

# Inhaltsverzeichnis

1	<b>Grundbegriffe der Regelungstechnik</b> .....	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 .....	10
1.6	Erweiterung des Regelungsbegriffs und Charakterisierung der Regelungstechnik ..	14
	Schrifttum zu Kapitel 1 .....	19
2	<b>Das Strukturbild (Signalflußplan, Wirkplan) als anschauliches Modell dynamischer Systeme</b> .....	21
2.1	Einführung des Strukturbildes .....	21
2.2	Aufstellen des Strukturbildes an Beispielen	25
2.2.1	Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs	25
2.2.2	Schüttgutregelung .....	29
2.2.3	Abflußregelung .....	30
2.3	Die Blöcke des Strukturbildes .....	33
2.3.1	Der Block als Übertragungsglied .....	33
2.3.2	Proportionalglied (P-Glied) .....	34
2.3.3	Integrierglied (I-Glied) .....	35
2.3.4	Differenzierglied (D-Glied) .....	36
2.3.5	Totzeitglied ( $T_t$ -Glied, TZ-Glied) .....	37
2.3.6	Summierglied (S-Glied) .....	37
2.3.7	Kennlinienglied (KL-Glied) .....	37
2.3.8	Multiplizierglied (M-Glied) .....	38
2.3.9	Elementare und zusammengesetzte Übertragungsglieder .....	39
2.3.10	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P- $T_1$ -Glied, $VZ_1$ -Glied) .....	39
2.3.11	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P- $T_2$ -Glied, $VZ_2$ -Glied) .....	41
2.3.12	Kennlinienglied mit mehreren Eingangsgrößen .....	45
2.3.13	Zusammenfassung .....	46
2.4	Klassifikation der Übertragungsglieder ...	46
2.4.1	Allgemeiner Begriff des Übertragungsgliedes .....	46
2.4.2	Lineare Übertragungsglieder .....	48
2.4.3	Rationale Übertragungsglieder (R-Glieder)	50
2.4.4	Totzeitsysteme (TZ-Systeme) .....	53
2.4.5	Differenzgleichungsglieder .....	54

2.4.6	Abtastsysteme .....	55
2.4.7	Lineare Differentialgleichungsglieder mit zeitabhängigen Parametern .....	56
2.4.8	Einteilung der linearen Übertragungsglieder in zeitinvariante und zeitvariante (LZI- und LZV-Glieder) .....	57
2.4.9	Übersichtsschema für die Übertragungsglieder.....	60
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 .....	66
2.6	Bestimmung des stationären Zustands aus dem Strukturbild .....	66
2.7	Linearisierung um den Arbeitspunkt .....	70
2.8	Umformung des Strukturbildes .....	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 Verzögerungsgliedes 2. Ordnung ....	79
2.9.4	Approximation von Verzögerungsgliedern höherer Ordnung .....	80
	Schrifttum zu Kapitel 2 .....	83
<b>3</b>	<b>Aufstellen der Systemgleichungen .....</b>	<b>84</b>
3.1	Gesamtsystem, Teilsysteme und Elementarfunktionen .....	84
3.2	Mathematische Beschreibung einiger Bauelemente .....	92
3.2.1	Bauelemente mechanischer Systeme .....	92
3.2.2	Die Gleichstrommaschine .....	97
3.2.3	Die Synchronmaschine .....	103
3.2.4	Hydraulischer Stellantrieb .....	116
3.2.5	Pneumatische Leitung .....	124
3.2.6	Praktische Modelle .....	128
	Schrifttum zu Kapitel 3 .....	133

