

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe der Regelungstechnik	1
1.1	Notwendigkeit der Regelung	1
1.2	Aufbau und Wirkungsweise einer Regelung	2
1.3	Beispiele von Regelungen	4
1.4	Regelung und Steuerung	7
1.5	Forderungen an die Regelung und Bearbeitung einer Regelungsaufgabe	11
1.6	Erweiterung des Regelungsbegriffs und Charakterisierung der Regelungstechnik	15
2	Das Strukturbild (Signalflussplan, Wirkplan) als anschauliches Modell dynamischer Systeme	20
2.1	Einführung des Strukturbilds	20
2.2	Aufstellen des Strukturbilds an Beispielen	24
2.2.1	Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs	24
2.2.2	Schüttgutregelung	27
2.2.3	Abflussregelung	29
2.3	Die Blöcke des Strukturbilds	32
2.3.1	Der Block als Übertragungsglied	32
2.3.2	Proportionalglied (P-Glied)	33
2.3.3	Integrierglied (I-Glied)	34
2.3.4	Differenzierglied (D-Glied)	35
2.3.5	Totzeitglied (T_t -Glied, TZ-Glied)	36
2.3.6	Summierglied (S-Glied)	36
2.3.7	Kennlinienglied (KL-Glied)	36
2.3.8	Multiplizierglied (M-Glied)	37
2.3.9	Elementare und zusammengesetzte Übertragungsglieder	37
2.3.10	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P- T_1 -Glied)	38
2.3.11	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P- T_2 -Glied)	39
2.3.12	Kennlinienglied mit mehreren Eingangsgrößen	44
2.3.13	Zusammenfassung	44
2.4	Klassifikation der Übertragungsglieder	46
2.4.1	Allgemeiner Begriff des Übertragungsglieds	46
2.4.2	Lineare Übertragungsglieder	47
2.4.3	Rationale Übertragungsglieder (R-Glieder)	49
2.4.4	Totzeitsysteme (TZ-Systeme)	52
2.4.5	Differenzgleichungsglieder	53
2.4.6	Abtastsysteme	54

2.4.7	Lineare Differentialgleichungsglieder mit zeitabhängigen Parametern	55
2.4.8	Einteilung der linearen Übertragungsglieder in zeitinvariante und zeitvariante (LZI- und LZV-) Glieder	56
2.4.9	Übersichtsschema für die Übertragungsglieder	59
2.5	Eigenschaften der linearen zeitinvarianten Übertragungsglieder (LZI-Glieder)	60
2.5.1	Kenngrößen der LZI-Glieder	60
2.5.2	Sprungantwort von rationalen Übertragungsgliedern (R-Gliedern)	62
2.5.3	Sprungantwort von Totzeitsystemen (TZ-Systemen)	64
2.5.4	Sprungantwort von Differenzgleichungsgliedern	65
2.6	Bestimmung des stationären Zustands aus dem Strukturbild	66
2.7	Linearisierung um den Arbeitspunkt	69
2.8	Umformung des Strukturbilds	72
2.9	Experimentelle Bestimmung der Systemparameter	77
2.9.1	Aufgabenstellung und Verfahrensübersicht	77
2.9.2	Bestimmung der Parameter von rationalen Übertragungsgliedern 1. Ordnung	78
2.9.3	Bestimmung der Parameter des aperiodischen Verzögerungsglieds 2. Ordnung	79
2.9.4	Approximation von Verzögerungsgliedern höherer Ordnung	80
3	Analyse von Regelsystemen	81
3.1	Definition der Stabilität	81
3.2	Grundlegendes Stabilitätskriterium	83
3.3	Stationäres Verhalten offener Wirkungsketten	86
3.4	Blockiereigenschaft von Nullstellen	87
3.5	Gleichungen des Regelkreises	88
3.6	Beispiele	89
3.7	Standardregelkreis	93
3.8	Eigenschaften des offenen Kreises	94
3.9	Stationäres Verhalten des Regelkreises	95
3.10	Stabilität von Regelkreisen	98
3.11	Frequenzgang	102
3.12	Ortskurve des offenen Kreises	105
3.13	Nyquist-Kriterium	108
3.13.1	Herleitung des Nyquist-Kriteriums	108
3.13.2	Spezielle Formen des Nyquist-Kriteriums	111
3.13.3	Beispiele zum Nyquist-Kriterium	113
3.14	Weitere Stabilitätskriterien	115
3.14.1	Argumentänderung von Polynomen und Kriterium von Cremer/Leonhard	115
3.14.2	Vorzeichen der Koeffizienten der charakteristischen Gleichung und Lage der Nullstellen	116
3.14.3	Kriterium von Hurwitz	117
3.14.4	Kriterium von Routh	119

