

Manfred Reuter
Serge Zacher

Regelungstechnik für Ingenieure

Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen

11., korrigierte Auflage

Mit 388 Abbildungen, 77 Beispielen und 34 Aufgaben

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XII
1 Einleitung (von M. Reuter und S. Zacher)	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
2 Mathematische Behandlung von Regelkreisen (von M. Reuter).....	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 Verbindungsmöglichkeiten 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
3 Regelstrecke (von M. Reuter)	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_1	92
3.9	Regelstrecken mit Totzeit und Verzögerung 1. Ordnung	96
4	Regleinrichtungen (von M. Reuter).....	99
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 Regleinrichtungen	106
4.3.1	P-Regleinrichtung.....	106
4.3.1.1	P-Regleinrichtung zur Regelung einer P- T_1 -Strecke	108
4.3.2	I-Regleinrichtung.....	112
4.3.2.1	I-Regleinrichtung zur Regelung einer P- T_1 -Strecke	114
4.3.2.2	I-Regleinrichtung zur Regelung einer I-Strecke	117
4.3.3	PI-Regleinrichtung.....	118
4.3.3.1	PI-Regleinrichtung zur Regelung einer P- T_1 -Strecke	120
4.3.3.2	PI-Regleinrichtung zur Regelung einer I-Strecke	124
4.3.4	D-Verhalten.....	125
4.3.5	PD-Regleinrichtung.....	127
4.3.5.1	PD-Regleinrichtung zur Regelung einer P- T_2 -Strecke	131
4.3.6	PID-Regleinrichtung.....	135
4.3.6.1	PID-Regleinrichtung zur Regelung einer P- T_2 -Strecke	140
5	Das Bode Diagramm. Frequenzkennlinienverfahren (von M. Reuter)...	143
5.1	Bode-Diagramme einfacher Frequenzgänge.....	143
5.1.1	Bode-Diagramm eines P_0 -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 Amplitudenganges mittels Amplitudenlineal	156
5.2.2	Konstruktion des Phasenganges mittels Phasenlineal.....	158
5.3	Numerische Berechnung des Bode-Diagramms.....	163

6	Stabilitätskriterien (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 Zweiortskurvenverfahren.....	195
6.4.1	Konstruktion der negativ inversen Ortskurve der Strecke	197
7	Das Wurzelortskurvenverfahren (von M. Reuter)	201
7.1	Analytische Berechnung der Wurzelortskurve	203
7.2	Geometrische Eigenschaften von Wurzelortskurven	213
8	Entwurf von linearen Regelkreisen (von S. Zacher).....	221
8.1	Gütekriterien des Zeitverhaltens	221
8.2	Praktische Einstellregeln.....	224
8.2.1	Grob approximierter Strecke	224
8.2.2	Fein approximierter 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 ₁ -Glieder	243
8.5.2	Instabile P-T ₂ -Glieder	245
8.5.3	Beispiele von instabilen Regelstrecken.....	248
8.6	Vermaschte 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

9 Nichtlineare Glieder im Regelkreis (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
10 Unstetige Regelung (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.....	300
10.3 Zweipunktregler mit Rückführung	303
10.3.1 Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung.....	304
10.3.2 Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung	309
10.4 Dreipunktregler	312
10.4.1 Dreipunktregler mit Rückführung.....	313
11 Digitale Regelung (von S. Zacher).....	315
11.1 Abtastregelung	315
11.1.1 Wirkungsweise von digitalen Regelkreisen	316
11.1.2 Beschreibungsmethoden.....	319
11.2 Digitale Regeleinrichtungen.....	321
11.2.1 Mikrorechner als digitale Regler.....	322
11.2.2 Digitalisierung analoger Regelalgorithmen	326
11.2.3 Programmierung von Regelalgorithmen	330
11.2.4 Konfigurierung digitaler Industrieregler	336
11.3 Quasikontinuierliche Regelung	341
11.3.1 Wahl der Abtastperiode	341
11.3.2 Praktische Einstellregeln.....	341
11.4 Beschreibung von Abtastsystemen im Zeitbereich	344
11.4.1 Differenzgleichungen	344
11.4.2 Lösung mittels Rekursion.....	344
11.4.3 Homogene und partikuläre Lösung.....	345
11.4.4 Stabilitätsbedingung für Abtastsysteme.....	348
11.5 Beschreibung von Abtastsystemen im z-Bereich	350
11.5.1 Digitale Übertragungsfunktionen von einzelnen Elementen	350
11.5.2 Digitale Führungsübertragungsfunktion	355
11.5.3 Stabilitätskriterien für digitale Regelkreise	357

12 Intelligente Regelung (von S. Zacher)	361
12.1 PC-gestützte Regelungstechnik	361
12.2 Regelkreisanalyse mit MATLAB / SIMULINK	362
12.2.1 Grundlagen der MATLAB-Programmierung	363
12.2.2 Grafik mit MATLAB	368
12.2.3 Control System Toolbox	373
12.2.4 Bode-Diagramm mit MATLAB	376
12.2.5 WOK mit MATLAB	379
12.2.6 Einführung in SIMULINK	385
12.3 Modellbasierte Regelung	391
12.3.1 Kompensationsregler	391
12.3.2 Smith-Prädiktor	393
12.3.3 Regler mit endlicher Einstellzeit	395
12.4 Fuzzy-Regler	399
12.4.1 Funktionsweise und Aufbau eines Fuzzy-Reglers	399
12.4.2 Fuzzy-Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen	400
12.4.3 Regelbasis und Inferenz	402
12.4.4 Defuzzifizierung	403
12.4.5 Fuzzy Logic Toolbox von MATLAB	405
12.5 Neuro-Regelung	409
12.5.1 Grundmodell eines künstlichen Neurons	409
12.5.2 Mehrschicht-KNN und Backpropagation	412
12.5.3 Entwurf eines KNN mit MATLAB / SIMULINK	414
12.5.4 Regelkreisstrukturen mit KNN	416
Anhang	421
Lösungen der Übungsaufgaben	421
Rechenregeln der Laplace-Transformation	447
Korrespondenztabelle	448
Sätze der Laplace- und z-Transformation	449
Tabelle der Laplace- und z-Transformation	450
Tabelle der wichtigsten Regelkreisglieder	452
Literaturverzeichnis	458
Sachwortverzeichnis	462