

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen .....</b>	XIII
<b>1 Einleitung (von M. Reuter und S. Zacher).....</b>	1
1.1 Das Prinzip der Regelung .....	3
1.2 Darstellung im Wirkungsplan .....	5
1.3 Gerätetechnische Ausführung eines Regelkreises .....	7
1.4 Das Prinzip der Steuerung .....	8
1.5 Beispiele für einfache Regelkreise .....	9
1.6 Beispiele für vermaschte Regelkreise.....	12
<b>2 Mathematische Behandlung von Regelkreisen (von M. Reuter).....</b>	15
2.1 Beharrungszustand und Zeitverhalten eines Regelkreisgliedes .....	15
2.2 Das Aufstellen der Differentialgleichung .....	17
2.3 Lösung der Differentialgleichung .....	19
2.3.1 Spezielle Eingangsfunktionen.....	19
2.3.2 Lösung der Differentialgleichung bei sprunghafter Verstellung der Eingangsgröße.....	21
2.3.3 Lösung der Differentialgleichung durch Trennen der Veränderlichen.....	22
2.3.4 Lösung der Differentialgleichung durch geeigneten Ansatz .....	23
2.3.5 Lösung mittels Laplace-Transformation. Die Übertragungsfunktion ..	25
2.3.6 Lösung der Differentialgleichung bei sinusförmiger Eingangsgröße..	30
2.4 Beschreibung von Regelkreisen im Frequenzbereich.....	34
2.4.1 Der Frequenzgang .....	34
2.4.2 Die Ortskurve .....	36
2.4.3 Beziehung zwischen Ortskurve und Sprungantwort.....	39
2.4.4 Das Bode-Diagramm.....	41
2.5 Beschreibung von Regelkreisen mit Übertragungsfunktionen .....	42
2.5.1 Verbindmöglichkeiten von Regelkreisgliedern.....	42
2.6 Behandlung des statischen Verhaltens.....	44
2.6.1 Statische Kennlinien .....	45
2.6.2 Statischer Regelfaktor.....	47
2.6.3 Linearisierung mit analytischen Verfahren.....	48
2.6.4 Linearisierung mit grafischen Verfahren.....	50
<b>3 Regelstrecke (von M. Reuter).....</b>	51
3.1 P-Strecken ohne Verzögerung.....	53
3.2 P-Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung.....	53

3.3	P-Strecken mit Verzögerung 2. Ordnung.....	59
3.4	Strecken höherer Ordnung.....	70
3.5	Schwingungsfähige P-Strecken 2. Ordnung .....	75
3.6	I-Strecken ohne Verzögerung.....	83
3.7	I-Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung.....	86
3.8	Strecken mit Totzeit $T_t$ .....	92
3.9	Regelstrecken mit Totzeit und Verzögerung 1. Ordnung .....	96
<b>4</b>	<b>Regeleinrichtungen (von M. Reuter) .....</b>	<b>99</b>
4.1	Elektronische Regler mittels Operationsverstärker .....	101
4.2	Führungs- und Störverhalten des geschlossenen Regelkreises .....	104
4.2.1	Führungsübertragungsfunktion .....	104
4.2.2	Störübertragungsfunktion .....	106
4.3	Zeitverhalten stetiger Regeleinrichtungen .....	106
4.3.1	P-Regeleinrichtung.....	106
4.3.1.1	P-Regeleinrichtung zur Regelung einer P- $T_1$ -Strecke.....	108
4.3.2	I-Regeleinrichtung .....	112
4.3.2.1	I-Regeleinrichtung zur Regelung einer P- $T_1$ -Strecke.....	114
4.3.2.2	I-Regeleinrichtung zur Regelung einer I-Strecke .....	117
4.3.3	PI-Regeleinrichtung .....	118
4.3.3.1	PI-Regeleinrichtung zur Regelung einer P- $T_1$ -Strecke.....	120
4.3.3.2	PI-Regeleinrichtung zur Regelung einer I-Strecke .....	124
4.3.4	D-Verhalten.....	125
4.3.5	PD-Regeleinrichtung.....	127
4.3.5.1	PD-Regeleinrichtung zur Regelung einer P- $T_2$ -Strecke .....	131
4.3.6	PID-Regeleinrichtung .....	135
4.3.6.1	PID-Regeleinrichtung zur Regelung einer P- $T_2$ -Strecke....	140
<b>5</b>	<b>Das Bode Diagramm. Frequenzkennlinienverfahren (von M. Reuter) ...</b>	<b>143</b>
5.1	Bode-Diagramme einfacher Frequenzgänge.....	143
5.1.1	Bode-Diagramm eines P <sub>0</sub> -Gliedes .....	144
5.1.2	Bode-Diagramm eines I-Gliedes.....	144
5.1.3	Bode-Diagramm eines D-Gliedes .....	146
5.1.4	Bode-Diagramm eines P-Gliedes mit Verzögerung 1. Ordnung.....	147
5.1.5	Bode-Diagramm eines PI-Gliedes.....	148
5.1.6	Bode-Diagramm eines PD-Gliedes .....	150
5.1.7	Bode-Diagramm eines P- $T_2$ -Gliedes.....	152
5.2	Darstellung in Reihe geschalteter Glieder im Bode-Diagramm .....	153
5.2.1	Konstruktion des Bode-Diagramms mittels Einzelfrequenzgängen	153
5.2.2	Konstruktion mittels Asymptoten (aktualisiert von S. Zacher) .....	156
5.3	Numerische Berechnung des Bode-Diagramms .....	163