4	Frequenzkennlinien	121
4.1	Charakterisierung des Frequenzkennlinienverfahrens	121
4.2	Definition der Frequenzkennlinien	122
4.3	Frequenzkennlinien einfacher Glieder	123
4.3.1	Proportionalglied (P-Glied)	123
4.3.2	Differenzierglied (D-Glied)	123
4.3.3	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P-T ₁ -Glied)	124
4.3.4	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P-T ₂ -Glied)	125
4.3.5	Totzeitglied (T _T -Glied, TZ-Glied)	126
4.4	Frequenzkennlinien des offenen Kreises	127
4.5	Frequenzkennlinien von geschlossenen Wirkungskreisen	131
4.6	Nyquist-Kriterium in Frequenzkennliniendarstellung	135
4.6.1	Formulierung und Beispiele	135
4.6.2	Herleitung des Nyquist-Kriteriums in Frequenzkennliniendarstellung	136
4.7	Minimalphasenglieder und Allpässe	140
4.8	Numerische Berechnung der Frequenzkennlinien	144
5	Die Wurzelortskurve	146
5.1	Allgemeine Charakterisierung des Verfahrens	146
5.2	Definition der Wurzelortskurve	147
5.3	Geometrische Eigenschaften der Wurzelortskurve	149
5.4	Herleitung der geometrischen Eigenschaften der Wurzelortskurve	155
5.5	Analytische Darstellung der Wurzelortskurve	160
5.6	Wurzelortskurve und Zeitverhalten des Regelkreises	162
6	Synthese (Entwurf) von Regelkreisen	168
6.1	Problemstellung	168
6.2	Forderungen an die Regelung	168
6.3	Grundsätzliche Struktur des Reglers	179
6.4	Realisierungsprobleme und realistische Reglerstruktur: PI-, PID- und PD-Regler	180
6.5	Faustregeln für die Wahl der Reglerparameter und Beispiele	185
6.6	Anwendung des Frequenzkennlinienverfahrens	188
6.7	Anwendung des Wurzelortsverfahrens	192
6.8	Einstellregeln für die Reglerparameter	197
6.8.1	Parameteroptimierung mittels eines Gütemaßes	197
6.8.2	Das Betragsoptimum	202
6.8.3	Das symmetrische Optimum	204
6.8.4	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	208
6.9	Kompensationsregler	211

