



Leseprobe

Thomas Beier, Petra Wurl

Regelungstechnik

Basiswissen, Grundlagen, Beispiele

ISBN (Buch): 978-3-446-44210-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-44393-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44210-8>

sowie im Buchhandel.

## Vorwort zur 2. Auflage

Die Autoren freuen sich über die positive Resonanz des Buches bei den Lesern. Die Rückmeldungen haben uns gezeigt, dass wir das Buch genau für unsere Zielgruppe geschrieben haben. In den Fachhochschulen wird das Buch verstärkt zu Prüfungsvorbereitungen herangezogen. Die einzelnen Abschnitte des Buches wurden sehr aufmerksam gelesen und wir haben die konstruktiven Anregungen und Vorschläge in die 2. Auflage einfließen lassen. Der Übungsanteil mit Lösungen wurde in fast allen Kapiteln verstärkt. Das Kapitel Digitale Regler wurde überarbeitet. Neu hinzugekommen ist das Thema Schrittreger. Wir möchten die Leser weiterhin ermutigen, uns ihre 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 Lektoren-Team des Hanser Verlags.

*Berlin, im Oktober 2014*

*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	Übungen .....	32
<b>2</b>	<b>Das stationäre Verhalten von Regelkreisen .....</b>	<b>34</b>
2.1	Die Kreisverstärkung .....	35
2.2	Das Führungsverhalten .....	37
2.3	Der stationäre Regelfehler .....	40
2.4	Das Störverhalten .....	42
2.4.1	Störgrößen im Vorwärtszweig .....	43
2.4.2	Störgrößen in der Rückführung .....	47
2.5	Übungen .....	50
<b>3</b>	<b>Untersuchung von Übertragungsgliedern .....</b>	<b>53</b>
3.1	Das Bode-Diagramm .....	55
3.2	Reihenschaltung von Frequenzgängen .....	61
3.3	Übertragungsfunktion .....	66
3.4	Ortskurve .....	66
3.5	Untersuchung im Zeitbereich .....	70
3.6	Die Laplace-Transformation .....	72
3.7	Modellbildung und Simulation .....	76
3.8	Übungen .....	79

<b>4</b>	<b>Regelstrecken</b> .....	<b>80</b>
4.1	Regelstrecken mit Ausgleich .....	80
4.1.1	Regelstrecken mit Ausgleich ohne Verzögerung .....	81
4.1.2	Verzögerungsglieder erster Ordnung .....	84
4.1.3	Verzögerungsglieder höherer Ordnung .....	91
4.1.4	Verzögerungsglieder zweiter Ordnung .....	100
4.1.5	Regelstrecken mit Totzeitverhalten .....	104
4.2	Regelstrecken ohne Ausgleich .....	108
4.2.1	Regelstrecken ohne Ausgleich und ohne Verzögerung .....	108
4.2.2	Regelstrecken ohne Ausgleich mit Verzögerung .....	115
4.3	Zusammengesetzte Regelstrecken .....	119
4.4	Übungen .....	122
<b>5</b>	<b>Regeleinrichtungen</b> .....	<b>125</b>
5.1	Regler mit Proportionalverhalten .....	126
5.2	Regler mit integralem Verhalten .....	129
5.3	Regler mit PI-Verhalten .....	132
5.4	Regler mit PD-Verhalten .....	137
5.5	Der PID-Regler .....	142
5.6	Übungen .....	149
<b>6</b>	<b>Anforderungen an einen Regelkreis</b> .....	<b>151</b>
6.1	Stabilität von Regelkreisen .....	151
6.2	Übungen .....	160
<b>7</b>	<b>Bestimmung von Reglern</b> .....	<b>162</b>
7.1	Integrale Gütekriterien .....	163
7.2	Praktische Entwurfsverfahren .....	165
7.2.1	Frequenzkennlinienverfahren .....	166
7.2.2	Kompensationsverfahren .....	170
7.2.2.1	Entwurf mit einem PI-Regler .....	171
7.2.2.2	Entwurf mit einem PID-Regler .....	174
7.2.3	Betragsoptimum .....	177
7.2.3.1	Ansatz des Betragsoptimums nach Typ 1 .....	178
7.2.3.2	Ansatz des Betragsoptimums nach Typ 2 .....	184
7.2.4	Allgemeine Optimierung nach dem Dämpfungsgrad .....	186
7.2.5	Reglerentwurf nach dem Betragsoptimum für Prozessstrecken .....	190
7.2.6	Symmetrisches Optimum .....	192

