

# Inhaltsverzeichnis

1	<b>Grundbegriffe der Regelungstechnik .....</b>	1	2.4.6	Abtastsysteme .....	55
1.1	Notwendigkeit der Regelung .....	1	2.4.7	Lineare Differentialgleichungsglieder mit zeitabhängigen Parametern .....	56
1.2	Aufbau und Wirkungsweise einer Regelung	2	2.4.8	Einteilung der linearen Übertragungsglieder in zeitinvariante und zeitvariante (LZI- und LZV-Glieder) .....	57
1.3	Beispiele von Regelungen .....	4	2.4.9	Übersichtsschema für die Übertragungsglieder .....	60
1.4	Regelung und Steuerung .....	7	2.5	Eigenschaften der linearen zeitinvarianten Übertragungsglieder (LZI-Glieder) .....	60
1.5	Forderungen an die Regelung und Bearbeitung einer Regelungsaufgabe .....	10	2.5.1	Kenngrößen der LZI-Glieder .....	60
1.6	Erweiterung des Regelungsbegriffs und Charakterisierung der Regelungstechnik ..	14	2.5.2	Sprungantwort von rationalen Übertragungsgliedern (R-Gliedern) .....	62
	Schrifttum zu Kapitel 1 .....	19	2.5.3	Sprungantwort von Totzeitsystemen (TZ-Systemen) .....	64
2	<b>Das Strukturbild (Signalflußplan, Wirkplan) als anschauliches Modell dynamischer Systeme .....</b>	21	2.5.4	Sprungantwort von Differenzengleichungsgliedern .....	66
2.1	Einführung des Strukturbildes .....	21	2.6	Bestimmung des stationären Zustands aus dem Strukturbild .....	66
2.2	Aufstellen des Strukturbildes an Beispielen	25	2.7	Linearisierung um den Arbeitspunkt .....	70
2.2.1	Drehzahlregelung eines Gleichstromantriebs	25	2.8	Umformung des Strukturbildes .....	72
2.2.2	Schüttgutregelung .....	29	2.9	Experimentelle Bestimmung der Systemparameter .....	77
2.2.3	Abflußregelung .....	30	2.9.1	Aufgabenstellung und Verfahrensübersicht	77
2.3	Die Blöcke des Strukturbildes .....	33	2.9.2	Bestimmung der Parameter von rationalen Übertragungsgliedern 1. Ordnung .....	78
2.3.1	Der Block als Übertragungsglied .....	33	2.9.3	Bestimmung der Parameter des aperiodischen Verzögerungsgliedes 2. Ordnung .....	79
2.3.2	Proportionalglied (P-Glied) .....	34	2.9.4	Approximation von Verzögerungsgliedern höherer Ordnung .....	80
2.3.3	Integrerglied (I-Glied) .....	35		Schrifttum zu Kapitel 2 .....	83
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 <sub>1</sub> -Glied) .....	39	3	<b>Aufstellen der Systemgleichungen .....</b>	84
2.3.11	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P- $T_2$ -Glied, VZ <sub>2</sub> -Glied) .....	41	3.1	Gesamtsystem, Teilsysteme und Elementarfunktionen .....	84
2.3.12	Kennlinienglied mit mehreren Eingangsgrößen .....	45	3.2	Mathematische Beschreibung einiger Bauelemente .....	92
2.3.13	Zusammenfassung .....	46	3.2.1	Bauelemente mechanischer Systeme .....	92
2.4	Klassifikation der Übertragungsglieder ..	46	3.2.2	Die Gleichstrommaschine .....	97
2.4.1	Allgemeiner Begriff des Übertragungsgliedes .....	46	3.2.3	Die Synchronmaschine .....	103
2.4.2	Lineare Übertragungsglieder .....	48	3.2.4	Hydraulischer Stellantrieb .....	116
2.4.3	Rationale Übertragungsglieder (R-Glieder)	50	3.2.5	Pneumatische Leitung .....	124
2.4.4	Totzeitsysteme (TZ-Systeme) .....	53	3.2.6	Praktische Modelle .....	128
2.4.5	Differenzengleichungsglieder .....	54		Schrifttum zu Kapitel 3 .....	133

11.6	Allgemeine Form der Zustandsgleichungen eines linearen Systems .....	403	13.3	Reglerentwurf durch Polvorgabe (Eigenwertvorgabe) .....	468
