

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe der Regelungstechnik</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Das Strukturbild (Signalflussplan, Wirkplan) als anschauliches Modell dynamischer Systeme</b>	<b>20</b>
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 . . . . .	58
2.5	Eigenschaften der linearen zeitinvarianten Übertragungsglieder (LZI-Glieder) . . . . .	59
2.5.1	Kenngößen der LZI-Glieder . . . . .	59
2.5.2	Sprungantwort von rationalen Übertragungsgliedern (R-Gliedern) . . . . .	61
2.5.3	Sprungantwort von Totzeitsystemen (TZ-Systemen) . . . . .	63
2.5.4	Sprungantwort von Differenzgleichungsgliedern . . . . .	65
2.6	Bestimmung des stationären Zustands aus dem Strukturbild . . . . .	65
2.7	Linearisierung um den Arbeitspunkt . . . . .	68
2.8	Umformung des Strukturbilds . . . . .	71
2.9	Experimentelle Bestimmung der Systemparameter . . . . .	76
2.9.1	Aufgabenstellung und Verfahrensübersicht . . . . .	76
2.9.2	Bestimmung der Parameter von rationalen Übertragungsgliedern 1. Ordnung . . . . .	77
2.9.3	Bestimmung der Parameter des aperiodischen Verzögerungsglieds 2. Ordnung . . . . .	78
2.9.4	Approximation von Verzögerungsgliedern höherer Ordnung . . . . .	79
<b>3</b>	<b>Analyse von Regelsystemen</b> . . . . .	<b>80</b>
3.1	Definition der Stabilität . . . . .	80
3.2	Grundlegendes Stabilitätskriterium . . . . .	82
3.3	Stationäres Verhalten offener Wirkungsketten . . . . .	85
3.4	Blockiereigenschaft von Nullstellen . . . . .	86
3.5	Gleichungen des Regelkreises . . . . .	87
3.6	Beispiele . . . . .	88
3.7	Standardregelkreis . . . . .	92
3.8	Eigenschaften des offenen Kreises . . . . .	93
3.9	Stationäres Verhalten des Regelkreises . . . . .	94
3.10	Stabilität von Regelkreisen . . . . .	97
3.11	Frequenzgang . . . . .	101
3.12	Ortskurve des offenen Kreises . . . . .	104
3.13	Nyquist-Kriterium . . . . .	107
3.13.1	Herleitung des Nyquist-Kriteriums . . . . .	107
3.13.2	Spezielle Formen des Nyquist-Kriteriums . . . . .	110
3.13.3	Beispiele zum Nyquist-Kriterium . . . . .	112
3.14	Weitere Stabilitätskriterien . . . . .	114
3.14.1	Argumentänderung von Polynomen und Kriterium von Cremer/Leonhard . . . . .	114
3.14.2	Vorzeichen der Koeffizienten der charakteristischen Gleichung und Lage der Nullstellen . . . . .	115
3.14.3	Kriterium von Hurwitz . . . . .	116
3.14.4	Kriterium von Routh . . . . .	118

<b>4</b>	<b>Frequenzkennlinien</b>	<b>120</b>
4.1	Charakterisierung des Frequenzkennlinienverfahrens	120
4.2	Definition der Frequenzkennlinien	121
4.3	Frequenzkennlinien einfacher Glieder	122
4.3.1	Proportionalglied (P-Glied)	122
4.3.2	Differenzierglied (D-Glied)	122
4.3.3	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P-T <sub>1</sub> -Glied)	123
4.3.4	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P-T <sub>2</sub> -Glied)	124
4.3.5	Totzeitglied (T <sub>r</sub> -Glied, TZ-Glied)	125
4.4	Frequenzkennlinien des offenen Kreises	126
4.5	Frequenzkennlinien von geschlossenen Wirkungskreisen	130
