

**Manfred Reuter**

**Regelungstechnik  
für  
Ingenieure**

**Viewegs  
Fachbücher  
der  
Technik**

**Manfred Reuter**

# **Regelungstechnik für Ingenieure**

Mit 253 Bildern



Friedr. Vieweg + Sohn · Braunschweig

**Verlagsredaktion: Alfred Schubert**

ISBN-13: 978-3-528-04004-8      e-ISBN-13: 978-3-322-88821-1  
DOI: 10.1007/978-3-322-88821-1

1972

**Alle Rechte vorbehalten**

**Copyright © 1972 by Friedr. Vieweg + Sohn GmbH, Verlag, Braunschweig**

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1972

**Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.**

**Satz: Friedr. Vieweg + Sohn, Braunschweig**

## Vorwort

Das vorliegende Buch stellt eine Einführung in die Grundlagen der Regelungstechnik unter besonderer Berücksichtigung der Laplace-Transformation dar und ist für Studenten an Fachhochschulen gedacht. Die zum Teil sehr ausführliche Darstellung soll, wenn nötig, auch ein selbständiges Einarbeiten in das Stoffgebiet ermöglichen. Zur Untersuchung der einzelnen Regelkreisglieder werden die klassischen Methoden wie: Differentialgleichung, Sprungantwort, Frequenzgang, Ortskurve und Bode-Diagramm angewandt. Diese sind die Voraussetzung für die in der modernen Regelungstheorie benutzten Verfahren der z-Transformation und der Betrachtung im Zustandsraum.

Nach der Einführung der Grundbegriffe der Steuerung und Regelung in Kapitel 1, wird in Kapitel 2 die mathematische Behandlung einzelner Regelkreisglieder erörtert. Ausgehend vom Zeitverhalten der Grundtypen von Regelkreisgliedern in Kapitel 3, werden in Kapitel 4 die Regelstrecken ausführlich behandelt. Für jede Streckenart werden sowohl elektrische als auch für den Maschinenbauer geeignete Beispiele durchgerechnet. Zur Ermittlung des charakteristischen Verlaufs der einzelnen Sprungantworten wird abwechselnd je ein Beispiel nach der klassischen und eines mittels Laplace-Transformation gelöst. Bei der Behandlung der Regeleinrichtungen (Kapitel 5) wird gleichzeitig deren typisches Verhalten an einfachen Regelstrecken untersucht. Über den Störfrequenzgang und die entsprechende Differentialgleichung werden deren Vor- und Nachteile, z.B. der Einfluß der einzelnen Reglerparameter auf die bleibende Regelabweichung und die Dämpfung aufgezeigt. Die für den Regelungstechniker wichtige Darstellung im Bode-Diagramm ist in Kapitel 6 zusammengefaßt. Zur Stabilitätsbetrachtung von Regelkreisen (Kapitel 7) werden die Kriterien von Hurwitz, Nyquist, die Behandlung im Bode-Diagramm und das Zweiortskurvenverfahren abgeleitet und an Beispielen ausführlich erläutert. Das Zweiortskurvenverfahren dient ferner der Behandlung von Nichtlinearitäten mittels der Methode der harmonischen Balance in Kapitel 9. Für verschiedene Nichtlinearitäten werden die Beschreibungsfunktionen abgeleitet. Anschließend werden in Kapitel 10 Zwei- und Dreipunktregler ohne und mit Rückführung erläutert. Das abschließende Kapitel 11 behandelt kurz die Wirkungsweise des Analogrechners. Ferner wird auf die Programmierung der wichtigsten Regler und Regelstrecken eingegangen. Den Anhang (Kapitel 12) bilden eine kurzgefaßte Ableitung der Laplace-Transformation sowie zusammenfassende Tabellen.

Zum Schluß möchte ich mich bei meinen Kollegen, den Herren Dipl.-Ing. E. Böhmer, Dipl.-Ing. W. Mengel und Dr.-Ing. W. Zimmermann bedanken, die mir durch Ratschläge und Anregungen geholfen haben. Ferner danke ich dem Verlag Friedr. Vieweg + Sohn und seinen Mitarbeitern, insbesondere Herrn A. Schubert für die stets gute Zusammenarbeit.

