

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	13	3.4	Typen linearer Übertragungsglieder	78
1.1	Einführung der Begriffe Steuerung und Regelung.	13	3.4.1	Eine einfache Eigenschaft linearer Übertragungsglieder.	78
1.2	Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Systems durch das Strukturbild	14	3.4.2	Rationale Übertragungsglieder (R-Glieder).	79
1.3	Einfache Übertragungsglieder	19	3.4.3	Totzeitsysteme (TZ-Systeme).	80
1.3.1	Begriff des Übertragungsgliedes	19	3.4.4	Abtastsysteme	81
1.3.2	Das Proportionalglied (P-Glied)	20	3.4.5	Lineare Differentialgleichungsglieder mit zeitabhängigen Parametern	82
1.3.3	Das Integrierglied (I-Glied)	20	3.5	Einteilung der linearen Übertragungsglieder in zeitinvariante und zeitvariante	82
1.3.4	Das Differenzierglied (D-Glied)	21	3.6	Das Rechnen mit δ -Funktionen	85
1.3.5	Das Totzeitglied (TZ-Glied, T_1 -Glied)	22	3.7	Duhamel-Integral und Gewichtsfunktion.	86
1.3.6	Die Summierungsstelle (S-Stelle).	23	3.8	Die Umformung von Strukturbildern.	88
1.3.7	Das Kennlinienglied (KL-Glied).	23	3.9	Rationale Übertragungsglieder (R-Glieder)	91
1.3.8	Das multiplikative Glied (M-Glied)	23	3.9.1	Berechnung der Sprungantwort	91
1.3.9	Elementare und zusammengesetzte Übertragungsglieder.	23	3.9.2	Die Differentialgleichung des R-Gliedes und Systeme mit Vorgeschichte	93
1.3.10	Das Verzögerungsglied 1. Ordnung (VZ ₁ -Glied, auch P-T ₁ -Glied)	24	*3.10	Totzeitsysteme (TZ-Systeme).	94
1.3.11	Das Vorhaltglied (VD-Glied; verzögert differenzierendes Glied, D-T ₁ -Glied).	25	*3.10.1	Berechnung der Sprungantwort.	94
1.3.12	Das allgemeine rationale Übertragungsglied 1. Ordnung (AR ₁ -Glied, PD-T ₁ -Glied)	26	*3.10.2	Differenzengleichungsglieder.	96
1.3.13	Das Verzögerungsglied 2. Ordnung (VZ ₂ -Glied, P-T ₂ -Glied).	27	3.11	Lineare und zeitinvariante Regelkreise.	98
1.3.14	Das Kennlinienglied mit mehreren Eingangsgrößen	31	3.11.1	Gleichung des Regelkreises	98
1.4	Einfache Beispiele zur Steuerung und Regelung.	33	3.11.2	Stationäres Verhalten des Regelkreises.	99
1.4.1	Drehzahlsteuerung eines konstant erregten Gleichstrommotors mit Last	34	3.11.3	Regelung eines Flüssigkeitsstandes	100
1.4.2	Drehzahlregelung eines konstant erregten Gleichstrommotors mit Last	36	3.11.4	Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors: Führungsverhalten	100
1.4.3	Regelung eines Flüssigkeitsstandes	37	3.11.5	Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors: Störverhalten	102
1.5	Kennzeichnung der Regelungstechnik	37	3.11.6	Eine typische Regelung der Verfahrenstechnik	102
2	Aufstellen der Systemgleichungen	40	3.11.7	Zahlenbeispiel	103
2.1	Gesamtsystem und Teilsysteme	40	4	Stabilität und Frequenzgang	106
2.2	Mathematische Beschreibung einiger Bauelemente	44	4.1	Definition der Stabilität	106
2.2.1	Bauelemente mechanischer Systeme	44	4.2	Das grundlegende Stabilitätskriterium.	107
2.2.2	Die Gleichstrommaschine.	47	4.3	Der Frequenzgang.	111
2.2.3	Der Synchrongenerator.	52	4.4	Das Nyquist-Kriterium.	113
2.2.4	Hydraulischer Stellantrieb	63	4.4.1	Der offene Regelkreis und seine Ortskurve	113
2.2.5	Pneumatische Leitung.	69	4.4.2	Herleitung des Nyquist-Kriteriums, wenn der offene Kreis keine Totzeit enthält	116
3	Eigenschaften linearer Übertragungsglieder	74	4.4.3	Spezielle Formen des Nyquist-Kriteriums	118
3.1	Das allgemeine Übertragungsglied	74	*4.4.4	Herleitung des Nyquist-Kriteriums bei Totzeit im offenen Kreis.	120
3.2	Lineare Übertragungsglieder	75	4.4.5	Beispiel zum Nyquist-Kriterium	120
3.3	Linearisierung nichtlinearer Systeme	76			

