

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)	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 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 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	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-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
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 Bode-Diagramm mit MATLAB.....	429
14.5 WOK mit MATLAB.....	432
14.6 Einführung in MATLAB / Simulink	438

Anhang	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
 Literaturverzeichnis (von S. Zacher)	 476
 English-German Symbols Directory (von S. Zacher)	 483
 Fachwörter Deutsch-Englisch (von S. Zacher)	 491
 Sachwortverzeichnis	 505