<b>6 Stabilitätskriterien</b> (von M. Reuter) .....	167
6.1 Stabilitätskriterium nach Hurwitz.....	168
6.2 Stabilitätskriterium nach Nyquist .....	174
6.2.1 Graphische Ermittlung der Ortskurve bei gegebener Pol- Nullstellenverteilung.....	175
6.2.2 Ableitung des Nyquist-Kriteriums .....	178
6.2.3 Anwendung des Nyquist-Kriteriums .....	180
6.3 Stabilitätsuntersuchung nach Nyquist im Bode-Diagramm.....	185
6.3.1 Vereinfachtes Nyquist-Kriterium .....	190
6.3.2 Stabilitätsgüte und Phasenrand .....	191
6.4 Stabilitätsuntersuchung mittels Zweiorbitskurvenverfahren .....	195
6.4.1 Konstruktion der negativ inversen Ortskurve der Strecke.....	197
<b>7 Das Wurzelortskurvenverfahren</b> (von M. Reuter).....	201
7.1 Analytische Berechnung der Wurzelortskurve .....	203
7.2 Geometrische Eigenschaften von Wurzelortskurven.....	213
<b>8 Entwurf von linearen Regelkreisen</b> (von S. Zacher).....	221
8.1 Gütekriterien des Zeitverhaltens .....	221
8.2 Praktische Einstellregeln.....	224
8.2.1 Grob approximierte Strecke .....	224
8.2.2 Fein approximierte Strecke .....	228
8.3 Integralkriterien.....	233
8.4 Einstellregeln im Frequenzbereich .....	236
8.4.1 Betragsoptimum .....	236
8.4.2 Symmetrisches Optimum .....	238
8.5 Entwurf von Regelkreisen mit instabilen Strecken.....	243
8.5.1 Instabile P-T <sub>1</sub> -Glieder .....	243
8.5.2 Instabile P-T <sub>2</sub> -Glieder .....	245
8.5.3 Beispiele von instabilen Regelstrecken .....	248
8.6 Vermischte Regelung .....	251
8.6.1 Regelung mit Hilfsregelgrößen.....	251
8.6.2 Kaskadenregelung.....	252
8.6.3 Begrenzungsregelung .....	254
8.6.4 Störgrößenaufschaltung .....	256
8.7 Mehrgrößenregelung .....	258
8.7.1 Regelstrecken mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen .....	258
8.7.2 Strukturen der Mehrgrößenregelung.....	261
8.7.3 Entwurf eines Diagonalreglers.....	262
8.7.4 Stabilität der Zweigrößenregelung.....	265
8.7.5 Entwurf eines Entkopplungsreglers .....	265