Siegen, Herbst 1971

*Manfred Reuter*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Prinzip der Regelung	3
1.2	Darstellung im Blockschaltbild	5
1.3	Gerätetechnische Ausführung einer Raumtemperatur-Regelung	7
1.4	Prinzip der Steuerung	8
1.5	Beispiele für einfache Regelkreise	9
1.6	Beispiele für vermaschte Regelkreise	11
<b>2.</b>	<b>Mathematische Behandlung einzelner Regelkreisglieder</b>	<b>14</b>
2.1	Das Aufstellen der Differentialgleichung	15
2.2	Lösung der Differentialgleichung bei sprunghafter Verstellung der Eingangsgröße	17
2.3	Spezielle Eingangsfunktion zur Ermittlung des Übergangsverhaltens von Regelkreisen	21
2.4	Lösung der Differentialgleichung für sinusförmig sich ändernde Eingangsgröße	23
2.5	Einführung des p-Operators	27
2.6	Die Ortskurve	30
2.7	Beziehung zwischen Ortskurve und Sprungantwort	32
2.8	Das Bode-Diagramm	34
<b>3.</b>	<b>Regelkreisglieder</b>	<b>36</b>
3.1	Verbindungsmöglichkeiten von Regelkreisgliedern	36
3.2	Grundtypen von Regelkreisgliedern	38
3.2.1	Proportionales oder P-Verhalten	38
3.2.2	Integrales oder I-Verhalten	40
3.2.3	Differentielles oder D-Verhalten	43
3.2.4	D-Verhalten mit Verzögerung 1. Ordnung	44
3.2.5	P-Verhalten mit Verzögerung 1. Ordnung	50
<b>4.</b>	<b>Die Regelstrecke</b>	<b>56</b>
4.1	P-Strecken ohne Verzögerung	58
4.2	P-Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung	58
4.2.1	P-Strecken mit Verzögerung 2. Ordnung, gebildet aus in Reihe geschalteten Strecken 1. Ordnung	63
4.3	Strecken höherer Ordnung	77
4.4	P-Strecken 2. Ordnung, die gedämpfte Schwingungen ausführen können	81
4.5	I-Strecken ohne Verzögerung	90
4.6	I-Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung	94
4.7	Strecken mit Totzeit $T_t$	103
4.8	Regelstrecken mit Totzeit und Verzögerung 1. Ordnung	105

<b>5.</b>	<b>Regelrichtungen</b>	109
5.1	Zeitverhalten stetiger Regelrichtungen	111
5.1.1	P-Regelrichtung	111
5.1.1.1	P-Regelrichtung zur Regelung einer P-Strecke 1. Ordnung	112
5.1.2	I-Regelrichtungen	118
5.1.2.1	I-Regelrichtung zur Regelung einer P-Strecke 1. Ordnung	121
5.1.2.2	I-Regelrichtung zur Regelung einer I-Strecke	125
5.1.3	PI-Regelrichtung	127
5.1.3.1	PI-Regelrichtung zur Regelung einer P-Strecke 1. Ordnung	129
5.1.3.2	PI-Regelrichtung zur Regelung einer I-Strecke	133
5.1.4	D-Regelrichtung	134
5.1.5	PD-Regelrichtung	135
5.1.5.1	PD-Regelrichtung zur Regelung einer P-Strecke 1. Ordnung	139
5.1.6	PID-Regelrichtung	141
5.1.6.1	PID-Regelrichtung zur Regelung einer P-Strecke 1. Ordnung	147
5.2	Regelrichtungen mit Rückführung	151
5.2.1	Verstärker mit proportionalem Rückführglied	151
5.2.2	Verstärker mit nachgebendem Rückführglied	153
5.2.3	Verstärker mit verzögertem Rückführglied	156
5.2.4	Verstärker mit verzögerter und nachgebender Rückführung	158
<b>6.</b>	<b>Das Bode-Diagramm</b>	164
6.1	Bode-Diagramm einfacher Frequenzgänge	164
6.1.1	Bode-Diagramm des $P_0$ -Gliedes	164
6.1.2	Bode-Diagramm eines I-Gliedes	165
6.1.3	Bode-Diagramm eines D-Gliedes	166
6.1.4	Bode-Diagramm eines P-Gliedes mit Verzögerung 1. Ordnung	167
6.1.5	Bode-Diagramm eines PI-Gliedes	168
6.1.6	Bode-Diagramm eines PD-Gliedes	170
6.1.7	Bode-Diagramm eines P-Gliedes mit Verzögerung 2. Ordnung	172
6.2	Darstellung in Reihe geschalteter Frequenzgänge im Bode-Diagramm	173
6.2.1	Konstruktion des Amplitudenganges mittels Amplitudenlineal	176
6.2.2	Konstruktion des Phasenganges mittels Phasenlineal	178
<b>7.</b>	<b>Stabilitätskriterien</b>	187
7.1	Stabilitätskriterium nach Hurwitz	188
7.2	Stabilitätskriterium nach Nyquist	194
7.3	Anwendung des Bode-Diagramms auf das Nyquist-Kriterium	200
7.4	Stabilitätsuntersuchung mit dem Zweiortskurvenverfahren	206
7.5	Amplituden- und Phasenrand	212
<b>8.</b>	<b>Optimierung. Kriterien zur Einstellung von Regelkreisen</b>	215
8.1	Theoretische Einstellkriterien	216
8.1.1	Lineare Regelfläche oder lineares Integralkriterium	216
8.1.2	Betrag der linearen Regelfläche	219
8.1.3	Quadratische Regelfläche oder quadratisches Integralkriterium	220
8.2	Praktische Einstellkriterien	223
8.2.1	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	223
8.2.2	Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick	226