7.2.7	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols .....	197
7.2.7.1	Reglerbestimmung an der Stabilitätsgrenze .....	197
7.2.7.2	Reglerbestimmung mittels Sprungantwort nach Ziegler und Nichols .....	200
7.2.8	Reglerbestimmung mittels Sprungantwort nach Chien, Hrones und Reswick (CHR) .....	202
7.3	Vermaschte Regelkreise .....	204
7.3.1	Störgrößenaufschaltung .....	204
7.3.2	Vorregelung .....	205
7.3.3	Regelung mit Hilfsstellgröße .....	206
7.3.4	Kaskadenregelung .....	207
7.4	Übungen .....	210
<b>8</b>	<b>Unstetige Regler .....</b>	<b>212</b>
8.1	Zweipunktregler .....	213
8.2	Zweipunktregler mit P-T <sub>1</sub> - und Totzeitglied .....	219
8.3	Zweipunktregler mit Regelstrecken höherer Ordnung .....	223
8.4	Optimierung von Zweipunktreglern .....	225
8.4.1	Zweipunktregler mit Rückführung .....	225
8.4.2	Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung .....	226
8.5	Dreipunktregler .....	228
8.6	Übungen .....	234
<b>9</b>	<b>Digitale Regler .....</b>	<b>236</b>
9.1	Realisierung eines idealen PID-Reglers .....	239
9.1.1	P-Anteil .....	239
9.1.2	I-Anteil .....	240
9.1.3	D-Anteil .....	241
9.1.4	PID-Algorithmus .....	242
9.2	Der Bildbereich für Abtastsysteme .....	244
9.3	Der reale PID-Algorithmus .....	246
9.4	Wahl der Abtastperiode .....	248
9.5	Einstellregeln .....	249
9.6	Übungen .....	249
<b>10</b>	<b>Lösungen zu den Übungen .....</b>	<b>251</b>
10.1	Einführung in die Regelungstechnik .....	251
10.2	Das stationäre Verhalten von Regelkreisen .....	251

10.3 Untersuchung von Übertragungsgliedern .....	253
10.4 Regelstrecken.....	256
10.5 Regeleinrichtungen .....	257
10.6 Anforderungen an einen Regelkreis .....	260
10.7 Bestimmung von Reglern.....	262
10.8 Unstetige Regler .....	266
10.9 Digitale Regler.....	268
<b>Verwendete Formelzeichen .....</b>	<b>270</b>
<b>Literatur.....</b>	<b>273</b>
<b>Index.....</b>	<b>275</b>

# 2

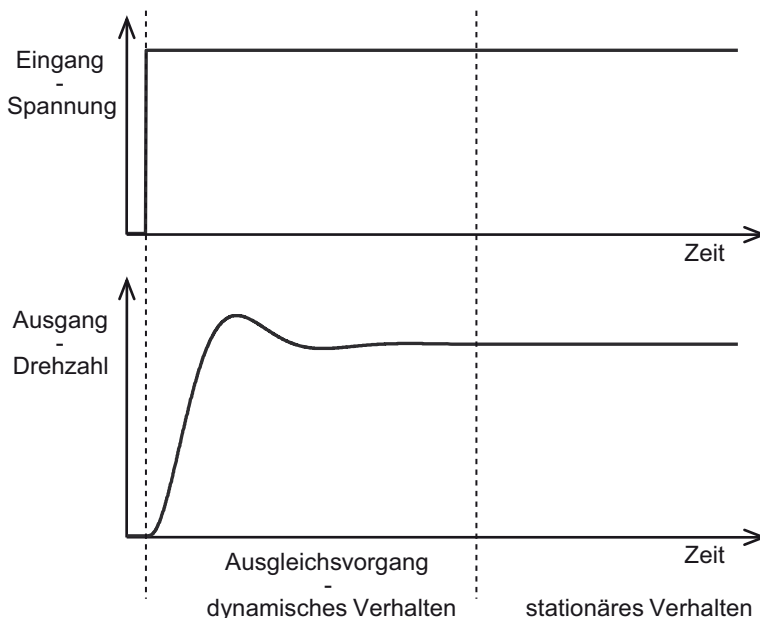
## Das stationäre Verhalten von Regelkreisen

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

- Welchen Wert erreicht die Regelgröße im Regelkreis?
- Gibt es eine Abweichung zwischen Soll- und Istwert?
- Werden Störungen wirklich ausgeglet?
- Spielt es eine Rolle, an welcher Stelle die Störgröße angreift?

Von einem Regelkreis wird erwartet, dass sich eine Regelgröße einstellt, die dem Sollwert entspricht. Das soll möglichst schnell geschehen. Außerdem sollen auftretende Störgrößen gleich wieder ausgeglichen werden.

Wird die Drehzahl beim Einschalten einer elektrischen Maschine aufgezeichnet, könnte möglicherweise der folgende Verlauf beobachtet werden.



**Bild 2.1** Einschaltvorgang

Im Bild 2.1 ist zu erkennen, dass es eine bestimmte Zeit dauert, bis die Ausgangsgröße den Endwert erreicht hat. Danach herrscht immer ein fester Zusammenhang zwischen Ausgang und Eingang – das stationäre Verhalten. Bis dahin findet ein Ausgleichsvorgang statt. Hier ändert sich die betrachtete Größe mit der Zeit – das dynamische Verhalten.

