

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
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_t	92
3.9	Regelstrecken mit Totzeit und Verzögerung 1. Ordnung	96
4	Regeleinrichtungen (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 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
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 Bode-Diagramms mittels Einzelfrequenzgängen	153
5.2.2	Konstruktion mittels Asymptoten (aktualisiert von S. Zacher)	156
5.3	Numerische Berechnung des Bode-Diagramms	163

6	Stabilitätskriterien (von M. Reuter und S. Zacher).....	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	Stabilitätsgröße und Phasenrand	191
6.4	Stabilitätsuntersuchung mittels Zweiortskurvenverfahren	195
6.4.1	Konstruktion der negativ inversen Ortskurve der Strecke	197
6.4.2	Zweiortskurvenverfahren im Bode-Diagramm	199
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 approximierte Strecke.....	224
8.2.2	Fein approximierte Strecke	228
8.3	Integralkriterien.....	233
8.4	Einstellregeln im Frequenzbereich	236
8.4.1	Frequenzkennlinienverfahren	236
8.4.2	Betragsoptimum	240
8.4.3	Symmetrisches Optimum	242
8.5	Entwurf von Regelkreisen mit instabilen Strecken.....	247
8.5.1	Instabile P - T_1 -Glieder	247
8.5.2	Instabile P - T_2 -Glieder	249
8.5.3	Beispiele von instabilen Regelstrecken	252
8.6	Vermaschte Regelung	255
8.6.1	Regelung mit Hilfsregelgrößen	255
8.6.2	Kaskadenregelung	256
8.6.3	Begrenzungsregelung	258
8.6.4	Störgrößenaufschaltung	260
8.7	Mehrgrößenregelung.....	262
8.7.1	Regelstrecken mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen.....	262
8.7.2	P -kanonische Form	263
8.7.3	V -kanonische Form.....	264
8.7.4	Dezentrale Regelung einer Mehrgrößenstrecke.....	265

8.7.5	Stabilität der dezentralen Zweigrößenregelung	266
8.7.6	Entwurf einer Entkopplungsregelung	267
8.7.7	Bus-Konzept zur Darstellung der Mehrgrößenstrecken	269
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	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
11	Digitale Regelung (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
12 Intelligente Regelung (von S. Zacher)	357
12.1 Modellbasierte Regelung	357
12.1.1 Kompensationsregler	357
12.1.2 Smith-Prädiktor	359
12.1.3 PFC (Predictive Function Control)	361
12.1.4 SPFC (Simplified Predictive Function Control)	362
12.1.5 ASA-Control (Regelung nach dem Antisystem-Approach)	364
12.1.6 AFIC (Adaptive Filter for Identification and Control)	365
12.1.7 Dead-Beat-Regler (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
13 Zustandsregelung (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 Zustandsrückführung	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

14 Regelkreisanalyse mit MATLAB / Simulink (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
 15 Lösungen der Übungsaufgaben (von M. Reuter und S. Zacher).....	 441
 Anhang	 465
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
 Literaturverzeichnis (von S. Zacher)	 476
 English-German Symbols Directory (von S. Zacher)	 483
 Fachwörter Deutsch-Englisch (von S. Zacher)	 491
 Sachwortverzeichnis.....	 505