4.6	Nyquist-Kriterium in Frequenzkennliniendarstellung	134
4.6.1	Formulierung und Beispiele	134
4.6.2	Herleitung des Nyquist-Kriteriums in Frequenzkennliniendarstellung	135
4.7	Minimalphasenglieder und Allpässe	139
4.8	Numerische Berechnung der Frequenzkennlinien	143
<b>5</b>	<b>Die Wurzelortskurve</b>	<b>145</b>
5.1	Allgemeine Charakterisierung des Verfahrens	145
5.2	Definition der Wurzelortskurve	146
5.3	Geometrische Eigenschaften der Wurzelortskurve	148
5.4	Herleitung der geometrischen Eigenschaften der Wurzelortskurve	154
5.5	Analytische Darstellung der Wurzelortskurve	159
5.6	Wurzelortskurve und Zeitverhalten des Regelkreises	161
<b>6</b>	<b>Synthese (Entwurf) von Regelkreisen</b>	<b>167</b>
6.1	Problemstellung	167
6.2	Forderungen an die Regelung	167
6.3	Grundsätzliche Struktur des Reglers	178
6.4	Realisierungsprobleme und realistische Reglerstruktur: PI-, PID- und PD-Regler	179
6.5	Faustregeln für die Wahl der Reglerparameter und Beispiele	183
6.6	Anwendung des Frequenzkennlinienverfahrens	187
6.7	Anwendung des Wurzelortsverfahrens	190
6.8	Einstellregeln für die Reglerparameter	196
6.8.1	Parameteroptimierung mittels eines Gütemaßes	196
6.8.2	Das Betragsoptimum	201
6.8.3	Das symmetrische Optimum	203
6.8.4	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	207
6.9	Kompensationsregler	209

6.10	Synthese durch Veränderung der Regelungsstruktur . . . . .	217
6.10.1	Kaskadenregelung: Einführung unterlagerter Regelkreise (innerer Schleifen) . . . . .	217
6.10.2	Störgrößenaufschaltung . . . . .	220
6.10.3	Führungsgrößenaufschaltung und Zwei-Freiheitsgrade-Regelung . . . . .	221
6.11	Mehrfachregelungen . . . . .	222
6.11.1	Struktur gekoppelter Systeme . . . . .	222
6.11.2	Synthese von Mehrfachregelungen durch Entkopplung . . . . .	225
6.11.3	Stabilität von Mehrfachregelungen . . . . .	230
6.12	Analoge Realisierung des Reglers . . . . .	231
6.13	Digitale Realisierung des Reglers . . . . .	234
<b>7</b>	<b>Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen)</b>	<b>239</b>
7.1	Frequenzbereichs- und Zustandsmethodik . . . . .	239
7.2	Einführung von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen) . . . . .	240
7.3	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus Differentialgleichungen höherer Ordnung . . . . .	245
7.4	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus der komplexen Übertragungsgleichung . . . . .	248
7.4.1	Regelungsnormform der Zustandsgleichungen . . . . .	248
7.4.2	Beobachtungsnormform der Zustandsgleichungen . . . . .	249
7.4.3	Jordansche Normalform der Zustandsgleichungen . . . . .	250
7.5	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus dem Strukturbild . . . . .	253
7.6	Allgemeine Form der Zustandsgleichungen eines linearen Systems . . . . .	255
7.7	Linearisierung nichtlinearer Systeme um einen stationären Zustand . . . . .	257
7.8	Ortsdiskretisierung partieller Differentialgleichungen . . . . .	259
7.9	Berücksichtigung von Totzeit . . . . .	263
<b>8</b>	<b>Analyse linearer und zeitinvarianter Systeme im Zustandsraum</b>	<b>267</b>