Diese Übergangszustände treten immer auf, wenn Energiespeicher vorhanden sind. Sie sollen an dieser Stelle aber nicht betrachtet werden. Im stationären Betrieb interessieren alle Größen im Ruhezustand. Das sind die Werte, die sich nach Beendigung des Ausgleichsvorgangs zur Zeit  $t \rightarrow \infty$  einstellen.

## 2.1 Die Kreisverstärkung

Zur einfachen und doch eindeutigen Beschreibung von Regelgrößen sind Kennwerte sinnvoll. Um die Auswirkungen auf einen Regelkreis genauer betrachten zu können, wird der Regelkreis vom Bild 2.2 gedanklich aufgetrennt. Die Trennung erfolgt vor der Additionsstelle, also vor der Vergleichsstelle von Führungsgröße und Rückführgröße. Hierbei interessiert, welche Veränderung ein Signal erfährt, wenn es sämtliche Übertragungsglieder der Reihe nach durchläuft. So entsteht das Blockschaltbild in Bild 2.3.

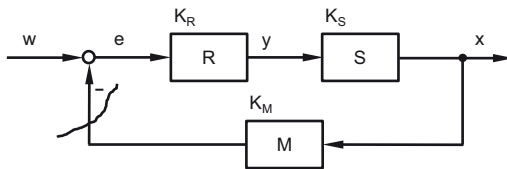


Bild 2.2 Der elementare Regelkreis

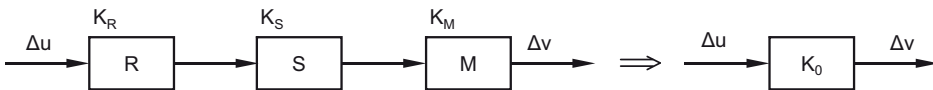


Bild 2.3 Der offene Regelkreis

Gefragt ist das Verhältnis vom Ausgangs- zum Eingangssignal. Dafür werden alle Übertragungsglieder zu einem Übertragungsblock zusammengefasst.

Da alle Übertragungsglieder in Reihe liegen, ergibt sich der Gesamtübertragungsfaktor durch eine Multiplikation. Es entsteht der Gesamtübertragungsfaktor bzw. die Kreisverstärkung  $K_0$ .

### Kreisverstärkung

$$K_0 = \frac{\Delta v}{\Delta u} = K_R \cdot K_S \cdot K_M \quad (2.1)$$



### Kreisverstärkung

Die Kreisverstärkung  $K_0$  ist die Verstärkung, die ein Signal  $u$  erfährt, wenn es den gesamten offenen Regelkreis durchläuft. Sie ist das Produkt der Übertragungsfaktoren sämtlicher Regelkreisglieder. Die Kreisverstärkung ist der Gesamtübertragungsfaktor für den offenen Regelkreis. Sie ist immer einheitslos.

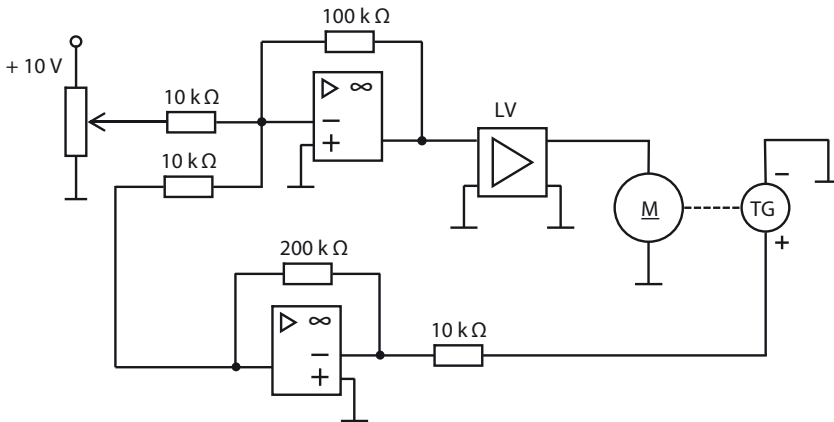


Die Kreisverstärkung ergibt sich als einheitslose Größe. Das muss auch so sein, da der Regelkreis an der Additionsstelle aufgetrennt wurde und nur einheitsgleiche Größen addiert werden dürfen.

**Beispiel 2.1**

Am Beispiel einer Drehzahlregelung soll die Kreisverstärkung berechnet werden.