<b>4</b>	<b>Analyse des Regelkreises</b> .....	<b>135</b>
4.1	Gleichung des Regelkreises .....	135
4.2	Beispiele .....	136
4.3	Standardregelkreis .....	141
4.4	Eigenschaften des offenen Kreises .....	141
4.5	Stationäres Verhalten des Regelkreises ...	143
4.6	Definition der Stabilität .....	145
4.7	Grundlegendes Stabilitätskriterium .....	147
4.8	Frequenzgang .....	153
4.9	Ortskurve des offenen Kreises .....	155
4.10	Nyquist-Kriterium .....	158
4.10.1	Herleitung des Nyquist-Kriteriums .....	158
4.10.2	Spezielle Formen des Nyquist-Kriteriums	161
4.10.3	Beispiele zum Nyquist-Kriterium .....	163
4.11	Weitere Stabilitätskriterien .....	165
4.11.1	Argumentänderung von Polynomen und Kriterium von Cremer-Leonhard .....	165
4.11.2	Vorzeichen der Koeffizienten der charakte- ristischen Gleichung und Lage der Null- stellen .....	166
4.11.3	Kriterium von Hurwitz .....	167
4.11.4	Kriterium von Routh .....	169
	Schrifttum zu Kapitel 4 .....	171
<b>5</b>	<b>Frequenzkennlinien</b> .....	<b>172</b>
5.1	Charakterisierung des Frequenzkennlinien- verfahrens .....	172
5.2	Definition der Frequenzkennlinien .....	173
5.3	Frequenzkennlinien einfacher Glieder .....	175
5.3.1	Proportionalglied (P-Glied) .....	175
5.3.2	Differenzierglied (D-Glied) .....	175
5.3.3	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P-T <sub>1</sub> -Glied, VZ <sub>1</sub> -Glied) .....	175
5.3.4	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P-T <sub>2</sub> -Glied, VZ <sub>2</sub> -Glied) .....	177
5.3.5	Totzeitglied (T <sub>t</sub> -Glied, TZ-Glied) .....	179
5.4	Frequenzkennlinien des offenen Kreises ...	179
5.5	Frequenzkennlinien von geschlossenen Wirkungskreisen .....	184
5.6	Nyquist-Kriterium in Frequenzkennlinien- darstellung .....	187
5.6.1	Formulierung und Beispiele .....	187
5.6.2	Herleitung .....	189
5.7	Minimalphasenglieder und Allpässe .....	192

5.8	Numerische Berechnung der Frequenzkennlinien .....	196
	Schrifttum zu Kapitel 5 .....	199
<b>6</b>	<b>Die Wurzelortskurve .....</b>	<b>200</b>
6.1	Allgemeine Charakterisierung des Verfahrens .....	200
6.2	Definition der Wurzelortskurve .....	201
6.3	Geometrische Eigenschaften der Wurzelortskurve .....	203
6.4	Herleitung der geometrischen Eigenschaften der Wurzelortskurve.....	209
6.5	Analytische Darstellung der Wurzelortskurve .....	214
6.6	Wurzelortskurve und Zeitverhalten des Regelkreises .....	216
6.7	Digitale Berechnung des Wurzelortes .....	221
6.7.1	Prinzip des Verfahrens .....	222
6.7.2	Beschreibung der einzelnen Rechenschritte .....	222
	Schrifttum zu Kapitel 6 .....	225
<b>7</b>	<b>Synthese (Entwurf) von Regelkreisen .....</b>	<b>226</b>
7.1	Problemstellung .....	226
7.2	Forderungen an die Regelung .....	226
7.3	Grundsätzliche Struktur des Reglers .....	234
7.4	Realisierungsprobleme und realistische Reglerstruktur: PI-, PID- und PD-Regler ...	235
7.5	Faustregeln für die Wahl der Reglerparameter und Beispiele .....	240
7.6	Anwendung des Frequenzkennlinienverfahrens .....	243
7.7	Anwendung des Wurzelortsverfahrens .....	248
7.8	Einstellregeln für die Reglerparameter .....	253
7.8.1	Parameteroptimierung mittels eines Gütemaßes .....	253
7.8.2	Das Betragsoptimum .....	258
7.8.3	Das symmetrische Optimum .....	261
7.8.4	Einstellregeln nach Ziegler-Nichols .....	264
7.9	Kompensationsregler .....	266
7.10	Synthese durch Veränderung der Regelungsstruktur .....	269
7.10.1	Kaskadenregelung .....	270
7.10.2	Störgrößenaufschaltung .....	273