6.10	Synthese durch Veränderung der Regelungsstruktur	218
6.10.1	Kaskadenregelung: Einführung unterlagerter Regelkreise (innerer Schleifen)	218
6.10.2	Störgrößenaufschaltung	221
6.10.3	Führungsgrößenaufschaltung und Zwei-Freiheitsgrade-Regelung	222
6.11	Mehrgrößenregelungen	223
6.11.1	Struktur gekoppelter Systeme	223
6.11.2	Synthese von Mehrgrößenregelungen durch Entkopplung	226
6.11.3	Stabilität von Mehrgrößenregelungen	231
6.12	Analoge Realisierung des Reglers	232
6.13	Digitale Realisierung des Reglers	235
7	Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen)	240
7.1	Frequenzbereichs- und Zustandsmethodik	240
7.2	Einführung von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen)	241
7.3	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus Differentialgleichungen höherer Ordnung	246
7.4	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus der komplexen Übertragungsgleichung	249
7.4.1	Regelungsnormalform der Zustandsgleichungen	249
7.4.2	Beobachtungsnormalform der Zustandsgleichungen	250
7.4.3	Jordansche Normalform der Zustandsgleichungen	251
7.5	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus dem Strukturbild	254
7.6	Allgemeine Form der Zustandsgleichungen eines linearen Systems	256
7.7	Linearisierung nichtlinearer Systeme um einen stationären Zustand	258
7.8	Ortsdiskretisierung partieller Differentialgleichungen	260
7.9	Berücksichtigung von Totzeit	264
8	Analyse linearer und zeitinvarianter Systeme im Zustandsraum	268
8.1	Transformation auf Normalform	268
8.1.1	Transformation auf Jordansche Normalform	268
8.1.2	Transformation auf Regelungsnormalform	271
8.1.3	Transformation auf Beobachtungsnormalform	274
8.2	Lösung der Zustandsgleichungen	275
8.2.1	Matrizen-e-Funktion	276
8.2.2	Lösung der Zustandsgleichungen mittels der Transitionsmatrix	277
8.2.3	Lösung der homogenen Zustandsdifferentialgleichung mittels Eigenwerten und Eigenvektoren	282
8.2.4	Anwendung der Laplace-Transformation	285
8.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	289
8.3.1	Definitionen	289
8.3.2	Kalmansches Kriterium der Steuerbarkeit	291
8.3.3	Steuerbarkeitskriterium nach Gilbert	293

8.3.4	Steuerbarkeitskriterium nach Hautus	295
8.3.5	Kriterien der Beobachtbarkeit	296
8.3.6	Anschauliche Deutung von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	297
8.3.7	Die Kalman-Zerlegung	299
8.4	Stabilität	299
8.5	Nullstellen im Zustandsraum	302
8.5.1	Kompensation und Übertragungsnullstellen	304
8.5.2	Invarianzeigenschaft von Nullstellen	306
8.6	Modellordnungsreduktion	306
8.6.1	Dominanzmaß von Eigenwerten und Modale Ordnungsreduktion	307
8.6.2	Ordnungsreduktion durch Balancieren und Abschneiden	311
8.6.3	Krylov-unterraumbasierte Ordnungsreduktion	313
8.6.4	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen	318
9	Entwurf von Zustandsregelungen	321
9.1	Struktur einer Zustandsregelung und Problematik	321
9.2	Entwurf der Vorsteuerung	324
9.3	Reglerentwurf durch Polvorgabe (Eigenwertvorgabe)	329
9.3.1	Grundgedanke	329
9.3.2	Polvorgabe bei Eingrößensystemen: Reglerformel von <i>J. Ackermann</i>	330
9.3.3	Polvorgabe bei Mehrgrößensystemen: Reglerformel von <i>G. Roppenecker</i> und Methode der Vollständigen Modalen Synthese	335
9.4	Reglerentwurf durch Minimieren eines quadratischen Gütemaßes: Riccati-Regler	339
9.4.1	Grundgedanke	339
9.4.2	Quadratisches Gütemaß und Ljapunow-Gleichung	340
9.4.3	Berechnung des optimalen Reglers	341
9.4.4	Beispiele und Bewertung des Verfahrens	344
9.5	Ein Entwurf auf Führungsverhalten: Entkopplung nach <i>Falb und Wolovich</i>	346
9.5.1	Begriff der Differenzordnung (relativer Grad)	346
9.5.2	Durchführung der Entkopplung	348
9.5.3	Anwendung des Verfahrens	350
9.6	Zustandsbeobachter	354
9.6.1	Struktur des Luenberger-Beobachters	354
9.6.2	Bestimmung der Beobachterparameter	355
9.6.3	Beobachter reduzierter Ordnung (reduzierter Beobachter)	358
9.6.4	Querverbindung zum Kalman-Filter	360
9.6.5	Der Beobachter im Regelkreis	362
9.6.6	Zustandsregelung unter Verwendung eines Beobachters für die Zustandsdifferenz	366