- Leistungsverstärker:  $V_U = 2$
- Motor:  $U_{AN} = 20V$   
 $n_N = 2000 \text{ min}^{-1}$
- Tachogenerator:  $U_{TG} = 0,5V$  bei  $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

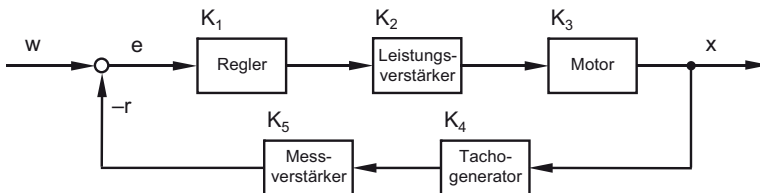


**Bild 2.4** Wirkplan einer Drehzahlregelung

**Lösung 2.1**

**1. Schritt:** Entwicklung eines Blockschaltbildes

Die Regelgröße, die Drehzahl, wird von dem Tachogenerator in eine Spannung umgewandelt. Zusammen mit dem nachgeschalteten Operationsverstärker stellt er die Messwertfassung dar. Das Signal gelangt anschließend an einen Summierer, die Regeleinrichtung. Der Leistungsverstärker arbeitet als Stellglied für die Regelstrecke, den Motor. So entsteht folgendes Blockschaltbild:



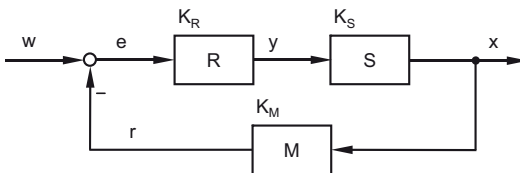
**Bild 2.5** Blockschaltbild einer Drehzahlregelung

**2. Schritt:** Bestimmung der Übertragungsfaktoren

Regler:	$K_1 = \frac{R_f}{R_e} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega}$	$K_1 = 10$
Leistungsverstärker:	gegeben	$K_2 = 2$
Motor:	$K_3 = \frac{n_N}{U_{AN}} = \frac{2000 \text{ min}^{-1}}{20 \text{ V}}$	$K_3 = 100 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$
Tachogenerator:	$K_4 = \frac{U_{TG}}{n} = \frac{0,5 \text{ V}}{1000 \text{ min}^{-1}}$	$K_4 = 0,0005 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}}$
Messverstärker:	$K_5 = \frac{R_f}{R_e} = \frac{200 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega}$	$K_5 = 20$

**3. Schritt:** Zusammenfassung zum elementaren Regelkreis

Hier werden die Übertragungsglieder so weit zusammengefasst, dass der Regelkreis nur noch aus den drei Regelkreisgliedern der Regeleinrichtung, der Regelstrecke und der Messwerterfassung besteht.



**Bild 2.6** Die Drehzahlregelung als elementarer Regelkreis

Regeleinrichtung:	$K_R = K_1 = 10$	$K_R = 10$
Regelstrecke:	$K_S = K_2 \cdot K_3 = 2 \cdot 100 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$	$K_S = 200 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$
Messwerterfassung:	$K_M = K_4 \cdot K_5 = 0,0005 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}} \cdot 20$	$K_M = 0,01 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}}$

**4. Schritt:** Berechnung der Kreisverstärkung

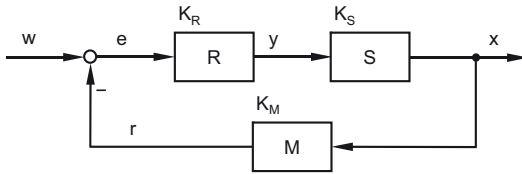
$$K_0 = K_R \cdot K_S \cdot K_M = 10 \cdot 200 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}} \cdot 0,01 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}} \quad K_0 = 20$$

## ■ 2.2 Das Führungsverhalten

Das Führungsverhalten beschreibt das Verhalten der Regelgröße  $x$  unter dem Einfluss der Führungsgröße  $w$ . Die Führungsgröße stellt hierbei die alleinige Eingangsgröße dar, Störgrößen werden dabei nicht betrachtet.

Ein allgemeingültiger Zusammenhang von  $\frac{\Delta x}{\Delta w}$  soll am elementaren Regelkreis hergeleitet werden.

**1. Schritt:** Dazu werden alle bekannten Zusammenhänge vom elementaren Regelkreis festgehalten.



**Bild 2.7** Der elementare Regelkreis

$$e = w - r \quad (1)$$

$$K_R = \frac{y}{e} \quad (2)$$

$$K_S = \frac{x}{y} \quad (3)$$

$$K_M = \frac{r}{x} \quad (4)$$

**2. Schritt:** Die Gleichungen werden sinnvoll miteinander verknüpft.

(3) wird umgestellt nach  $y$

$$y = \frac{x}{K_S} \quad (5)$$

(5) wird eingesetzt in (2)

$$K_R = \frac{y}{e} = \frac{x}{K_S \cdot e}$$

und umgestellt nach  $e$

$$e = \frac{x}{K_R \cdot K_S} \quad (6)$$

(4) wird umgestellt nach  $r$

$$r = x \cdot K_M \quad (7)$$

(6) und (7) werden eingesetzt in (1)

