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	10
1.6	Erweiterung des Regelungsbegriffs und Charakterisierung der Regelungstechnik	14
	Schrifttum zu Kapitel 1	19
2	**Das Strukturbild (Signalflußplan, Wirkplan) als anschauliches Modell dynamischer Systeme**	**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 Strukurbildes	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	Differenzengleichungsglieder	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 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 Differenzengleichungsgliedern 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

3 Aufstellen der Systemgleichungen 84

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

4	**Analyse des Regelkreises**	**135**
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 charakteristischen Gleichung und Lage der Nullstellen	166
4.11.3	Kriterium von Hurwitz	167
4.11.4	Kriterium von Routh	169
	Schrifttum zu Kapitel 4	171
5	**Frequenzkennlinien**	**172**
5.1	Charakterisierung des Frequenzkennlinienverfahrens	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_1-Glied, VZ_1-Glied)	175
5.3.4	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P-T_2-Glied, VZ_2-Glied)	177
5.3.5	Totzeitglied (T_t-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

6 Die Wurzelortskurve ... 200

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

7 Synthese (Entwurf) von Regelkreisen ... 226

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

8 Anwendung der Entwurfsverfahren 284
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 Wurzelortsverfahren 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

9 Mehrfachregelungen 365

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

10 Beispiel zur Mehrfachregelung: Lageregelung eines Mehrmotorenantriebs 379

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

11 Beschreibung dynamischer Systeme mit Hilfe von Zustandsvariablen (Zustandsgrößen) 387

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

12 Analyse linearer und zeitinvarianter Systeme im Zustandsraum 416

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 Zustandgleichungen..... 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

13 Entwurf vollständiger Zustandsrückführungen 464

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

14 Entwurf von Ausgangsrückführungen 527

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: Kraftfahrzeugmoter . 559

Schrifttum zu Kapitel 14 563

15 Entwurf robuster Regelungen 565

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

16 Vereinfachung großer Systemmodelle durch Ordnungsreduktion 584

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-Destillationskolonne 592

16.4 Verwendung der Ordnungsreduktion 594

Schrifttum zu Kapitel 16 595

17 Mathematischer Anhang 597

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 δ-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 Gütevektoroptimierung 619
17.4.1 Problemstellung der Mehrzieloptimierung 619
17.4.2 Verfahren der Gütevektoroptimierung nach G. Kreisselmeier und R. Steinhauser 621
17.4.3 Analytische Approximation der Maximumfunktion $\alpha(\underline{r})$. 622

Schrifttum zu Kapitel 17 623

Sachwortverzeichnis 625