8.1	Transformation auf Normalform . . . . .	267
8.1.1	Transformation auf Jordansche Normalform . . . . .	267
8.1.2	Transformation auf Regelungsnormform . . . . .	270
8.1.3	Transformation auf Beobachtungsnormform . . . . .	273
8.2	Lösung der Zustandsgleichungen . . . . .	274
8.2.1	Matrizen-e-Funktion . . . . .	275
8.2.2	Lösung der Zustandsgleichungen mittels der Transitionsmatrix . . . . .	276
8.2.3	Lösung der homogenen Zustandsdifferentialgleichung mittels Eigenwerten und Eigenvektoren . . . . .	281
8.2.4	Anwendung der Laplace-Transformation . . . . .	284
8.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	288
8.3.1	Definitionen . . . . .	288
8.3.2	Kalmansches Kriterium der Steuerbarkeit . . . . .	290
8.3.3	Steuerbarkeitskriterium nach Gilbert . . . . .	292

8.3.4	Steuerbarkeitskriterium nach Hautus . . . . .	294
8.3.5	Kriterien der Beobachtbarkeit . . . . .	295
8.3.6	Anschauliche Deutung von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	296
8.3.7	Die Kalman-Zerlegung . . . . .	298
8.4	Stabilität . . . . .	298
8.5	Nullstellen im Zustandsraum . . . . .	301
8.5.1	Kompensation und Übertragungsnullstellen . . . . .	303
8.5.2	Invarianzeigenschaft von Nullstellen . . . . .	304
8.6	Modellordnungsreduktion . . . . .	305
8.6.1	Dominanzmaß von Eigenwerten und Modale Ordnungsreduktion . . . . .	306
8.6.2	Ordnungsreduktion durch Balancieren und Abschneiden . . . . .	310
8.6.3	Krylov-unterraumbasierte Ordnungsreduktion . . . . .	312
8.6.4	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen . . . . .	316
<b>9</b>	<b>Entwurf von Zustandsregelungen</b> . . . . .	<b>320</b>
9.1	Struktur einer Zustandsregelung und Problematik . . . . .	320
9.2	Entwurf der Vorsteuerung . . . . .	323
9.3	Reglerentwurf durch Polvorgabe (Eigenwertvorgabe) . . . . .	328
9.3.1	Grundgedanke . . . . .	328
9.3.2	Polvorgabe bei Eingrößensystemen: Reglerformel von <i>J. Ackermann</i> . . . . .	329
9.3.3	Polvorgabe bei Mehrgrößensystemen: Reglerformel von <i>G. Roppenecker</i> und Methode der Vollständigen Modalen Synthese . . . . .	334
9.4	Reglerentwurf durch Minimieren eines quadratischen Gütemaßes: Riccati-Regler . . . . .	338
9.4.1	Grundgedanke . . . . .	338
9.4.2	Quadratisches Gütemaß und Ljapunow-Gleichung . . . . .	339
9.4.3	Berechnung des optimalen Reglers . . . . .	340
9.4.4	Beispiele und Bewertung des Verfahrens . . . . .	343
9.5	Ein Entwurf auf Führungsverhalten: Entkopplung nach <i>Falb und Wolovich</i> . . . . .	345
9.5.1	Begriff der Differenzordnung (relativer Grad) . . . . .	345
9.5.2	Durchführung der Entkopplung . . . . .	347
9.5.3	Anwendung des Verfahrens . . . . .	349
9.6	Zustandsbeobachter . . . . .	353
9.6.1	Struktur des Luenberger-Beobachters . . . . .	353
9.6.2	Bestimmung der Beobachterparameter . . . . .	354
9.6.3	Beobachter reduzierter Ordnung (reduzierter Beobachter) . . . . .	357
9.6.4	Querverbindung zum Kalman-Filter . . . . .	359
9.6.5	Der Beobachter im Regelkreis . . . . .	361