9.7	Berücksichtigung von Störgrößen	368
9.7.1	Störgrößenaufschaltung bei messbarem Störvektor	369
9.7.2	Störgrößenaufschaltung über einen Störbeobachter	372
9.7.3	PI-Zustandsregelung	374
10	Entwurf robuster Regelungen	378
10.1	Robustheit von Regelungen	378
10.1.1	Robustheitsentwurf als Multi-Modell-Problem	378
10.1.2	Robustheitsentwurf als H_∞ -Optimierungsproblem	381
10.2	H_∞ -Entwurf robuster Regelungen	386
10.2.1	NLKF-Entwurf robuster Regelungen	386
10.2.2	Anwendungsbeispiel: Spurführter Omnibus	388
10.3	Robustheitsentwurf mittels Straffunktionen	393
10.3.1	Beschreibung der Methode	393
10.3.2	Gradientenformeln mittels der Polempfindlichkeit	395
10.3.3	Beispiel: Verladebrücke	397
11	Mathematischer Anhang	401
11.1	Elemente der Laplace-Transformation	401
11.1.1	Das Laplace-Integral	401
11.1.2	Die Laplace-Transformation	401
11.1.3	Rechnen mit δ -Funktionen	402
11.1.4	Rechenregeln der Laplace-Transformation	403
11.1.5	Lösung von Differentialgleichungen	405
11.1.5.1	Differentialgleichungen erster Ordnung	405
11.1.5.2	Homogene Differentialgleichung höherer Ordnung	406
11.1.5.3	Inhomogene Differentialgleichung höherer Ordnung	407
11.1.5.4	Systeme von Differentialgleichungen	407
11.1.6	Fourier-Integral und Parseval-Theorem	408
11.2	Residuum und Residuensatz bei rationalen Funktionen	408
11.3	Matrizenrechnung	409
11.3.1	Lineare Abhängigkeit und Unabhängigkeit von Vektoren	409
11.3.2	Grundregeln der Matrizenrechnung	409
11.3.3	Inverse Matrix	411
11.3.4	Rang einer Matrix	412
11.3.5	Determinanten	413
11.3.5.1	Der Determinantenbegriff	413
11.3.5.2	Eigenschaften der Determinanten	413
11.3.6	Lineare Gleichungen	414
11.3.6.1	Das homogene Gleichungssystem	414

11.3.6.2	Das inhomogene Gleichungssystem	414
11.3.6.3	Das lineare Gleichungssystem mit eindeutiger Lösung	415
11.3.6.4	Das unterbestimmte und das überbestimmte Gleichungssystem	416
11.3.7	Eigenwerte und Eigenvektoren	416
11.3.8	Symmetrische Matrizen	417
11.3.9	Spur einer Matrix	418
11.3.10	Die Moore-Penrosesche Pseudo-Inverse	419
11.3.11	Singulärwertzerlegung	421
11.3.12	Normen	422
11.3.12.1	Vektornormen	422
11.3.12.2	Matrix- und Operatornormen	423
11.3.12.3	H_∞ -Norm eines LZI-Glieds	424
11.3.13	Matrix-Analysis	425
11.4	Gütevektoroptimierung	428
11.4.1	Problemstellung der Mehrzieloptimierung	428
11.4.2	Verfahren der Gütevektoroptimierung nach G. Kreißelmeier und R. Steinhauser	429
11.4.3	Analytische Approximation der Maximumfunktion	430
Literaturverzeichnis		432
Literatur zu Kapitel 1		432
Literatur zu Kapitel 2		432
Literatur zu Kapitel 3		433
Literatur zu Kapitel 4		433
Literatur zu Kapitel 5		433
Literatur zu Kapitel 6		434
Literatur zu Kapitel 7		435
Literatur zu Kapitel 8		436
Literatur zu Kapitel 9		439
Literatur zu Kapitel 10		441
Literatur zu Kapitel 11		442
Stichwortverzeichnis		444