<b>9.</b>	<b>Nichtlineare Glieder im Regelkreis</b>	227
9.1	Die Beschreibungsfunktion	229
9.2	Ermittlung spezieller Beschreibungsfunktionen	231
9.2.1	Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Sättigung	232
9.2.2	Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit toter Zone	234
9.2.3	Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Hysterese	237
9.2.4	Beschreibungsfunktion eines Dreipunktreglers ohne Hysterese	241
9.3	Stabilitätsuntersuchung an Regelkreisen, die Nichtlinearitäten enthalten	244
9.3.1	Dreipunktregler mit nachgeschaltetem Stellmotor zur Druckregelung	244
9.3.2	Untersuchung eines Regelkreises mit Ansprechempfindlichkeit	248
<b>10.</b>	<b>Unstetige Regelung</b>	251
10.1	Idealer Zweipunktregler an einer Strecke höherer Ordnung	252
10.2	Zweipunktregler mit Hysterese an einer P-Strecke 1. Ordnung	257
10.3	Zweipunktregler mit Rückführung	259
10.3.1	Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung	260
10.3.2	Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung	264
10.4	Dreipunktregler	266
10.4.1	Dreipunktregler mit Rückführung	267
<b>11.</b>	<b>Anwendung des Analogrechners in der Regelungstechnik</b>	269
11.1	Grundelemente des elektronischen Analogrechners	270
11.1.1	Der Rechenverstärker	271
11.1.2	Der Summator	273
11.1.3	Der Integrator	275
11.1.4	Der Funktionsgeber	277
11.1.5	Der Multiplikator	280
11.2	Programmierung	281
11.2.1	Wahl der Maßstabsfaktoren	287
<b>12.</b>	<b>Anhang</b>	295
12.1	Laplace- und Carson-Transformation	295



## Formelzeichen

A	Fläche
$A_1$	Lineare Regelfläche
$A_q$	Quadratische Regelfläche
$A_{,,}$	Betrag der lineare Regelfläche
$A_{Rd}$	Amplitudenrand
$a_0, a_1, \dots$	Koeffizienten der Fourier-Zerlegung, Beiwerte der Eingangsgröße und deren Ableitungen
B	Magnetische Induktion
b	Dämpfungskonstante
$b_0, b_1, \dots$	Koeffizienten der Fourier-Zerlegung, Beiwerte der Ausgangsgröße und deren Ableitungen
C	Kapazität, Konstante
c	Federkonstante
D	Dämpfungsgrad, Determinante
F	Kraft
$F(p)$	Frequenzgang
$F(t)$	Ober- oder Originalfunktion
$F_o$	Frequenzgang des aufgeschnittenen Regelkreises
$F_R$	Frequenzgang der Regeleinrichtung
$F_S$	Frequenzgang der Regelstrecke
$F_{\overline{S}}$	Frequenzgang der negativ inversen Ortskurve der Strecke
$F_r$	Frequenzgang der Rückführung
$F_w$	Führungsfrequenzgang
$F_z$	Störfrequenzgang
f	Frequenz
$f(p)$	Unterfunktion
G	Gewicht
g	Erdbeschleunigung
H	Magnetische Feldstärke
h	Höhe
I	Stromstärke
i	Zeitlich veränderlicher Strom
$i_a$	Ankerstrom

