	49
2.4	Das Störverhalten .....	51
2.4.1	Störgrößen im Vorwärtszweig .....	52
2.4.2	Störgrößen in der Rückführung .....	56
2.5	Übungen .....	59
<b>3</b>	<b>Untersuchung von Übertragungsgliedern</b> .....	<b>61</b>
3.1	Das Bode-Diagramm .....	63
3.2	Reihenschaltung von Frequenzgängen .....	69

---

3.3	Übertragungsfunktion .....	74
3.4	Ortskurve .....	74
3.5	Untersuchung im Zeitbereich .....	78
3.6	Die Laplace-Transformation .....	80
3.7	Modellbildung und Simulation .....	84
3.8	Übungen .....	87
<b>4</b>	<b>Regelstrecken .....</b>	<b>88</b>
4.1	Regelstrecken mit Ausgleich .....	88
4.1.1	Regelstrecken mit Ausgleich ohne Verzögerung .....	89
4.1.2	Verzögerungsglieder erster Ordnung .....	92
4.1.3	Verzögerungsglieder höherer Ordnung .....	99
4.1.4	Verzögerungsglieder zweiter Ordnung .....	108
4.1.5	Regelstrecken mit Totzeitverhalten .....	113
4.2	Regelstrecken ohne Ausgleich .....	117
4.2.1	Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung .....	117
4.2.2	Regelstrecken ohne Ausgleich mit Verzögerung .....	124
4.3	Zusammengesetzte Regelstrecken .....	128
4.4	Übungen .....	131
<b>5</b>	<b>Regeleinrichtungen .....</b>	<b>134</b>
5.1	Regler mit Proportionalverhalten .....	135
5.2	Regler mit integralem Verhalten .....	138
5.3	Regler mit PI-Verhalten .....	141
5.4	Regler mit PD-Verhalten .....	146
5.5	Der PID-Regler .....	151
5.6	Übungen .....	158
<b>6</b>	<b>Anforderungen an einen Regelkreis .....</b>	<b>160</b>
6.1	Stabilität von Regelkreisen .....	160
6.2	Übungen .....	169
<b>7</b>	<b>Bestimmung von Reglern .....</b>	<b>171</b>
7.1	Integrale Gütekriterien .....	172
7.2	Praktische Entwurfsverfahren .....	174
7.2.1	Frequenzkennlinienverfahren .....	175
7.2.2	Kompensationsverfahren .....	179
7.2.2.1	Entwurf mit einem PI-Regler .....	180
7.2.2.2	Entwurf mit einem PID-Regler .....	183

7.2.3	Betragsoptimum .....	186
7.2.3.1	Ansatz des Betragsoptimums nach Typ 1.....	187
7.2.3.2	Ansatz des Betragsoptimums nach Typ 2.....	193
7.2.4	Allgemeine Optimierung nach dem Dämpfungsgrad .....	195
7.2.5	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum für Prozessstrecken.....	199
7.2.6	Symmetrisches Optimum .....	201
7.2.7	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols .....	206
7.2.7.1	Reglerbestimmung an der Stabilitätsgrenze .....	206
7.2.7.2	Reglerbestimmung mittels Sprungantwort nach Ziegler und Nichols.....	209
7.2.8	Reglerbestimmung mittels Sprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) .....	211
7.3	Vermaschte Regelkreise.....	213
7.3.1	Störgrößenaufschaltung.....	213
7.3.2	Vorregelung .....	215
7.3.3	Regelung mit Hilfsstellgröße.....	216
7.3.4	Kaskadenregelung.....	217
7.4	Übungen .....	220
<b>8</b>	<b>Unstetige Regler .....</b>	<b>222</b>
8.1	Zweipunktregler .....	223
8.2	Zweipunktregler mit $P-T_1$ - und Totzeitglied .....	229
8.3	Zweipunktregler mit Regelstrecken höherer Ordnung .....	233
8.4	Optimierung von Zweipunktreglern .....	235
8.4.1	Zweipunktregler mit Rückführung.....	235
8.4.2	Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung .....	236
8.5	Dreipunktregler.....	238
8.6	Übungen .....	244
<b>9</b>	<b>Digitale Regler .....</b>	<b>246</b>
9.1	Realisierung eines idealen PID-Reglers .....	249
9.1.1	P-Anteil .....	249
9.1.2	I-Anteil.....	250
9.1.3	D-Anteil.....	251
9.1.4	PID-Algorithmus .....	252
9.2	Der Bildbereich für Abtastsysteme.....	254
9.3	Der reale PID-Algorithmus.....	257
9.4	Wahl der Abtastperiode.....	259
9.5	Einstellregeln.....	259
9.6	Übungen .....	260

<b>10</b>	<b>Lösungen zu den Übungen .....</b>	<b>261</b>
	10.1 Einführung in die Regelungstechnik.....	261
	10.2 Das stationäre Verhalten von Regelkreisen .....	261
	10.3 Untersuchung von Übertragungsgliedern .....	263
	10.4 Regelstrecken .....	266
	10.5 Regeleinrichtungen .....	267
	10.6 Anforderungen an einen Regelkreis.....	270
	10.7 Bestimmung von Reglern.....	272
	10.8 Unstetige Regler .....	276
	10.9 Digitale Regler.....	278
	<b>Verwendete Formelzeichen .....</b>	<b>280</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>283</b>
	<b>Index .....</b>	<b>285</b>

**Ergänzendes Material auf <https://plus.hanser-fachbuch.de>:**

- Weiterführung zur komplexen Rechnung
- ausführliche Musterlösungen

# 1

## Einführung in die Regelungstechnik

Nach dem Durcharbeiten dieses Kapitels können Sie diese und weitere Fragen beantworten:

- Was unterscheidet eine Steuerung von einer Regelung?
- Welche Baugruppen gehören zu einem Regelkreis?
- Wie werden die Kenngrößen in der Regelungstechnik bezeichnet?
- Welche Darstellungsformen sind in der Regelungstechnik üblich?