11.7	Linearisierung nichtlinearer Systeme um einen stationären Zustand .....	405	13.3.1	Grundgedanke .....	468
11.8	Ortsdiskretisierung partieller Differentialgleichungen .....	407	13.3.2	Polvorgabe bei Eingrößensystemen: Formel von J. Ackermann .....	470
11.9	Berücksichtigung von Totzeit .....	411	13.3.3	Eine praktikable Methode zur Polvorgabe bei Mehrgrößensystemen: Modale Regelung	474
	Schrifttum zu Kapitel 11 .....	414	13.4	Reglerentwurf durch Minimieren eines quadratischen Gütemaßes: Riccati-Regler .....	479
12	<b>Analyse linearer und zeitinvarianter Systeme im Zustandsraum .....</b>	<b>416</b>	13.4.1	Grundgedanke .....	479
12.1	Transformation auf Normalform .....	416	13.4.2	Quadratisches Gütemaß und Ljapunow-Gleichung .....	480
12.1.1	Transformation auf Jordansche Normalform .....	416	13.4.3	Berechnung des optimalen Reglers .....	481
12.1.2	Transformation auf Regelungsnormalform .....	419	13.4.4	Beispiele und Bewertung des Verfahrens ..	484
12.1.3	Transformation auf Beobachtungsnormalform .....	422	13.4.5	Numerische Lösung der Ljapunow- und Riccati-Gleichung .....	486
12.2	Lösung der Zustandsgleichungen .....	423	13.5	Ein Entwurf auf Führungsverhalten: Entkopplung nach Falb- Wolovich .....	489
12.2.1	Matrizen-e-Funktion .....	424	13.5.1	Begriff der Differenzordnung .....	489
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichungen mittels der Transitionsmatrix .....	425	13.5.2	Durchführung der Entkopplung .....	491
12.2.3	Lösung der homogenen Zustandsdifferentialgleichung mittels Eigenwerten und Eigenvektoren .....	430	13.5.3	Anwendung des Verfahrens .....	493
12.2.4	Anwendung der Laplace-Transformation ..	433	13.6	Allgemeine Zustandsreglerformel von G. Roppeneker und die Methode der Vollständigen Modalen Synthese .....	496
12.2.5	Numerische Lösung der Zustandsgleichungen .....	437	13.7	Zustandsbeobachter .....	501
12.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	442	13.7.1	Struktur des Luenberger-Beobachters ..	501
12.3.1	Definitionen .....	442	13.7.2	Bestimmung der Beobachterparameter ..	502
12.3.2	Kalmansches Kriterium der Steuerbarkeit ..	445	13.7.3	Beobachterentwurf mittels komplexer Übertragungsfunktionen .....	505
12.3.3	Steuerbarkeitskriterium nach Gilbert ..	447	13.7.4	Beobachter reduzierter Ordnung (reduzierter Beobachter) .....	508
12.3.4	Steuerbarkeitskriterium nach Hautus ..	449	13.7.5	Querverbindung zum Kalman-Filter .....	511
12.3.5	Kriterien der Beobachtbarkeit .....	450	13.7.6	Der Beobachter im Regelkreis .....	513
12.3.6	Anschauliche Deutung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit .....	451	13.8	Berücksichtigung von Störgrößen .....	517
12.4	Stabilität .....	452	13.8.1	Störgrößenaufschaltung und Störmodell ..	518
12.5	Dominanzmaß von Eigenwerten .....	455	13.8.2	PI-Zustandsregler .....	521
12.6	Numerische Berechnung von Frequenzkennlinien aus der Zustandsdarstellung ..	460		Schrifttum zu Kapitel 13 .....	525
	Schrifttum zu Kapitel 12 .....	462			
13	<b>Entwurf vollständiger Zustandsrückführungen .....</b>	<b>464</b>	14	<b>Entwurf von Ausgangsrückführungen ..</b>	<b>527</b>
13.1	Struktur einer Zustandsregelung und Problematik .....	464	14.1	Problemstellung .....	527
13.2	Wahl des Vorfilters .....	467	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	16.2.1	Konstruktion des reduzierten Modells ....	585	
