

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	167
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	177
6.2.3 Anwendung des Nyquist-Kriteriums	179
6.3 Stabilitätsuntersuchung nach Nyquist im Bode-Diagramm	184
6.3.1 Vereinfachtes Nyquist-Kriterium	189
6.3.2 Stabilitätsgüte und Phasenrand	190
6.4 Stabilitätsuntersuchung nach A. Leonhard	193
6.4.1 Zweiortskurvenverfahren	193
6.4.2 Zwei-Bode-Plots-Verfahren	198
6.4.3 Drei-Bode-Plots-Verfahren	200
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	225
8.2.2 Fein approximierter Strecke	228
8.3 Einstellregeln im Frequenzbereich	233
8.3.1 Frequenzkennlinienverfahren	233
8.3.2 Bode-aided Design (BAD) nach Zacher	236
8.3.3 BAD nach einem einzigen Punkt des Bode-Diagramms	239
8.4 Optimale Reglereinstellung	240
8.4.1 Betragsoptimum	240
8.4.2 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	Dreipunktreger mit nachgeschaltetem Stellmotor.....	288
9.3.2	Untersuchung eines Regelkreises mit Ansprechempfindlichkeit.....	292
10	Unstetige Regelung (von M. Reuter).....	295
10.1	Idealer Zweipunktreger an einer P-Strecke höherer Ordnung.....	296
10.2	Zweipunktreger mit Hysterese an einer P-Strecke 1. Ordnung.....	302
10.3	Zweipunktreger mit Rückführung.....	305
10.3.1	Zweipunktreger mit verzögerter Rückführung.....	306
10.3.2	Zweipunktreger mit verzögert-nachgebender Rückführung.....	310
10.4	Dreipunktreger.....	312
10.4.1	Dreipunktreger 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.....	319
11.2.2	Rechenzeit.....	322
11.2.3	Beschreibungsmethoden.....	323
11.3	Quasikontinuierliche Regelung.....	326
11.3.1	Wahl der Abtastperiode.....	326
11.3.2	Praktische Einstellregeln.....	326
11.4	Beschreibung von Abtastsystemen im Zeitbereich.....	329
11.4.1	Differenzengleichungen.....	329
11.4.2	Aufstellen der Differenzengleichungen.....	329
11.4.3	Lösung der Differenzengleichungen mittels Rekursion.....	330
11.4.4	Exakte Lösung der Differenzengleichungen.....	330
11.4.5	Digitalisierung analoger Regelalgorithmen.....	334
11.4.6	Stabilitätsbedingung für Abtastsysteme.....	340
11.5	Beschreibung von digitalen Systemen im z -Bereich.....	342

11.5.1	Die z-Transformation	342
11.5.2	Die z-Übertragungsfunktionen	345
11.5.3	Digitale Übertragungsfunktionen von einzelnen Elementen	347
11.5.4	Einstellung von digitalen Reglern	350
11.5.5	Stabilitätskriterien für digitale Regelkreise	352
11.5.6	Simulation von digitalen Regelkreisen	355
12	Zustandsregelung (von S. Zacher)	357
12.1	Zustandsebene	357
12.1.1	Zustandsebene eines linearen Systems	358
12.1.2	Stabilitätsuntersuchung in der Zustandsebene	360
12.1.3	Zustandsrückführung eines nichtlinearen Systems	364
12.2	Zustandsraum	367
12.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	370
12.4	Entwurf von Regelkreisen mittels Polzuweisung	372
12.4.1	Zustandsrückführung	372
12.4.2	Vorfilter	374
12.4.3	Ausgangsrückführung	375
12.4.4	Störgrößenaufschaltung	378
12.4.5	Beobachterentwurf	380
12.5	Optimale Zustandsregelung nach LQ-Kriterien	383
12.5.1	Optimale Zustandsrückführung	384
12.5.2	Entwurf eines optimalen Beobachters	386
13	Modellbasierte Regelung (von S. Zacher)	387
13.1	Kompensationsverfahren	388
13.1.1	Klassische Kompensationsregler	388
13.1.2	Smith-Prädiktor	389
13.1.3	ASA-Regelung nach dem Antisystem-Approach	392
13.2	Regelung mit Referenzmodell der Strecke	394
13.2.1	PFC (Predictive Function Control)	394
13.2.2	SPFC (Simplified Predictive Function Control)	396
13.2.3	Duale Regelung mit LZV-Regler und Soll-Stellgröße	398
13.2.4	SFC (Surf-Feedback Control)	399
13.3	Dead-Beat Control	401
13.3.1	Analoge Regelkreise	401
13.3.2	Digitale Regelkreise	403
13.4	Fuzzy-Regler	405
13.4.1	Funktionsweise und Aufbau eines Fuzzy-Reglers	405
13.4.2	Fuzzy-Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen	406
13.4.3	Regelbasis und Inferenz	408
13.4.4	Defuzzifizierung	409
13.4.5	Fuzzy-Regler ohne Fuzzy-Logik	412
13.5	Neuro-Regelung	413

13.5.1 Grundmodell eines künstlichen Neurons	414
13.5.2 Mehrschicht-KNN und Backpropagation.....	416
13.5.3 Regelkreisstrukturen mit KNN.....	418
13.5.4 Duale Regelkreise	420
13.5.5 Regelungstechnisches Modell des biologischen Neurons.....	421
14 Regelung mit Data Stream Manager (von S. Zacher)	423
14.1 Einführung.....	423
14.2 Industrie 4.0 und DSM	424
14.2.1 Reale und virtuelle Welt	424
14.2.2 DSM Plattform.....	425
14.2.3 Simulationstool für DSM.....	425
14.3 Reglerentwurf mit DSM	428
14.3.1 DSM Ident nach Zeit-Prozentkennwert-Verfahren	428
14.3.2 AFIC (Adaptive Filter for Identification and Control)	431
14.3.3 DSM Tuner für Standardregelkreise	433
14.4 Modellbasierte DSM	436
14.4.1 DSM Terminator.....	436
14.4.2 Regelkreise mit LZV-Gliedern	438
14.4.3 DSM Router.....	440
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