Regelungsvorgänge spielen in der „Natur“ und in der Technik eine große Rolle. Eine Größe soll hierbei gezielt beeinflusst werden.

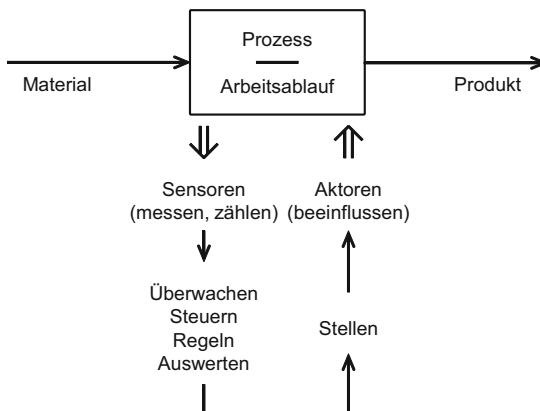
Ein Beispiel aus dem Bereich Natur ist unsere Körpertemperatur. Unabhängig von der Umgebungstemperatur und der körperlichen Verfassung soll sie nahezu konstant bleiben.

In der Technik kann die Temperatur in einem Rührkessel betrachtet werden. Auch hier soll die Temperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur und von einer eventuellen Schwankung der zu erwärmenden Produktmenge sein.

Der Eingriff in den Ablauf könnte von Hand erfolgen. Mit der technischen Entwicklung wurden diese Vorgänge aber weitgehend automatisiert. Laufen die Vorgänge in rechnergeregelten Produktionsprozessen ab, spricht man von Prozessautomatisierung.

Unter einem Prozess versteht man die Umwandlung, den Transport bzw. die Speicherung von Materie, Energie bzw. Information. Das bedeutet, dass es sich bei jedem Arbeitsablauf um einen Prozess handelt.

Soll ein Material zu einem bestimmten Produkt verarbeitet werden, wird der Arbeitsablauf ständig überwacht. Diese Arbeit übernehmen Sensoren. Sie erfassen bestimmte physikalische



**Bild 1.1** Der Prozess



Größen. Damit ist es möglich, den Ablauf zu kontrollieren oder zu dokumentieren. Wird dabei erkannt, dass ein weiterer Arbeitsschritt folgen soll, kann steuernd oder regelnd eingegriffen werden. Dazu müssen Geräte verstellt werden. Diese Aufgabe übernehmen Aktoren. Sie beeinflussen den Arbeitsablauf. Für einen Prozess sind damit bestimmte Techniken notwendig.

Prozessautomatisierung:

- Messtechnik
- Steuerungstechnik
- Regelungstechnik
- Informationstechnik

## ■ 1.1 Grundbegriffe der Regelungstechnik

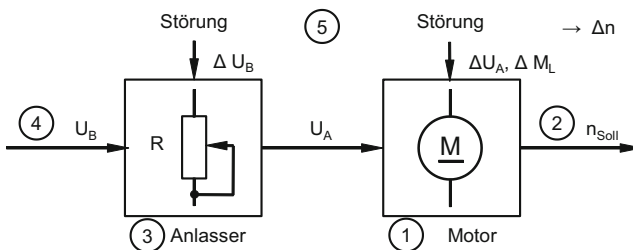
### 1.1.1 Steuern oder Regeln?

In der Regelungstechnik können die Begriffe „Steuern“ und „Regeln“ klar voneinander getrennt werden. Das soll am Beispiel der Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors verdeutlicht werden.

Forderung: Ein Gleichstrommotor soll mit einer bestimmten Drehzahl  $n_{\text{Soll}}$  laufen.

1. Dem Gleichstrommotor wird eine konstante Erregerspannung  $U_E$  zur Verfügung gestellt. Außerdem wird der Motor an eine Spannung  $U_A$  angeschlossen. Die Drehzahl der Gleichstrommaschine ist direkt abhängig von dieser Ankerspannung. Sie ist damit eine Eingangsgröße.
2. Der Motor dreht sich dann mit einer bestimmten Geschwindigkeit. Er hat jetzt eine bestimmte Drehzahl. Das ist die geforderte Ausgangsgröße  $n_{\text{Soll}}$ .
3. Werden unterschiedliche Drehzahlen am Ausgang gefordert, ist die einfachste Möglichkeit, die Drehzahl zu verändern, die Ankerspannung über einen Anlasser zu beeinflussen.
4. Die Eingangsgröße für diesen Spannungsteiler ist eine feste Betriebsspannung  $U_B$ .
5. Schwankt diese Betriebsspannung  $\Delta U_B$  oder ändert sich die Belastung des Motors  $\Delta M_L$ , wirkt sich das auf die Drehzahl aus. Diese Störungen bewirken eine Drehzahländerung  $\Delta n$ .