7.11	Analoge Realisierung des Reglers .....	274
7.12	Digitale Realisierung des Reglers .....	277
	Schrifttum zu Kapitel 7 .....	282
<b>8</b>	<b>Anwendung der Entwurfsverfahren .....</b>	<b>284</b>
8.1	Erarbeiten der Aufgabenstellung .....	284
8.2	Drehmomentregelung einer Pendelmaschine	288
8.2.1	Aufgabenstellung .....	288
8.2.2	Das mathematische Modell des Regelkreises .....	290
8.2.3	Die Frequenzkennlinien der Regelstrecke ..	293
8.2.4	Der Entwurf des Reglers .....	296
8.2.5	Entwurfsvarianten .....	298
8.3	Realisierung des Regelungssystems .....	301
8.3.1	Konzept und Wirklichkeit .....	301
8.3.2	Analoge Realisierung des Reglers .....	301
8.3.3	Digitale Realisierung der Korrekturglieder	306
8.3.4	Begrenzung des digitalen PI-Reglers .....	308
8.3.5	Einfluß der digitalen Reglerrealisierung auf den Reglerentwurf .....	311
8.3.6	Einbinden der Regelung in das gesamte Automatisierungssystem .....	313
8.4	Polradwinkelregelung eines Synchrongenerators .....	316
8.4.1	Regelung bei der elektrischen Energieerzeugung .....	316
8.4.2	Mathematische Beschreibung der Anlage ..	318
8.4.3	Linearisierung der Struktur der Regelstrecke .....	319
8.4.4	Reglerentwurf mit dem Frequenzkennlinienverfahren .....	323
8.4.5	Reglerentwurf mit dem Wurzelortungsverfahren .....	326
8.5	Verstellpropeller - Regelung für einen Schiffsantrieb .....	329
8.5.1	Aufbau des Regelungssystems .....	329
8.5.2	Mathematische Beschreibung der Regelstrecke .....	330
8.5.3	Linearisierung .....	334
8.5.4	Reglerentwürfe .....	336
8.5.5	Überprüfung des Entwurfs durch Simulation .....	343
8.6	Stabilisierte Plattform mit hydraulischen Antrieben .....	345
8.6.1	Aufgabenstellung .....	345
8.6.2	Das mathematische Modell .....	345
8.6.3	Linearisieren der Regelstrecke .....	348
8.6.4	Frequenzkennlinien der Regelstrecke .....	350

8.6.5	Der Druckregelkreis .....	353
8.6.6	Der Winkelregelkreis .....	355
8.7	Druckregelung einer Gasleitung .....	358
8.7.1	Beschreibung des Regelungssystems .....	358
8.7.2	Frequenzkennlinien und Übergangsfunktionen der linearisierten Regelstrecke .....	359
8.7.3	Entwurf des Druckregelkreises .....	361
	Schrifttum zu Kapitel 8 .....	363
<b>9</b>	<b>Mehrfachregelungen .....</b>	<b>365</b>
9.1	Struktur gekoppelter Systeme .....	365
9.2	Synthese von Mehrfachregelungen durch Entkopplung .....	370
9.3	Stabilität von Mehrfachregelungen .....	377
	Schrifttum zu Kapitel 9 .....	378
<b>10</b>	<b>Beispiel zur Mehrfachregelung: Lageregelung eines Mehrmotorenantriebs .....</b>	<b>379</b>
10.1	Allgemeine Struktur .....	379
10.2	Beschreibung der Anlage .....	380
10.3	Die Getriebeverspannung .....	381
10.4	Drehzahlregelung bei Mehrmaschinenantrieben .....	382
10.5	Überprüfung des Entwurfs durch Simulation .....	384
<b>11</b>	<b>Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen) .....</b>	<b>387</b>
11.1	Frequenzbereichs- und Zustandsmethodik	387
11.2	Einführung von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen) .....	388
11.3	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus Differentialgleichungen höherer Ordnung..	393
11.4	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus der komplexen Übertragungsgleichung ....	396
11.4.1	Regelungsnormalform der Zustandsgleichungen .....	396
11.4.2	Beobachtungsnormalform der Zustandsgleichungen .....	398
11.4.3	Jordansche Normalform der Zustandsgleichungen .....	398
11.5	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus dem Strukturbild .....	401