$$\frac{x}{K_R \cdot K_S} = w - x \cdot K_M$$

und umgestellt nach  $x$

$$x = w \cdot K_R \cdot K_S - x \cdot K_R \cdot K_S \cdot K_M$$

mit  $K_0 = K_R \cdot K_S \cdot K_M$  wird

$$x = w \cdot K_R \cdot K_S - x \cdot K_0$$

$$x + x \cdot K_0 = w \cdot K_R \cdot K_S$$

$$x(1 + K_0) = w \cdot K_R \cdot K_S$$

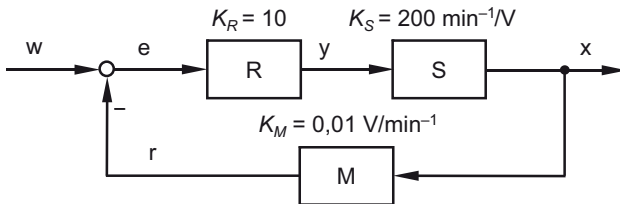
Für das Führungsverhalten entsteht damit die Führungsübertragungsfunktion  $F_w$ .

### Führungsübertragungsfunktion

$$F_w = \frac{x}{w} = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_0} \quad (2.2)$$

### Beispiel 2.2

- Am Beispiel der Drehzahlregelung mit dem elementaren Regelkreis aus Bild 2.8 soll die Führungsübertragungsfunktion  $F_w$  bestimmt werden.
- Welche Führungsgröße  $w$  ist erforderlich, um eine Motordrehzahl von  $500 \text{ min}^{-1}$  zu erreichen?



**Bild 2.8** Die Drehzahlregelung als elementarer Regelkreis

### Lösung 2.2

**1. Schritt:** Die Kreisverstärkung  $K_0$  wird berechnet.

$$K_0 = K_R \cdot K_S \cdot K_M = 10 \cdot 200 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}} \cdot 0,01 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}} \quad K_0 = 20$$

**2. Schritt:** Damit lässt sich die Führungsübertragungsfunktion  $F_w$  bestimmen.

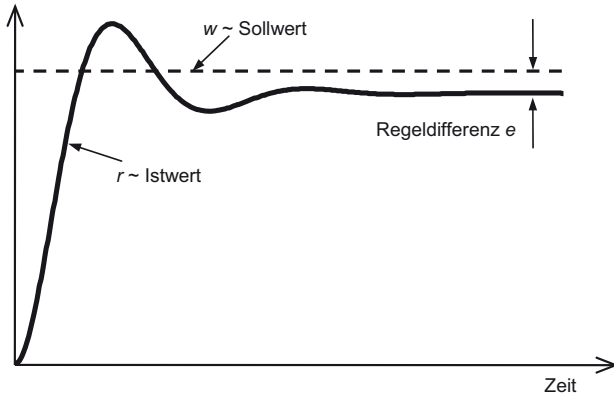
$$F_w = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_0} = \frac{10 \cdot 200 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}}{1 + 20} \quad F_w = 95,24 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$$

**3. Schritt:** Aus der Führungsübertragungsfunktion  $F_w$  folgt die Führungsgröße  $w$ .

$$F_w = \frac{x}{w} \rightarrow w = \frac{x}{F_w} = \frac{500 \text{ min}^{-1}}{95,24 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}} \quad w = 5,25 \text{ V}$$

## ■ 2.3 Der stationäre Regelfehler

In einem Regelkreis wird der Sollwert durch die Führungsgröße  $w$  vorgegeben. Die tatsächliche Regelgröße  $x$ , der Istwert, wird als rückgeführte Größe  $r$  der Vergleichsstelle zugeführt. Hier ergibt sich eine Abweichung zwischen dem geforderten und dem tatsächlichen Wert. Diese Regeldifferenz  $e$ , dargestellt im Bild 2.9, bleibt für den hier verwendeten Regler erhalten und wird daher als stationärer Regelfehler bezeichnet.



**Bild 2.9** Die Regeldifferenz

Im Folgenden wird eine Gleichung für den Regelfehler hergeleitet.

Aus der Führungsübertragungsfunktion  $F_w$  ergibt sich die Regelgröße  $x$ .

$$F_w = \frac{x}{w} = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_0} \quad x = w \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_0}$$

Durch den Übertragungsfaktor der Messwerterfassung kann die Regelgröße  $x$  ersetzt werden.

$$K_M = \frac{r}{x} \quad x = \frac{r}{K_M} \quad \rightarrow \quad \frac{r}{K_M} = w \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_0}$$

Daraus ergibt sich die rückgeführte Größe  $r$ .

$$r = w \frac{K_R \cdot K_S \cdot K_M}{1 + K_0} = w \frac{K_0}{1 + K_0}$$

Der gewonnene Ausdruck wird eingesetzt in die Gleichung für die Vergleichsstelle.

$$e = w - r = w - w \frac{K_0}{1 + K_0} = w \frac{1 + K_0}{1 + K_0} - w \frac{K_0}{1 + K_0} = \frac{w + wK_0 - wK_0}{1 + K_0} = \frac{w}{1 + K_0}$$

Damit entsteht der folgende Ausdruck für die bleibende Regeldifferenz.