Bei der Anordnung in dem Bild 1.2 handelt es sich um eine Steuerung.



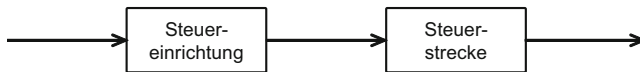
**Bild 1.2** Die Steuerung einer Drehzahl



## Steuerung

Die Steuerung ist ein offener Wirkungsablauf, bei dem ein Eingangssignal ein Ausgangssignal beeinflusst, Störungen aber nicht ausgeglichen werden.

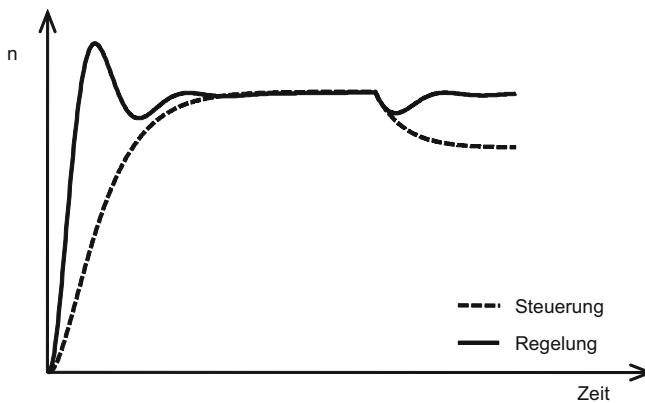
Die Struktur einer Steuerung ist die Steuerkette aus Bild 1.3. Ein Bestandteil ist die Steuerstrecke. Hierbei handelt es sich um das Objekt, das den gewünschten Prozess realisiert. Außerdem beinhaltet die Steuerkette eine Steuereinrichtung, die in der Lage ist, die Steuerstrecke im geforderten Maß zu beeinflussen.



**Bild 1.3** Die Steuerkette

Wird eine Aufgabenstellung durch eine Steuerung realisiert, könnte das Ergebnis, z. B. der Drehzahlregelung, den Verlauf in Bild 1.4 zeigen. Die Maschine läuft hoch und die Drehzahl pendelt sich auf einen Endwert ein. Wird der Motor belastet, sinkt die Drehzahl dauerhaft.

Diese Vorgehensweise ist für die Praxis nur sinnvoll, wenn das Verhalten der Strecke möglichst genau bekannt ist und gleich bleibt. Es sollten also keine Störungen zu erwarten sein. Ansonsten wird statt einer Steuerung eine Regelung verwendet. Hierbei wird erwartet, dass die Drehzahl nach einer kurzen Reaktion wieder auf den gewünschten Wert zurückgeht. Außerdem kann durch eine Regelung das Verhalten beim Ändern des Eingangssignals verbessert werden. Der Endwert kann wie im Bild 1.4 dargestellt schneller erreicht werden.



**Bild 1.4** Drehzahlverlauf

Um eine Regelung zu realisieren, muss die Ausgangsgröße messtechnisch erfasst werden. Damit ist es möglich, den tatsächlichen Wert mit dem gewünschten zu vergleichen. Anschließend wird nachgeregelt, das heißt das Ergebnis des Vergleichs beeinflusst das Eingangssignal. Die Ausgangsgröße wirkt so auf den Eingang zurück.



## Regelung

Bei einer Regelung wird die Ausgangsgröße ständig erfasst, mit dem Sollwert verglichen und auf den Eingang zurückgeführt. Es entsteht ein geschlossener Wirkungsablauf, der Regelkreis.

## 1.1.2 Die Größen des Regelkreises

Die auftretenden Größen in einem Regelkreis und dessen Bestandteile haben festgelegte Bezeichnungen. Diese sollen wieder am Beispiel einer Drehzahlregelung erläutert werden. Im Bild 1.5 ist das Technologieschema dieser Drehzahlregelung dargestellt. Hier ist keine konkrete Beschaltung zu entnehmen, sondern nur die prinzipielle Funktion. So lässt sich das Zusammenspiel von Ursache und Wirkung eindeutig erkennen.