11.6	Allgemeine Form der Zustandsgleichungen eines linearen Systems .....	403
11.7	Linearisierung nichtlinearer Systeme um einen stationären Zustand .....	405
11.8	Ortsdiskretisierung partieller Differentialgleichungen .....	407
11.9	Berücksichtigung von Totzeit .....	411
	Schrifttum zu Kapitel 11 .....	414
<b>12</b>	<b>Analyse linearer und zeitinvarianter Systeme im Zustandsraum .....</b>	<b>416</b>
12.1	Transformation auf Normalform .....	416
12.1.1	Transformation auf Jordansche Normalform .....	416
12.1.2	Transformation auf Regelungsnormalform .....	419
12.1.3	Transformation auf Beobachtungsnormalform .....	422
12.2	Lösung der Zustandsgleichungen .....	423
12.2.1	Matrizen-e-Funktion .....	424
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichungen mittels der Transitionsmatrix .....	425
12.2.3	Lösung der homogenen Zustandsdifferentialgleichung mittels Eigenwerten und Eigenvektoren .....	430
12.2.4	Anwendung der Laplace-Transformation ..	433
12.2.5	Numerische Lösung der Zustandsgleichungen .....	437
12.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	442
12.3.1	Definitionen .....	442
12.3.2	Kalmansches Kriterium der Steuerbarkeit ..	445
12.3.3	Steuerbarkeitskriterium nach Gilbert ....	447
12.3.4	Steuerbarkeitskriterium nach Hautus ....	449
12.3.5	Kriterien der Beobachtbarkeit .....	450
12.3.6	Anschauliche Deutung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	451
12.4	Stabilität .....	452
12.5	Dominanzmaß von Eigenwerten .....	455
12.6	Numerische Berechnung von Frequenzkennlinien aus der Zustandsdarstellung ..	460
	Schrifttum zu Kapitel 12 .....	462
<b>13</b>	<b>Entwurf vollständiger Zustandsrückführungen .....</b>	<b>464</b>
13.1	Struktur einer Zustandsregelung und Problematik .....	464
13.2	Wahl des Vorfilters .....	467

13.3	Reglerentwurf durch Polvorgabe (Eigenwertvorgabe) .....	468
13.3.1	Grundgedanke .....	468
13.3.2	Polvorgabe bei Eingrößensystemen: Formel von J. Ackermann .....	470
13.3.3	Eine praktikable Methode zur Polvorgabe bei Mehrgrößensystemen: Modale Regelung .....	474
13.4	Reglerentwurf durch Minimieren eines quadratischen Gütemaßes: Riccati-Regler .....	479
13.4.1	Grundgedanke .....	479
13.4.2	Quadratisches Gütemaß und Ljapunow-Gleichung .....	480
13.4.3	Berechnung des optimalen Reglers .....	481
13.4.4	Beispiele und Bewertung des Verfahrens ..	484
13.4.5	Numerische Lösung der Ljapunow- und Riccati-Gleichung .....	486
13.5	Ein Entwurf auf Führungsverhalten: Entkopplung nach Falb - Wolovich .....	489
13.5.1	Begriff der Differenzordnung .....	489
13.5.2	Durchführung der Entkopplung .....	491
13.5.3	Anwendung des Verfahrens .....	493
13.6	Allgemeine Zustandsreglerformel von G. Roppenecker und die Methode der Vollständigen Modalen Synthese .....	496
13.7	Zustandsbeobachter .....	501
13.7.1	Struktur des Luenberger-Beobachters ....	501
13.7.2	Bestimmung der Beobachterparameter ...	502
13.7.3	Beobachterentwurf mittels komplexer Übertragungsfunktionen .....	505
13.7.4	Beobachter reduzierter Ordnung (reduzierter Beobachter) .....	508
13.7.5	Querverbindung zum Kalman-Filter .....	511
13.7.6	Der Beobachter im Regelkreis .....	513
13.8	Berücksichtigung von Störgrößen .....	517
13.8.1	Störgrößenaufschaltung und Störmodell ...	518
13.8.2	PI-Zustandsregler .....	521
	Schrifttum zu Kapitel 13 .....	525
<b>14</b>	<b>Entwurf von Ausgangsrückführungen ....</b>	<b>527</b>
14.1	Problemstellung .....	527
14.2	Ausgangsrückführung mit Vorsteuerung ..	529
14.3	Konstante und dynamische Ausgangsrückführung .....	530
14.4	Entwurf von Ausgangsrückführungen durch Approximation des Steuervektors einer vollständigen Zustandsrückführung ..	533