<b>9 Nichtlineare Glieder im Regelkreis</b> (von M. Reuter) .....	271
9.1 Harmonische Balance .....	275
9.2 Ermittlung spezieller Beschreibungsfunktionen .....	276
9.2.1 Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Sättigung .....	277
9.2.2 Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit toter Zone .....	279
9.2.3 Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Hysterese .....	282
9.2.4 Beschreibungsfunktion eines Dreipunktreglers ohne Hysterese .....	285
9.3 Stabilitätsuntersuchungen an nichtlinearen Regelkreisen .....	287
9.3.1 Dreipunktregler mit nachgeschaltetem Stellmotor .....	288
9.3.2 Untersuchung eines Regelkreises mit Ansprechempfindlichkeit .....	292
<b>10 Unstetige Regelung</b> (von M. Reuter) .....	295
10.1 Idealer Zweipunktregler an einer P-Strecke höherer Ordnung .....	296
10.2 Zweipunktregler mit Hysterese an einer P-Strecke 1. Ordnung .....	302
10.3 Zweipunktregler mit Rückführung .....	305
10.3.1 Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung .....	306
10.3.2 Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung .....	310
10.4 Dreipunktregler .....	312
10.4.1 Dreipunktregler mit Rückführung .....	313
<b>11 Digitale Regelung</b> (von S. Zacher) .....	315
11.1 Digitale Regeleinrichtungen .....	315
11.2 Abtastregelung .....	319
11.2.1 Wirkungsweise von digitalen Regelkreisen .....	320
11.2.2 Rechenzeit .....	323
11.2.3 Beschreibungsmethoden .....	324
11.3 Quasikontinuierliche Regelung .....	327
11.3.1 Wahl der Abtastperiode .....	327
11.3.2 Praktische Einstellregeln .....	327
11.4 Beschreibung von Abtastsystemen im Zeitbereich .....	330
11.4.1 Differenzengleichungen .....	330
11.4.2 Aufstellen der Differenzengleichungen .....	330
11.4.3 Lösung der Differenzengleichungen mittels Rekursion .....	331
11.4.4 Exakte Lösung der Differenzengleichungen .....	331
11.4.5 Digitalisierung analoger Regelalgorithmen .....	335
11.4.6 Stabilitätsbedingung für Abtastsysteme .....	341
11.5 Beschreibung von digitalen Systemen im $z$ -Bereich .....	343
11.5.1 Die $z$ -Transformation .....	343
11.5.2 Die $z$ -Übertragungsfunktionen .....	346
11.5.3 Digitale Übertragungsfunktionen von einzelnen Elementen .....	348
11.5.4 Digitale Führungsübertragungsfunktionen .....	351
11.5.5 Stabilitätskriterien für digitale Regelkreise .....	352

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>12 Intelligente Regelung</b> (von S. Zacher) .....	357
12.1 Modellbasierte Regelung .....	357
12.1.1 Kompensationsregler .....	357
12.1.2 Smith-Prädiktor .....	359
12.1.3 PFC-Regler (Predictive Function Control) .....	361
12.1.4 Regler mit einem adaptiven Filter .....	364
12.1.5 Regler mit endlicher Einstellzeit .....	367
12.2 Fuzzy-Regler .....	371
12.2.1 Funktionsweise und Aufbau eines Fuzzy-Reglers .....	371
12.2.2 Fuzzy-Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen .....	372
12.2.3 Regelbasis und Inferenz .....	374
12.2.4 Defuzzifizierung .....	375
12.3 Neuro-Regelung .....	377
12.3.1 Grundmodell eines künstlichen Neurons .....	377
12.3.2 Mehrschicht-KNN und Backpropagation .....	379
12.3.3 Regelkreisstrukturen mit KNN .....	383
<b>13 Zustandsregelung</b> (von S. Zacher) .....	387
13.1 Zustandsebene .....	387
13.1.1 Zustandsebene eines linearen Systems .....	388
13.1.2 Stabilitätsuntersuchung in der Zustandsebene .....	390
13.1.3 Zustandsrückführung eines nichtlinearen Systems .....	394
13.2 Zustandsraum .....	397
13.3 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	400
13.4 Entwurf von Regelkreisen mittels Polzuweisung .....	402
13.4.1 Zustandrückführung .....	402
13.4.2 Vorfilter .....	404
13.4.3 Ausgangsrückführung .....	405
13.4.4 Störgrößenaufschaltung .....	408
13.4.5 Beobachterentwurf .....	410
13.5 Optimale Zustandsregelung nach LQ-Kriterien .....	413
13.5.1 Optimale Zustandsrückführung .....	414
13.5.2 Entwurf eines optimalen Beobachters .....	416
<b>14 Regelkreisanalyse mit MATLAB / Simulink</b> (von S. Zacher) .....	417
14.1 Grundlagen der MATLAB-Programmierung .....	417
14.2 Grafik mit MATLAB .....	421
14.3 Control System Toolbox .....	426
14.4 <i>Bode</i> -Diagramm mit MATLAB .....	429
14.5 WOK mit MATLAB .....	432
14.6 Einführung in MATLAB / Simulink .....	438

<b>Anhang .....</b>	441
Lösungen der Übungsaufgaben (von M. Reuter und S. Zacher).....	441
Rechenregeln der Laplace-Transformation (von M. Reuter) .....	465
Korrespondenztabelle (von M. Reuter) .....	466
Sätze der Laplace- und z-Transformation (von M. Reuter).....	467
Tabelle der Laplace- und z-Transformation (von M. Reuter) .....	468
Tabelle der wichtigsten Regelkreisglieder (von M. Reuter) .....	470
<b>Literaturverzeichnis (von S. Zacher) .....</b>	476
<b>English-German Symbols Directory (von S. Zacher) .....</b>	483
<b>Fachwörter Deutsch-Englisch (von S. Zacher) .....</b>	491
<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	505