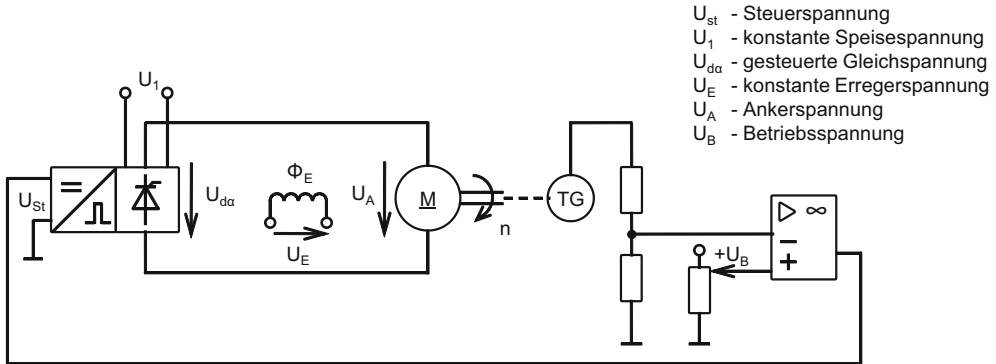


Bild 1.5 Drehzahlregelung

Der Erregerstrom soll auch bei dieser Regelung als konstant angenommen werden. Abgebildet ist eine fremderregte Gleichstrommaschine. Die einzige Eingangsgröße für den Motor ist damit die anliegende Ankerspannung. Heute sind stromrichterergespeiste Antriebe üblich. Hierbei wird eine anliegende Spannung im Mittel durch eine Thyristorschaltung verändert. Die Steuerspannung der Thyristoren wird somit zur Eingangsgröße.

Die Drehzahl ist hier die zu regelnde Größe und wird als **Regelgröße**  $x$  bezeichnet.

Die Regelgröße hat zu jedem Zeitpunkt einen tatsächlichen Wert, den Istwert  $x_i$ . Damit dieser Wert im Regelkreis weiterverarbeitet werden kann, wird er in eine elektrische Spannung umgewandelt. Das geschieht hier in der Messwerterfassung. Sie besteht aus Tachogenerator und Spannungsteiler. Die so erzeugte Größe wird als **Rückführgröße**  $r$  bezeichnet.

In einer Regelung wird ein bestimmter Sollwert  $x_s$  gefordert. Der gewünschte Wert wird in Form einer elektrischen Größe, der **Führungsgröße**  $w$ , dem Regelkreis zugeführt.

In einer Regelung müssen Soll- und Istwert miteinander verglichen werden. Im betrachteten Beispiel bildet der Differenzverstärker die Differenz von Führungsgröße und Rückführgröße, die **Regeldifferenz**  $e$ .

Die Regeldifferenz ist die eigentliche Eingangsgröße des Reglers. Im Regler wird die **Stellgröße**  $y$  erzeugt. Sie liefert die Energie, mit der nachgeregelt werden soll. In der Drehzahlregelung wird die Steuerspannung zur Veränderung des Zündwinkels der Thyristoren beeinflusst. So ändert sich die Ankerspannung des Motors und damit die Drehzahl, die Regelgröße. Der Wirkungsablauf ist geschlossen.

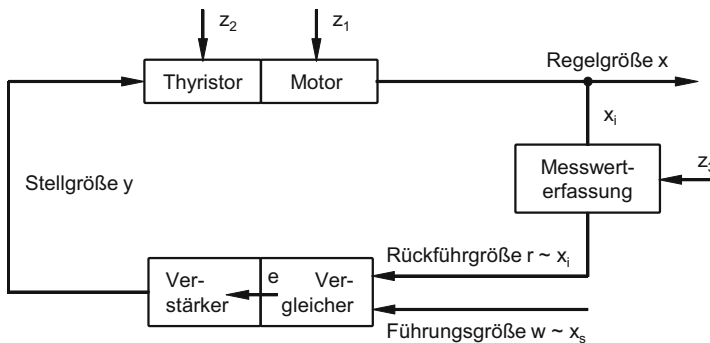
Bis hierhin gab es eine Eingangsgröße, die Führungsgröße, und eine Ausgangsgröße, die Regelgröße. Notwendig wird eine Regelung durch das Auftreten einer weiteren Eingangsgröße, der **Störgröße**  $z$ .

Unter Störgrößen werden Einflüsse verstanden, die die Regelgröße in unerwünschter Weise beeinflussen.

Im Beispiel der Drehzahlregelung könnten das sein:

- eine Änderung des Lastmoments
- eine Schwankung der Speisespannung der Thyristoren
- die Temperaturbeeinflussung der verwendeten Bauelemente

Damit kann im Bild 1.6 ein Wirkungsplan gezeichnet werden, aus dem die Wirkungsabläufe und die auftretenden Größen hervorgehen.



**Bild 1.6** Wirkungsplan der Drehzahlregelung

Im Beispiel der Drehzahlregelung treten folgende Größen auf:

- Die Regelgröße  $x$   
ist die von der Regelung zu beeinflussende Größe. Sie hat immer einen tatsächlichen Istwert  $x_i$ . Die Regelgröße  $x$  ist die Ausgangsgröße des Regelkreises.
- Die Rückführgröße  $r$   
geht aus der Messung der Regelgröße hervor. Sie entspricht dem Istwert  $x_i$ .

$$r \sim x_i$$

- Die Führungsgröße  $w$   
ist die Eingangsgröße des Regelkreises. Sie entspricht dem geforderten Sollwert  $x_s$ .

$$w \sim x_s$$

Bleibt die Führungsgröße über einen längeren Zeitraum konstant, handelt es sich um eine **Festwertregelung**.

Eine **Folgeregelung** besitzt dagegen einen Sollwert, der laufend verändert wird. So eine Regelung liegt bei einer lastabhängigen Drehzahlregelung einer Aufzugsteuerung vor.

- Die Regeldifferenz  $e$   
( $e$  – engl. error) ergibt sich aus der Differenz von Führungsgröße und Rückführgröße. Sie wird durch einen Vergleich gebildet und ist damit die eigentliche Eingangsgröße für den Regler.