14.4.2	Durchführung des Entwurfs .....	535	16.2.2	Näherungsweise Rekonstruktion der nicht-dominanten Modalkoordinaten .....	587	
14.4.3	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen .....	537	16.2.3	Anwendungsbeispiel: Hinterachsprüfstand für Lastkraftwagen .....	588	
14.5	Entwurf von Ausgangsrückführungen mittels der Vollständigen Modalen Synthese ..	539	16.3	Ordnungsreduktion durch Minimieren eines Gleichungsfehlers nach E. Eitelberg .....	590	
14.5.1	Grundgedanke .....	539	16.3.1	Grundgedanke .....	590	
14.5.2	Gradientenformeln .....	541	16.3.2	Durchführung der Methode .....	590	
14.5.3	Anwendungsbeispiel: Dampferzeuger .....	542	16.3.3	Anwendungsbeispiel : Dreistoff-Destillationskolonne .....	592	
14.5.4	Erste Erweiterung des Verfahrens: Vorgabe von Eigenwertbereichen statt fester Eigenwertpositionen .....	545	16.4	Verwendung der Ordnungsreduktion .....	594	
14.5.5	Zweite Erweiterung des Verfahrens: Hinzunahme zusätzlicher Gütemaße .....	547	Schrifttum zu Kapitel 16 .....			595
14.6	Entwurf von Ausgangsrückführungen nach Riccati-Art .....	550	17	<b>Mathematischer Anhang</b> .....	597	
14.7	Direkte Methode zum Entwurf von Ausgangsrückführungen durch Polvorgabe ....	551	17.1	Elemente der Laplace-Transformation ....	597	
14.7.1	Prinzip der Methode .....	551	17.1.1	Das Laplace-Integral .....	597	
14.7.2	Stützstellenvorgabe statt Polvorgabe .....	553	17.1.2	Die Laplace-Transformation .....	597	
14.7.3	Spezialfall des Eingrößensystems .....	555	17.1.3	Rechnen mit $\delta$ -Funktionen .....	598	
14.7.4	Kombination der Direkten Methode zur Polvorgabe mit der Festlegung von Parametervektoren.....	557	17.1.4	Rechenregeln der Laplace-Transformation	600	
14.7.5	Anwendungsbeispiel: Kraftfahrzeugmotor ..	559	17.1.5	Lösung von Differentialgleichungen .....	602	
	Schrifttum zu Kapitel 14 .....	563	17.1.6	Fourier-Integral und Parseval-Theorem ..	604	
15	<b>Entwurf robuster Regelungen</b> .....	565	17.2	Residuum und Residuensatz bei rationalen Funktionen .....	604	
15.1	Robustheit von Regelungen .....	565	17.3	Matrizenrechnung .....	605	
15.2	Robustheitsentwurf mittels Strafffunktionen	568	17.3.1	Lineare Abhängigkeit und Unabhängigkeit von Vektoren .....	605	
15.2.1	Beschreibung der Methode .....	568	17.3.2	Grundregeln der Matrizenrechnung .....	605	
15.2.2	Gradientenformeln mittels der Polempfindlichkeit .....	570	17.3.3	Inverse Matrix .....	608	
15.2.3	Beispiel: Verladebrücke .....	572	17.3.4	Rang einer Matrix .....	608	
15.3	Robustheitsentwurf mittels der Vollständigen Modalen Synthese .....	575	17.3.5	Determinanten .....	609	
15.3.1	Beschreibung des Verfahrens .....	575	17.3.6	Lineare Gleichungen .....	610	
15.3.2	Anwendungsbeispiel: Spurgeföhrter Omnibus .....	577	17.3.7	Eigenwerte und Eigenvektoren .....	612	
	Schrifttum zu Kapitel 15 .....	583	17.3.8	Symmetrische Matrizen .....	613	
16	<b>Vereinfachung großer Systemmodelle durch Ordnungsreduktion</b> .....	584	17.3.9	Spur einer Matrix .....	614	
16.1	Problemstellung .....	584	17.3.10	Die Moore-Penrosesche Pseudo-Inverse ..	615	
16.2	Modale Ordnungsreduktion nach L. Litz ..	585	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. Steinhäuser ..	621	
			17.4.3	Analytische Approximation der Maximumfunktion $\alpha(\mathbf{r})$ .....	622	
			Schrifttum zu Kapitel 17 .....			623
			<b>Sachwortverzeichnis</b> .....			625