### **Bleibende Regeldifferenz oder stationärer Regelfehler**

$$e = \frac{w}{1 + K_0}$$

(2.3)

Diese Angabe wird aussagekräftiger, wenn sie auf die Führungsgröße  $w$  bezogen und in Prozenten angegeben wird.

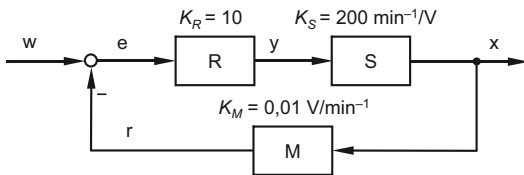
### Bezogener Regelfehler

$$\frac{e}{w} = \frac{1}{1 + K_0} \quad \text{Angabe in \%} \quad (2.4)$$

### Beispiel 2.3

Am Beispiel der Drehzahlregelung mit dem elementaren Regelkreis aus Bild 2.10 soll der stationäre und der bezogene Regelfehler berechnet werden.

Diese Werte sollen für die maximale Führungsgröße von 10 V und für das Ergebnis aus dem Beispiel 2.2 ( $w = 5,25$  V) berechnet werden.



**Bild 2.10** Die Drehzahlregelung als elementarer Regelkreis

### Lösung 2.3

**1. Schritt:** Die Kreisverstärkung  $K_0$  wird berechnet.

$$K_0 = K_R \cdot K_S \cdot K_M = 10 \cdot 200 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}} \cdot 0,01 \frac{\text{V}}{\text{min}^{-1}} \quad K_0 = 20$$

**2. Schritt:** Es folgt die Berechnung des stationären Regelfehlers

$$\begin{array}{ll} \text{für } w = 10 \text{ V} & \text{für } w = 5,25 \text{ V} \\ e = \frac{w}{1 + K_0} = \frac{10 \text{ V}}{1 + 20} & e = \frac{w}{1 + K_0} = \frac{5,25 \text{ V}}{1 + 20} \\ e = 0,476 \text{ V} & e = 0,25 \text{ V} \end{array}$$

**3. Schritt:** Die Berechnung des bezogenen Regelfehlers ergibt

$$\begin{array}{ll} \frac{e}{w} = \frac{0,476 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 0,0476 & \frac{e}{w} = \frac{0,25 \text{ V}}{5,25 \text{ V}} = 0,0476 \\ \frac{e}{w} = 4,8 \% & \frac{e}{w} = 4,8 \% \end{array}$$

An den Ergebnissen wird deutlich, dass der Wert für den stationären Regelfehler nicht aussagekräftig ist. Es ist nicht deutlich zu erkennen, wie nahe die Regelgröße an den Sollwert herankommt. Dazu ist der bezogene Regelfehler wesentlich besser geeignet.

Der bezogene Regelfehler ist offensichtlich unabhängig von der Regelgröße. Für unterschiedliche Führungsgrößen ergibt sich der gleiche Wert. Schon in der Formel (2.4) ist zu erkennen, dass der bezogene Regelfehler nur von der Kreisverstärkung abhängt. Da die Regelstrecke mit

der Messwerterfassung als gegeben betrachtet werden kann, ist der bezogene Regelfehler offenbar von der Verstärkung der Releinrichtung abhängig.



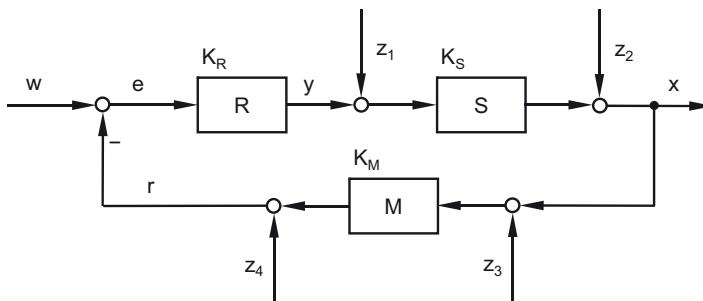
### Regelfehler

Ein größerer Übertragungsfaktor des Reglers in technisch sinnvollen Grenzen bewirkt eine größere Kreisverstärkung und damit einen kleineren Regelfehler.