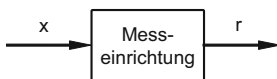
$$e = w - r$$

- Die Stellgröße  $y$   
überträgt die Wirkung des Reglers auf das zu beeinflussende Objekt.
- Die Störgröße  $z$   
beeinflusst die Regelgröße in unerwünschter Weise. Sie ist eine weitere Eingangsgröße des Regelkreises.

### 1.1.3 Die Regelkreisglieder

Im Wirkungsplan der Drehzahlregelung im Bild 1.6 ist zu erkennen, dass sich der Regelkreis in drei wesentliche Bestandteile zerlegen lässt.

**Die Messeinrichtung:** Die Messeinrichtung dient der Erfassung der Regelgröße  $x$  und der Umformung in ein Ausgangssignal, das sich im Regelkreis weiterverarbeiten lässt.



**Bild 1.7** Die Messeinrichtung als Regelkreisglied

Die Messwerterfassung hat damit zwei Aufgaben:

Zum einen dient sie zur Aufnahme der Messgröße und zur Umwandlung in ein für den Regler nutzbares Signal. Dabei wird eine Reihe von physikalischen Effekten genutzt. Diese Aufgabe übernimmt ein Sensor oder Messfühler. In der Elektrotechnik unterscheidet man je nach Wahl des betreffenden Fühlers aktive und passive Sensoren. Aktive Sensoren wandeln die nichtelektrische Energie am Eingang in elektrische Energie um. Passive Sensoren ändern dagegen beim Auftreten der Messgröße ihre elektrische Eigenschaft. Hierbei ist elektrische Hilfsenergie notwendig.

**Tabelle 1.1** Beispiele für Messwertaufnehmer

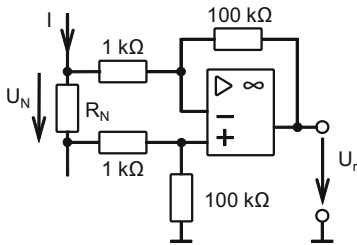
Zu messende Größe	Messwertaufnehmer
Drehzahl	Tachogenerator, Inkremental-Drehgeber
Drehmoment	Dehnungsmessstreifen, magnetoelastische Aufnehmer
Weg, Winkel	induktive und kapazitive Aufnehmer, Ultraschallsensoren, optische Aufnehmer
Temperatur	Thermoelement, Widerstandsthermometer (Metall, PTC und NTC)
Kraft, Druck	Dehnungsmessstreifen, Piezosensor
Strom	Nebenwiderstand, Stromwandler

Zum anderen soll die Messwerterfassung ein Signal erzeugen, das sich gut weiterverarbeiten lässt. In der Analogtechnik wurden dafür Normpegel festgelegt. Hier ist das Ausgangssignal häufig sehr klein. Dann muss es mithilfe eines Umformers auf einen normierten Wert, das Einheitssignal, verstärkt werden.

Wird als Einheitssignal eine Gleichspannung verwendet, liegt der Wertebereich zwischen 0 und 10V. Muss mit eingestreuten Störsignalen gerechnet werden, ist die Verwendung eines Gleichstromes als Einheitssignal sinnvoll. Hier sind zwei Messbereiche möglich. Entweder

kann der Bereich von 0 bis 20 mA oder von 4 bis 20 mA gewählt werden. Der zweite Bereich mit dem lebenden Nullpunkt bietet die Möglichkeit eine Funktionsstörung bei 0 mA sofort zu erkennen. Ist eine große Entfernung durch lange Leitungen zu überbrücken, wird das Ergebnis durch den eingepprägten Strom auch nicht durch einen Spannungsfall auf der langen Leitung verfälscht.

**Beispiel 1.1**



**Bild 1.8** Strommessung

Im Bild 1.8 ist eine Strommessung durch einen Nebenwiderstand mit einem Messverstärker realisiert. Welcher Zusammenhang ergibt sich zwischen der zu erfassenden Größe und der Rückführgröße?

**Lösung 1.1**

Der Strom ruft am Nebenwiderstand einen Spannungsfall hervor.

$$U_N = I \cdot R_N \tag{1}$$

Dieser Spannungsfall ist gerade die Differenzeingangsspannung für den als Differenzverstärker beschalteten Operationsverstärker.

$$U_a = -\frac{R_f}{R_e} \cdot U_{diff} \rightarrow U_r = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \cdot U_N$$

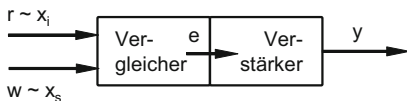
Mit der Gleichung (1) ergibt sich der Zusammenhang zwischen der aufgenommenen und der weiterzuverarbeitenden Größe.

$$U_r = -\frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \cdot I \cdot R_N \rightarrow U_r = -100 R_N \cdot I$$

■

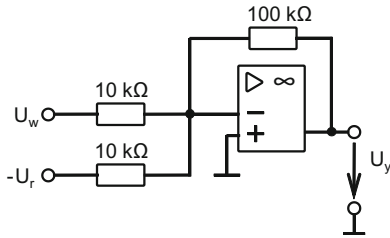
**Die Regeleinrichtung:** Die Regeleinrichtung hat zwei Aufgaben im Regelkreis.

