

# 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 . . . . .	59
2.5	Eigenschaften der linearen zeitinvarianten Übertragungsglieder (LZI-Glieder) . . . . .	60
2.5.1	Kenngößen 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
<b>3</b>	<b>Analyse von Regelsystemen</b> . . . . .	<b>81</b>
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

<b>4</b>	<b>Frequenzkennlinien</b>	<b>121</b>
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 <sub>1</sub> -Glied)	124
4.3.4	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P-T <sub>2</sub> -Glied)	125
4.3.5	Totzeitglied (T <sub>t</sub> -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
<b>5</b>	<b>Die Wurzelortskurve</b>	<b>146</b>
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
<b>6</b>	<b>Synthese (Entwurf) von Regelkreisen</b>	<b>168</b>
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
<b>7</b>	<b>Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen)</b>	<b>240</b>
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
<b>8</b>	<b>Analyse linearer und zeitinvarianter Systeme im Zustandsraum</b>	<b>268</b>
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-unterraum-basierte Ordnungsreduktion	313
8.6.4	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen	318
<b>9</b>	<b>Entwurf von Zustandsregelungen</b>	<b>321</b>
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
<b>10</b>	<b>Entwurf robuster Regelungen . . . . .</b>	<b>378</b>
10.1	Robustheit von Regelungen . . . . .	378
10.1.1	Robustheitsentwurf als Multi-Modell-Problem . . . . .	378
10.1.2	Robustheitsentwurf als $H_\infty$ -Optimierungsproblem . . . . .	381
10.2	$H_\infty$ -Entwurf robuster Regelungen . . . . .	386
10.2.1	NLKF-Entwurf robuster Regelungen . . . . .	386
10.2.2	Anwendungsbeispiel: Spurgeführter 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
<b>11</b>	<b>Mathematischer Anhang . . . . .</b>	<b>401</b>
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 $\delta$ -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	$H_\infty$ -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
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>432</b>
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
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>444</b>