## 2.4 Das Störverhalten

Der Einsatz einer Regelung ist gerade dann sinnvoll, wenn mit dem Auftreten von Einflüssen zu rechnen ist, die den Prozess in unerwünschter und häufig auch unkontrollierter Weise beeinflussen. Die Regelgröße soll beim Wirken dieser Störgrößen möglichst schnell und fehlerlos wieder den Wert annehmen, den sie vor dem Auftreten der Störgröße hatte.

Wie im Bild 2.11 dargestellt, können Störgrößen an jeder Stelle eines Regelkreises auftreten.



**Bild 2.11** Störgrößen im Regelkreis

Häufig werden in Regelkreisen Operationsverstärker eingesetzt. Dabei ist es möglich, dass sich infolge innerer Unsymmetrien Ausgleichsspannungen einstellen. Werden diese Offsetspannungen nicht vollständig kompensiert, können sie zu einer Störgröße im Regelkreis werden.

Praktisch alle Bauelemente reagieren auf ihre Umgebungstemperatur. Dieser Einfluss führt häufig zu einer Störgröße im Regelkreis.

Die verwendete Gleichstrommaschine aus dem Beispiel 2.1 nimmt im Leerlauf eine bestimmte Leerlaufdrehzahl  $n_0$  an. Wird die Maschine belastet, steigt der Ankerstrom und der innere Spannungsfall steigt. Dadurch wird die resultierende Spannung und damit auch die Drehzahl kleiner. Der Belastungsfall stellt eine typische Störgröße für einen Gleichstrommotor dar.

Bei der Untersuchung der Auswirkungen auf den Regelkreis aufgrund von Störgrößen muss beachtet werden, an welcher Stelle diese Störgröße angreift.

Zu unterscheiden sind Störgrößen, die im Vorwärtszweig auftreten, von denen, die in der Rückführung wirksam werden.

# Index

## A

Abtastperiode 238  
Abtastsystem 244  
Abtastvorgang 237  
Abtastzeit 238, 249  
Additionsstelle 22  
Amplitudengang 65  
Amplitudenrand 155, 167  
Amplitudenreserve 155, 167  
Änderungsgeschwindigkeit 137  
Anfangswertsatz 73  
Anregelzeit 157, 167, 188  
Anstieg 137  
Anstiegsantwort 138  
Anstiegszeit 172  
aperiodischer Grenzfall 101  
Asymptote 59, 89  
Ausgleich mit 80  
Ausgleich ohne 108  
Ausgleichsvorgang 34, 85, 91  
Ausgleichszeit 92  
Ausregelzeit 157, 187  
äußerer Regler 207

## B

betraglineare Regelfläche 164  
Betragsoptimum 177, 190  
Betragreserve 155  
bezogener Regelfehler 41  
Bildbereich 66  
bleibende Regeldifferenz 40  
Bode-Diagramm 55

## C

Chien, Hrones und Reswick (CHR) 202

## D

Dämpfung 100, 103  
Dämpfungsgrad 186  
Dezibel 56  
Differenzenbetrachtung 240  
Differenzgleichung 243  
Differenziationssatz 76  
differenzielles Verhalten 137  
Differenzierbeiwert 137  
Drehzahlregelung 18  
Dreipunktregler 228  
Durchtrittsfrequenz 167  
Durchtrittskreisfrequenz 155  
D-Verhalten 137  
dynamischer Übertragungsfaktor 21  
dynamisches Verhalten 70

## E

e-Funktion 70, 84  
Einheit 87  
Einschwingfrequenz 100  
Einstellparameter 147  
Einstellregeln 166, 228, 249  
Einstellvorschriften nach ZN 201  
elementarer Regelkreis 29  
EMSR-Kennzeichnung 32  
Endwertsatz 73  
Energiespeicher 91, 115  
Ersatzzeitkonstante 93, 103  
erweiterte Regelstrecke 29, 152

## F

Fehlerschlauch 157  
Festwertregelung 15  
Fließbild 31  
Folgeregelung 15  
Frequenzgang 54



Frequenzkennlinienverfahren 166, 170  
Führungsgröße 15  
Führungsübertragungsfunktion 39  
Führungsverhalten 37

**G**

Gesamtfrequenzgang 61  
Gesamtübertragungsfaktor 35  
Geschwindigkeitsalgorithmus 243  
Grad der Strecke 91  
Grenzfrequenz 88  
Grundelemente 60  
Gütekriterien 162

**H**

Hilfsenergie 125  
Hilfsstellgröße 207  
Hysterese 214

**I**

Imaginärteil 67, 88  
innerer Regler 207  
instabil 152  
Integralkriterium 164  
Integrierbeiwert 110, 129  
Integrierglied 109  
Integrierzeit 110, 129, 130  
invertiertes P-T<sub>1</sub>-Verhalten 136  
I-Regler 129  
I-T<sub>1</sub>-Verhalten 118  
I-Verhalten 109