Hier erfolgt der Vergleich zwischen Soll- und Istwert. Die Eingangsgrößen sind die Führungsgröße  $w$  und die Rückführgröße  $r$ . Die so gewonnene Regeldifferenz  $e$  wird anschließend auf einen für ein gutes Regelverhalten sinnvollen Wert verstärkt. Die Ausgangsgröße ist die Stellgröße  $y$ .



**Bild 1.9** Die Regeleinrichtung als Regelkreisglied

## Beispiel 1.2



**Bild 1.10** Operationsverstärker als Regeleinrichtung

Geben Sie den Zusammenhang zwischen der Ausgangsgröße und den Eingangsgrößen an.

## Lösung 1.2

Für den abgebildeten Summierverstärker aus dem Bild 1.10 lässt sich die Ausgangsspannung wie folgt berechnen.

$$U_a = - \left( \frac{R_f}{R_{e1}} \cdot U_{e1} + \frac{R_f}{R_{e2}} \cdot U_{e2} \right) \rightarrow U_y = - \frac{R_f}{R_e} (U_w - U_r)$$

Damit aus Führungs- und Rückführgröße die Differenz gebildet werden kann, muss eine dieser Größen immer invertiert am Eingang auftreten.

$$U_y = - \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} (U_w - U_r) \rightarrow U_y = -10 (U_w - U_r)$$

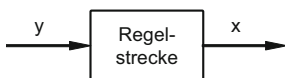
■

Dieses Beispiel gehört zu der Gruppe der stetigen Regler.

Bei **stetigen Regeleinrichtungen** kann die Ausgangsgröße, die Stellgröße  $y$ , im Stellbereich  $Y_h$  jeden beliebigen Wert annehmen. Die Regelgröße kann damit sehr genau auf einen bestimmten Sollwert eingestellt werden. Der Stellbereich wird durch die verwendete Regeleinrichtung bestimmt. Meist wird auch hier der Normpegel von 10 V gewählt.

Im Gegensatz dazu stehen die **unstetigen Regeleinrichtungen**, die nur wenige Zustände kennen. Ein Zweipunktregler liefert am Ausgang nur jeweils ein Signal für „Ein“ und „Aus“.

**Die Regelstrecke:** Die Regelstrecke kann in zwei Teile gegliedert werden. Die Eingangsgröße, die Stellgröße  $y$ , wird hier in die geforderte Regelgröße  $x$  umgeformt.



**Bild 1.11** Die Regelstrecke als Regelkreisglied

Die Regelstrecke ist der aufgabengemäß zu beeinflussende Teil des Regelkreises.

Bei dem Beispiel der Drehzahlregelung aus Bild 1.5 handelt es sich um den Motor. Er erzeugt durch die anliegende Spannung die Drehzahl.

Soll stattdessen die Temperatur in einem Kessel geregelt werden, stellen der Kessel und der benötigte Wärmetauscher die Strecke dar.

Am Eingang der Regelstrecke befindet sich das Stellglied. Es ist ein Bestandteil der Regelstrecke. Das Stellglied hat die Aufgabe, dem zu beeinflussenden Teil des Regelkreises die für die Regelaufgabe notwendige Energie zuzuführen. Liefert die Regeleinrichtung am Ausgang eine Stellgröße im Bereich von 0 bis 10V, reicht das häufig nicht aus, um die gewünschte Regelgröße zu erzeugen.

Im Beispiel der Drehzahlregelung benötigt der Motor eine höhere Ankerspannung. Hier muss das Stellglied eine Verstärkung bewirken.

Wird die Temperaturregelung betrachtet, würde die Stellgröße allein keine Temperaturänderung erzielen. Hier könnte die Stellgröße auf ein Ventil wirken, das die benötigte Menge an Heizdampf zur Verfügung stellt. In diesem Beispiel liefert das Stellglied auch eine andere Art der Energie.

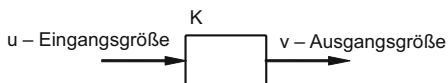
## ■ 1.2 Darstellung von Regelkreisen

Ein Regelkreis kann aus vielen Geräten und Baugruppen bestehen. Zur übersichtlichen Darstellung wählt man dazu einen Wirkungsplan. Dabei handelt es sich um die symbolische Darstellung der Wirkungsabläufe in einzelnen Blöcken, die durch Wirkungslinien miteinander verbunden werden.

### 1.2.1 Das Übertragungsglied

Jede Komponente des Regelkreises wird als Übertragungsglied betrachtet. Die Darstellung erfolgt als Rechteck, an dem die Beziehung zwischen Ein- und Ausgang angegeben werden kann. Ein- und Ausgangsgröße werden als Pfeil in der Signalflussrichtung gezeichnet.

Im Bild 1.12 ist der Übertragungsfaktor oder Übertragungsbeiwert  $K$  angefügt. Der Übertragungsbeiwert gibt an, welche Änderung die Ausgangsgröße eines Übertragungsglieds bei Variation der Eingangsgröße erfährt.



**Bild 1.12** Das Übertragungsglied

Die Darstellung und die Bezeichnungen entsprechen der zuständigen DIN EN 60027-6 (Steuerung- und Regelungstechnik) und DIN IEC 60050-351 (Leittechnik).