## X

## Formelzeichen

$i_e$	Erregerstrom
$i_g$	Gitterstrom
$J$	Massenträgheitsmoment
$j = \sqrt{-1}$	imaginäre Einheit
$K$	Übertragungsbeiwert, Konstante
$K_D$	Differenzierbeiwert
$K_I$	Integrierbeiwert
$K_P$	Proportionalbeiwert
$K_{Pkr}$	kritischer Proportionalbeiwert
$K_S$	Übertragungsbeiwert der Strecke
$k$	Wärmedurchgangszahl, Konstante
$L$	Induktivität
$L [ \dots ]$	Laplace-Transformierte von [ . . . ]
$l$	Länge
$M$	Drehmoment
$m$	Masse
$N$	Beschreibungsfunktion
$N$	Windungszahl
$n$	Drehzahl, Ordnungszahl
$P$	Druck, Leistung
$p = j\omega = \frac{d}{dt}$	Differentialoperator
$Q$	Wärmemenge, Durchflußmenge
$R$	Elektrischer Widerstand, Gaskonstante, Regelfaktor
$r$	Radius
$s_0, s_1, \dots$	Beiwerte der Ausgangsgröße der Strecke und deren Ableitungen
$T$	Periodendauer, Zeitkonstante
$T_{an}$	Anregelzeit
$T_{aus}$	Ausregelzeit
$T_D$	Differenzierzeit
$T_I$	Integrierzeit
$T_n$	Nachstellzeit
$T_0$	Schwingdauer
$T_t$	Totzeit
$T_u$	Verzugszeit
$T_v$	Vorhaltzeit
$t$	Zeit

$t_a$	Ausschaltzeit
$t_e$	Einschaltzeit
$U$	Spannung
$u$	zeitlich veränderliche Spannung
$V$	Verstärkungsgrad, Volumen
$v$	Geschwindigkeit
$w$	Führungsgröße
$X$	Absolutwert der Regelgröße
$X_h$	Regelbereich
$X_p$	P-Bereich
$x$	Regelgröße
$x_a$	Ausgangsgröße (allgemein)
$\hat{x}_a$	Amplitude der Ausgangsgröße
$x_B$	Sättigungszone
$x_E$	Endwert
$x_e$	Eingangsgröße (allgemein)
$x_{eo}$	Eingangssprung
$\hat{x}_e$	Amplitude der Eingangsgröße
$x_d$	Regeldifferenz
$2x_L$	Hysteresebreite
$x_{MA}$	Mittelwertabweichung
$x_m$	Überschwingweite
$x_r$	Rückführgröße
$x_s$	Sollwert
$x_t$	Tote Zone
$x_w$	Regelabweichung
$x_w^{(\infty)}$	Bleibende Regelabweichung
$y$	Stellgröße
$Y_h$	Stellbereich
$y_R$	Stellgröße am Ausgang der Regeleinrichtung
$y_s$	Stellgröße am Eingang der Regelstrecke
$Z$	Impedanz
$z$	Störgröße
$\alpha$	Skalierungsfaktor, Konstante der Korrespondenztabelle
$\beta$	Zeitskalierungsfaktor

$\beta = \frac{1}{T_2}$	Kennkreisfrequenz
$\gamma$	Spezifisches Gewicht
$\Delta$	Kennzeichnung von Größenänderungen
$\eta$	Zähigkeit von Gasen
$\vartheta$	Temperatur
$\lambda$	Wurzel der charakteristischen Gleichung
$\mu$	Leerlaufverstärkung einer Elektronenröhre
$\nu$	Ordnungszahl
$\rho$	Dichte
$\tau$	Maschinenzeit
$\phi$	Erregerfluß
$\varphi$	Phasenverschiebungswinkel, Auslenkwinkel
$\varphi_0$	Phasenverschiebung des aufgeschnittenen Regelkreises
$\varphi_{Rd}$	Phasenrand
$\omega$	Kreisfrequenz
$\omega_E$	Eck(kreis)frequenz