**K**

Kaskadenregelung 207  
Kennfrequenz 106  
Knickfrequenz 58, 137  
Koeffizienten 243  
Koeffizientenvergleich 91, 134  
Kompensationsverfahren 170  
konjugiert komplex 87  
Korrespondenztabelle 73  
Kreisverstärkung 35, 129

kritische Kreisfrequenz 155, 167  
kritische Verstärkung 197

**L**

Laplace-Operator 66, 87  
Laplace-Transformation 72, 244  
Laplace-Transformierte 72  
Laplace-Variable 72  
lineare Regelfläche 164  
lineares Übertragungsverhalten 20

**M**

Messeinrichtung 16  
Messwertaufnehmer 16  
Mittelwert 215  
Modellbildung 90

**N**

Nachstellzeit 132  
nichtlineares Übertragungsverhalten 21  
Normalform 86  
normierter Integrierbeiwert 110  
normierter Übertragungsfaktor 22  
Normpegel 16  
Nyquist-Kriterium 152

**O**

offener Regelkreis 35  
Ortskurve 66, 87

**P**

PD-Regler 138, 141  
Phasenlineal 59  
Phasenrand 155, 167  
Phasenreserve 155, 159, 167  
Phasenverschiebung 88  
PID-T<sub>1</sub>-Regelalgorithmus 248  
PID-Verhalten 142  
PI-Regler 132  
Produktform 146  
proportional 81  
Proportionalbeiwert 81

Proportionalbereich 127  
 proportionales Übertragungsverhalten 81  
 Prozess 11  
 Prozessidentifikation 190  
 Prozessparameter 190  
 P-T<sub>1</sub>-Glied 66  
 P-T<sub>1</sub>-Verhalten 84  
 P-T<sub>2</sub>-Verhalten 100  
 P-T<sub>n</sub>-Verhalten 93  
 P-T<sub>t</sub>-Verhalten 105  
 P-Verhalten 81  
 Pythagoras 88

**Q**

quadratische Regelfläche 165  
 Quantisierung 237  
 Quantisierungsfehler 237

**R**

Realteil 67, 88  
 Regelabweichung 221  
 Regelalgorithmus 239  
 Regelbarkeit 107  
 Regeldifferenz 15, 40  
 Regeleinrichtung 17, 125  
 Regelfaktor 44  
 Regelgröße 15  
 Regelparameter 147  
 Regelstrecke 18, 80  
 Regelstrecke mit Ausgleich 80  
 Regelung 13  
 Reglereinstellung nach CHR 203  
 Reglerzuordnung 166  
 Reihenschaltung 93  
 Resonanzüberhöhung 167  
 Rückführgröße 15  
 Rückführung 28, 119, 225

**S**

Schaltdifferenz 214  
 Schaltfrequenz 217, 224  
 Schaltperiode 217  
 Schaltzeit 219  
 Schritregler 230

Schwankungsbreite 221, 224  
 Simulationsprogramm 90  
 Sprungfunktion 70  
 Stabilität 151  
 Stabilitätsgrenze 197  
 stationärer Regelfehler 40  
 stationärer Zustand 73  
 Stellbereich 127  
 Stellglied 19  
 Stellgrad 220  
 Stellgröße 16  
 Stellungsalgorithmus 243  
 stetige Regeleinrichtungen 18  
 stetige Regler 126  
 Steuerung 12  
 Störgröße 16, 43, 47  
 Störgrößenaufschaltung 204  
 Störübertragungsfunktion 44, 48  
 Störverhalten 42  
 Summenform 144  
 symmetrisches Optimum 192

**T**

Tangente 85  
 Testsignal 53  
 Toleranzbereich 157  
 Totzeit 93, 104, 224  
 Totzeitverhalten 219  
 Totzone 229

**U**

Übergangsbereich 70  
 Übergangsfunktion 82  
 Überschussleistung 217  
 Überschwingen 159  
 Überschwingweite 100, 156, 186  
 Übertragungsbeiwert 19  
 Übertragungsfaktor 20  
 Übertragungsfunktion 66  
 Übertragungsglied 19  
 unstetige Regeleinrichtungen 18  
 unstetige Regler 126  
 unterlagert 207

**V**

- Vereinfachung von Wirkungsplänen 26
- verzögert-nachgebende Rückführung 226
- Verzögerung 115
- Verzögerungsglied 84
- Verzugszeit 92, 219, 224
- Verzweigungsstelle 22
- Vorfilter 195
- Vorhaltverstärkung 144
- Vorhaltzeit 139
- Vorregelung 205

**W**

- Wendetangente 92
- Wendetangentenverfahren 93
- Wirkungslinien 22
- Wirkungsplan 19, 30

**Z**

- Zeitkonstante 85
- Zeit-Prozent-Verfahren 96, 190
- Ziegler-Nichols 197
- $z$ -Transformation 244
- Zweipunktregler 213