9.6.6	Zustandsregelung unter Verwendung eines Beobachters für die Zustandsdifferenz . . . . .	365

9.7	Berücksichtigung von Störgrößen	367
9.7.1	Störgrößenaufschaltung bei messbarem Störvektor	368
9.7.2	Störgrößenaufschaltung über einen Störbeobachter	371
9.7.3	PI-Zustandsregelung	373
<b>10</b>	<b>Entwurf robuster Regelungen</b>	<b>377</b>
10.1	Robustheit von Regelungen	377
10.1.1	Robustheitsentwurf als Multi-Modell-Problem	377
10.1.2	Robustheitsentwurf als $H_\infty$ -Optimierungsproblem	380
10.2	$H_\infty$ -Entwurf robuster Regelungen	385
10.2.1	NLKF-Entwurf robuster Regelungen	385
10.2.2	Anwendungsbeispiel: Spurgeführter Omnibus	387
10.3	Robustheitsentwurf mittels Straffunktionen	392
10.3.1	Beschreibung der Methode	392
10.3.2	Gradientenformeln mittels der Polempfindlichkeit	394
10.3.3	Beispiel: Verladebrücke	396
<b>11</b>	<b>Mathematischer Anhang</b>	<b>400</b>
11.1	Elemente der Laplace-Transformation	400
11.1.1	Das Laplace-Integral	400
11.1.2	Die Laplace-Transformation	400
11.1.3	Rechnen mit $\delta$ -Funktionen	401
11.1.4	Rechenregeln der Laplace-Transformation	402
11.1.5	Lösung von Differentialgleichungen	404
11.1.5.1	Differentialgleichungen erster Ordnung	404
11.1.5.2	Homogene Differentialgleichung höherer Ordnung	405
11.1.5.3	Inhomogene Differentialgleichung höherer Ordnung	406
11.1.5.4	Systeme von Differentialgleichungen	406
11.1.6	Fourier-Integral und Parseval-Theorem	407
11.2	Residuum und Residuensatz bei rationalen Funktionen	407
11.3	Matrizenrechnung	408
11.3.1	Lineare Abhängigkeit und Unabhängigkeit von Vektoren	408
11.3.2	Grundregeln der Matrizenrechnung	408
11.3.3	Inverse Matrix	410
11.3.4	Rang einer Matrix	411
11.3.5	Determinanten	412
11.3.5.1	Der Determinantenbegriff	412
11.3.5.2	Eigenschaften der Determinanten	412
11.3.6	Lineare Gleichungen	413
11.3.6.1	Das homogene Gleichungssystem	413

11.3.6.2	Das inhomogene Gleichungssystem	413
11.3.6.3	Das lineare Gleichungssystem mit eindeutiger Lösung	414
11.3.6.4	Das unterbestimmte und das überbestimmte Gleichungssystem	415
11.3.7	Eigenwerte und Eigenvektoren	415
11.3.8	Symmetrische Matrizen	416
11.3.9	Spur einer Matrix	417
11.3.10	Die Moore-Penrosesche Pseudo-Inverse	418
11.3.11	Singulärwertzerlegung	420
11.3.12	Normen	421
11.3.12.1	Vektornormen	421
11.3.12.2	Matrix- und Operatornormen	422
11.3.12.3	$H_\infty$ -Norm eines LZI-Glieds	423
11.3.13	Matrix-Analysis	424
11.4	Gütevektoroptimierung	427
11.4.1	Problemstellung der Mehrzieloptimierung	427
11.4.2	Verfahren der Gütevektoroptimierung nach G. Kreißelmeier und R. Steinhauser	428
11.4.3	Analytische Approximation der Maximumfunktion	429
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>431</b>
Literatur zu Kapitel 1		431
Literatur zu Kapitel 2		431
Literatur zu Kapitel 3		432
Literatur zu Kapitel 4		432
Literatur zu Kapitel 5		432
Literatur zu Kapitel 6		433
Literatur zu Kapitel 7		434
Literatur zu Kapitel 8		435
Literatur zu Kapitel 9		438
Literatur zu Kapitel 10		440
Literatur zu Kapitel 11		441
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>443</b>