Verschiedene Übertragungsglieder können unterschiedliche Verhalten aufweisen.

Als Beispiel wird der Spannungsteiler aus dem Bild 1.13 betrachtet. Er dient zur Anpassung von hohen Spannungen.



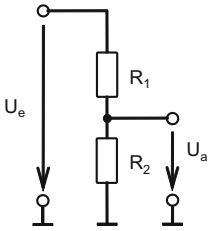


Bild 1.13 Spannungsteiler

Werden in einem Diagramm für verschiedene Eingangsspannungen die Teilspannungen aufgetragen, entsteht folgendes Bild 1.14.

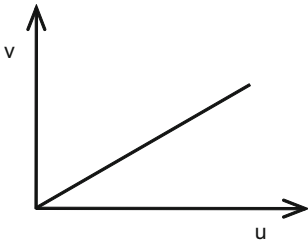


Bild 1.14 Kennlinie für ein lineares Übertragungsglied

Hier entsteht ein fester Zusammenhang zwischen Aus- und Eingang. Das Ergebnis ist eine Gerade, eine lineare Funktion. Es handelt sich hier um ein **lineares Übertragungsverhalten**. Dafür kann an jeder Stelle der gleiche Übertragungsfaktor berechnet werden.

$$K = \frac{v}{u} = \text{konstant}$$

Wird als Beispiel stattdessen eine Raumheizung gewählt, ändert sich der Zusammenhang im Diagramm wie im Bild 1.15 dargestellt.

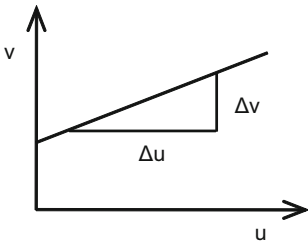


Bild 1.15 Lineares Übertragungsverhalten

Auch wenn noch keine Eingangsgröße  $u$  wirksam ist, ist schon eine Anfangstemperatur messbar. Wird angenommen, dass bei halber Ventilöffnung die Hälfte der maximalen Temperaturerhöhung erzielt wird, ist der Zusammenhang wieder linear. Zur Beschreibung müssen dann die Änderungen von Aus- und Eingangsgrößen betrachtet werden.

$$K = \frac{\Delta v}{\Delta u} = \text{konstant}$$

### Beispiel 1.3

Für einen Motor ist bekannt, dass er bei einer anliegenden Spannung von 400V mit einer Drehzahl von  $1200 \text{ min}^{-1}$  läuft. Stellen Sie den Motor als Übertragungsglied dar.

# Index

## A

Abtastperiode 248  
Abtastsystem 254  
Abtastvorgang 247  
Abtastzeit 248, 260  
Additionsstelle 22  
Amplitudengang 73  
Amplitudenrand 164, 176  
Amplitudenreserve 164, 176  
Änderungsgeschwindigkeit 146  
Anfangswertsatz 81  
Anregelzeit 166, 176, 197  
Anstieg 146  
Anstiegsantwort 147  
Anstiegszeit 181  
aperiodischer Grenzfall 109  
Asymptote 67, 97  
Ausgleich mit 88  
Ausgleich ohne 117  
Ausgleichsvorgang 43, 93, 99  
Ausgleichszeit 100  
Ausregelzeit 166, 196  
äußerer Regler 217

## B

betragslineare Regelfläche 173  
Betragsoptimum 186, 199  
Betragsreserve 164  
bezogener Regelfehler 50  
Bildbereich 74  
bleibende Regeldifferenz 49  
Bode-Diagramm 63

## C

Chien, Hrones und Reswick (CHR) 211

## D

Dämpfung 108, 111  
Dämpfungsgrad 195  
Dezibel 64  
Differenzenbetrachtung 250  
Differenzgleichung 253  
Differenziationsatz 84  
differenzielles Verhalten 146  
Differenzierbeiwert 146  
Drehzahlregelung 18  
Dreipunktregler 238  
Durchtrittsfrequenz 176  
Durchtrittskreisfrequenz 164  
D-Verhalten 146  
dynamischer Übertragungsfaktor 21  
dynamisches Verhalten 78

## E

e-Funktion 78, 92  
Einheit 95  
Einschwingfrequenz 108  
Einstellparameter 156  
Einstellregeln 175, 238, 259  
Einstellvorschriften nach ZN 210  
elementarer Regelkreis 29  
EMSR-Kennzeichnung 32  
Endwertsatz 81  
Energiespeicher 99, 124  
Ersatzzeitkonstante 101, 111  
erweiterte Regelstrecke 29, 161

## F

Fehlerschlauch 166  
Festwertregelung 15  
Fließbild 31  
Folgeregelung 15  
Frequenzgang 62

Frequenzkennlinienverfahren 175, 179  
Führungsgröße 15  
Führungsübertragungsfunktion 48  
Führungsverhalten 46

**G**

Gesamtfrequenzgang 69  
Gesamtübertragungsfaktor 44  
Geschwindigkeitsalgorithmus 253  
Grad der Strecke 99  
Grenzfrequenz 96  
Grundelemente 68  
Gütekriterien 171