14.4.1	Mathematische Vorbemerkung: Lösung eines Extremalproblems mit Nebenbedingungen .....	533
14.4.2	Durchführung des Entwurfs .....	535
14.4.3	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen .....	537
14.5	Entwurf von Ausgangsrückführungen mittels der Vollständigen Modalen Synthese ..	539
14.5.1	Grundgedanke .....	539
14.5.2	Gradientenformeln .....	541
14.5.3	Anwendungsbeispiel: Dampferzeuger .....	542
14.5.4	Erste Erweiterung des Verfahrens: Vorgabe von Eigenwertbereichen statt fester Eigenwertpositionen .....	545
14.5.5	Zweite Erweiterung des Verfahrens: Hinzunahme zusätzlicher Gütemaße .....	547
14.6	Entwurf von Ausgangsrückführungen nach Riccati-Art .....	550
14.7	Direkte Methode zum Entwurf von Ausgangsrückführungen durch Polvorgabe .....	551
14.7.1	Prinzip der Methode .....	551
14.7.2	Stützstellenvorgabe statt Polvorgabe .....	553
14.7.3	Spezialfall des Eingrößensystems .....	555
14.7.4	Kombination der Direkten Methode zur Polvorgabe mit der Festlegung von Parametervektoren.....	557
14.7.5	Anwendungsbeispiel: Kraftfahrzeugmotor .	559
	Schrifttum zu Kapitel 14 .....	563
<b>15</b>	<b>Entwurf robuster Regelungen .....</b>	<b>565</b>
15.1	Robustheit von Regelungen .....	565
15.2	Robustheitsentwurf mittels Straffunktionen	568
15.2.1	Beschreibung der Methode .....	568
15.2.2	Gradientenformeln mittels der Polempfindlichkeit .....	570
15.2.3	Beispiel: Verladebrücke .....	572
15.3	Robustheitsentwurf mittels der Vollständigen Modalen Synthese .....	575
15.3.1	Beschreibung des Verfahrens.....	575
15.3.2	Anwendungsbeispiel: Spurgeführter Omnibus .....	577
	Schrifttum zu Kapitel 15 .....	583
<b>16</b>	<b>Vereinfachung großer Systemmodelle durch Ordnungsreduktion .....</b>	<b>584</b>
16.1	Problemstellung .....	584
16.2	Modale Ordnungsreduktion nach L. Litz ..	585

16.2.1	Konstruktion des reduzierten Modells . . . .	585
16.2.2	Näherungsweise Rekonstruktion der nicht- dominanten Modalkoordinaten . . . . .	587
16.2.3	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen . . . . .	588
16.3	Ordnungsreduktion durch Minimieren eines Gleichungsfehlers nach E. Eitelberg . . . . .	590
16.3.1	Grundgedanke . . . . .	590
16.3.2	Durchführung der Methode . . . . .	590
16.3.3	Anwendungsbeispiel : Dreistoff-Destilla- tionskolonne . . . . .	592
16.4	Verwendung der Ordnungsreduktion . . . . .	594
	Schrifttum zu Kapitel 16 . . . . .	595
<b>17</b>	<b>Mathematischer Anhang . . . . .</b>	<b>597</b>
17.1	Elemente der Laplace-Transformation . . . .	597
17.1.1	Das Laplace-Integral . . . . .	597
17.1.2	Die Laplace-Transformation . . . . .	597
17.1.3	Rechnen mit $\delta$ -Funktionen . . . . .	598
17.1.4	Rechenregeln der Laplace-Transformation	600
17.1.5	Lösung von Differentialgleichungen . . . . .	602
17.1.6	Fourier-Integral und Parseval-Theorem . .	604
17.2	Residuum und Residuensatz bei rationalen Funktionen . . . . .	604
17.3	Matrizenrechnung . . . . .	605
17.3.1	Lineare Abhängigkeit und Unabhängigkeit von Vektoren . . . . .	605
17.3.2	Grundregeln der Matrizenrechnung . . . . .	605
17.3.3	Inverse Matrix . . . . .	608
17.3.4	Rang einer Matrix . . . . .	608
17.3.5	Determinanten . . . . .	609
17.3.6	Lineare Gleichungen . . . . .	610
17.3.7	Eigenwerte und Eigenvektoren . . . . .	612
17.3.8	Symmetrische Matrizen . . . . .	613
17.3.9	Spur einer Matrix . . . . .	614
17.3.10	Die Moore-Penrosesche Pseudo-Inverse . .	615
17.3.11	Matrix-Analysis . . . . .	617
17.4	Gütevektroptimierung . . . . .	619
17.4.1	Problemstellung der Mehrzieloptimierung	619
17.4.2	Verfahren der Gütevektroptimierung nach G. Kreisselmeier und R. Steinhauser . . . .	621
17.4.3	Analytische Approximation der Maximum- funktion $\alpha(\underline{x})$ . . . . .	622
	Schrifttum zu Kapitel 17 . . . . .	623
	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>625</b>