**H**

Hilfsenergie 134  
Hilfsstellgröße 216  
Hysterese 224

**I**

Imaginärteil 75, 96  
innerer Regler 217  
instabil 161  
Integralkriterium 173  
Integrierbeiwert 119, 138  
Integrierglied 118  
Integrierzeit 119, 138, 139  
invertiertes P-T<sub>1</sub>-Verhalten 145  
I-Regler 138  
I-T<sub>1</sub>-Verhalten 127  
I-Verhalten 118

**K**

Kaskadenregelung 217  
Kennfrequenz 115  
Knickfrequenz 66, 146  
Koeffizienten 253  
Koeffizientenvergleich 99, 143  
Kompensationsverfahren 179  
konjugiert komplex 95  
Korrespondenztabelle 81  
Kreisverstärkung 44, 138

kritische Kreisfrequenz 164, 176  
kritische Verstärkung 206

**L**

Laplace-Operator 74, 95  
Laplace-Transformation 80, 254  
Laplace-Transformierte 80  
Laplace-Variable 80  
lineare Regelfläche 173  
lineares Übertragungsverhalten 20

**M**

Messeinrichtung 16  
Messwertaufnehmer 16  
Mittelwert 225  
Modellbildung 98

**N**

Nachstellzeit 141  
nichtlineares Übertragungsverhalten 21  
Normalform 94  
normierter Integrierbeiwert 119  
normierter Übertragungsfaktor 22  
Normpegel 16  
Nyquist-Kriterium 161

**O**

offener Regelkreis 44  
Ortskurve 74, 95

**P**

PD-Regler 147, 150  
Phasenlineal 67  
Phasenrand 164, 176  
Phasenreserve 164, 168, 176  
Phasenverschiebung 96  
PID-T<sub>1</sub>-Regelalgorithmus 258  
PID-Verhalten 151  
PI-Regler 141  
Produktform 155  
proportional 89

Proportionalbeiwert 89  
 Proportionalbereich 136  
 proportionales Übertragungsverhalten 89  
 Prozess 11  
 Prozessidentifikation 199  
 Prozessparameter 199  
 P-T<sub>1</sub>-Glied 74  
 P-T<sub>1</sub>-Verhalten 92  
 P-T<sub>2</sub>-Verhalten 108  
 P-T<sub>n</sub>-Verhalten 101  
 P-T<sub>T</sub>-Verhalten 114  
 P-Verhalten 89  
 Pythagoras 96

## Q

quadratische Regelfläche 174  
 Quantisierung 247  
 Quantisierungsfehler 247

## R

Realteil 75, 96  
 Regelabweichung 231  
 Regelalgorithmus 249  
 Regelbarkeit 116  
 Regeldifferenz 15, 49  
 Regeleinrichtung 17, 134  
 Regelfaktor 53  
 Regelgröße 15  
 Regelparameter 156  
 Regelstrecke 18, 88  
 Regelstrecke mit Ausgleich 88  
 Regelung 13  
 Reglereinstellung nach CHR 212  
 Reglerzuordnung 175  
 Reihenschaltung 101  
 Resonanzüberhöhung 176  
 Rückführgröße 15  
 Rückführung 28, 128, 235

## S

Schaltdifferenz 224  
 Schaltfrequenz 227, 234  
 Schaltperiode 227

Schaltzeit 229  
 Schrittreger 240  
 Schwankungsbreite 231, 234  
 Simulationsprogramm 98  
 Sprungfunktion 78  
 Stabilität 160  
 Stabilitätsgrenze 206  
 stationärer Regelfehler 49  
 stationärer Zustand 81  
 Stellbereich 136  
 Stellglied 19  
 Stellgrad 230  
 Stellgröße 16  
 Stellungsalgorithmus 253  
 stetige Regeleinrichtungen 18  
 stetige Regler 135  
 Steuerung 12  
 Störgröße 16, 52, 56  
 Störgrößenaufschaltung 213  
 Störübertragungsfunktion 53, 57  
 Störverhalten 51  
 Summenform 153  
 symmetrisches Optimum 201

## T

Tangente 93  
 Testsignal 61  
 Toleranzbereich 166  
 Totzeit 101, 113, 233  
 Totzeitverhalten 229  
 Totzone 239

## U

Übergangsbereich 78  
 Übergangsfunktion 90  
 Überschussleistung 227  
 Überschwingen 168  
 Überschwingweite 108, 165, 195  
 Übertragungsbeiwert 19  
 Übertragungsfaktor 20  
 Übertragungsfunktion 74  
 Übertragungsglied 19  
 unstetige Regeleinrichtungen 18  
 unstetige Regler 135  
 unterlagert 217

**V**

Vereinfachung von Wirkungsplänen 26  
verzögert-nachgebende Rückführung 236  
Verzögerung 124  
Verzögerungsglied 92  
Verzugszeit 100, 229, 234  
Verzweigungsstelle 22  
Vorfilter 204  
Vorhaltverstärkung 153  
Vorhaltzeit 147  
Vorregelung 215

**W**

Wendetangente 100  
Wendetangentenverfahren 101  
Wirkungslinien 22  
Wirkungsplan 19, 30

**Z**

Zeitkonstante 93  
Zeit-Prozent-Verfahren 104, 199  
Ziegler-Nichols 206  
z-Transformation 254  
Zweipunktregler 223