4.5	Andere lineare Stabilitätskriterien.	121	7.3	Reihenstabilisierung mit PI-, PID- und PD-Regler.	174
*4.5.1	Argumentänderung eines Polynoms und Kriterium von Cremer-Leonhard	121	7.4	Synthese mit dem Frequenzkennlinienverfahren.	180
4.5.2	Vorzeichen der Koeffizienten der charakteristischen Gleichung und Lage ihrer Wurzeln.	122	7.5	Einstellregeln für die Reglerparameter . . .	183
4.5.3	Das Kriterium von Hurwitz.	123	7.5.1	Parameteroptimierung mittels eines Güte-Index.	183
4.5.4	Das Kriterium von Routh.	124	7.5.2	Das Betragsoptimum.	187
5	Frequenzkennlinien	127	7.5.3	Das symmetrische Optimum	189
5.1	Zweck des Frequenzkennlinienverfahrens	127	7.5.4	Einstellregeln nach Ziegler-Nichols.	191
5.2	Definition der Frequenzkennlinien	127	7.6	Synthese mit dem Wurzelortsverfahren . .	193
5.3	Frequenzkennlinien einfacher Glieder . . .	129	7.7	Kompensationsregler	197
5.4	Frequenzkennlinien von Reihenschaltungen.	134	7.8	Synthese durch Veränderung der Regelungsstruktur	198
5.5	Frequenzkennlinien von geschlossenen Wirkungskreisen und Parallelschaltungen.	137	7.8.1	Unterlagerte Regelkreise (Kaskadenregelung).	199
5.5.1	Näherungsweise Konstruktion der Frequenzkennlinien.	137	7.8.2	Störgrößenaufschaltung	201
5.5.2	Das Nichols-Diagramm	139	7.9	Realisierung der Korrekturglieder.	201
5.6	Das Nyquist-Kriterium in Frequenzkennliniendarstellung.	141	7.9.1	Realisierung durch einen beschalteten Operationsverstärker.	201
5.6.1	Formulierung.	141	7.9.2	Realisierung des Korrekturgliedes durch Schaltungen mit mehreren Verstärkern nach Art von Analogrechenhaltungen. .	203
*5.6.2	Herleitung des Nyquist-Kriteriums in Frequenzkennliniendarstellung	143	7.9.3	Realisierung der Korrekturglieder im Prozeßrechner.	204
*5.7	Minimalphasenglieder und Allpässe.	146	8	Anwendungen der Entwurfsverfahren	208
6	Das Wurzelortsverfahren	149	8.1	Drehmomentregelung einer Pendelmaschine.	208
6.1	Charakterisierung des Verfahrens	149	8.1.1	Das mathematische Modell des Regelkreises.	208
6.2	Definition der Wurzelortskurve.	149	8.1.2	Die Frequenzkennlinien der Regelstrecke	212
6.3	Analytische Darstellung der Wurzelortskurve und Beispiel.	150	8.1.3	Entwurf des Reglers	215
6.4	Geometrische Eigenschaften der Wurzelortskurve	152	8.1.4	Realisierung des Reglers.	218
*6.5	Herleitung der geometrischen Eigenschaften der Wurzelortskurve	157	8.2	Polradwinkel-Regelung eines Turbogenerators.	220
6.6	Wurzelortskurve und Sprungantwort des geschlossenen Kreises	160	8.2.1	Mathematische Beschreibung der Anlage	220
6.7	Quantitative Forderungen an das dynamische Verhalten des Regelkreises	163	8.2.2	Linearisierung der Struktur der Regelstrecke.	221
6.8	Digitale Berechnung des Wurzelorts	164	8.2.3	Reglerentwurf mit dem Frequenzkennlinien-Verfahren.	224
6.8.1	Prinzip des Verfahrens	165	8.2.4	Reglerentwurf mit dem Wurzelortsverfahren	227
6.8.2	Beschreibung der einzelnen Rechenschritte	165	8.3	Verstellpropeller-Regelung für einen Schiffsantrieb.	230
7	Dynamische Korrektur (Stabilisierung, Synthese, Entwurf) von Regelkreisen	168	8.3.1	Aufbau des Regelungssystems.	230
7.1	Die Problemstellung	168	8.3.2	Mathematische Beschreibung der Regelstrecke.	230
7.2	Forderungen an die Regelung	169	8.3.3	Linearisierung	233
			8.3.4	Reglerentwürfe.	234
			8.3.5	Überprüfung des Entwurfs durch Simulation.	240
			8.4	Stabilisierte Plattform mit hydraulischem Antrieb	241

8.4.1	Das mathematische Modell	242	11.4	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit linearer zeitinvarianter Systeme	302
8.4.2	Linearisieren der Regelstrecke	244	11.4.1	Steuerbarkeit	302
8.4.3	Frequenzkennlinien der Regelstrecke	246	11.4.2	Beobachtbarkeit	304
8.4.4	Der Druckregelkreis	248	11.5	Transformation auf Normalform	306
8.4.5	Der Winkelregelkreis	250	11.5.1	Transformation auf Jordansche Normalform	306
8.5	Druckregelung einer Gasleitung	252	11.5.2	Transformation auf Regelungsnormalform	308
8.5.1	Beschreibung des Regelungssystems	252	11.5.3	Transformation auf Beobachtungsnormalform	312
8.5.2	Frequenzkennlinien und Übergangsfunktionen der linearisierten Regelstrecke	252	11.6	Digitale Berechnung der Transitionsmatrix	313
8.5.3	Entwurf des Druckregelkreises	254	11.6.1	Direkte Auswertung der Reihendarstellung	314
9	Mehrfachregelungen	257	11.6.2	Berechnung der Transitionsmatrix nach Plant	314
9.1	Gekoppelte Systeme	257	11.7	Digitale Berechnung von Frequenzkennlinien	316
9.2	Synthese von Mehrfachregelungen durch Entkopplung	261	12	Regelungssynthese im Zustandsraum	322
9.3	Stabilität von Mehrfachregelungen	267	12.1	Problematik	322
10	Beispiele für Mehrfachregelungen	269	12.2	Polvorgabe (Polfestlegung, pole assignment, pole shifting)	324
10.1	Statische Entkopplung bei einem Netzkopplungsumformer	269	12.2.1	Grundgedanke	324
10.1.1	Aufgaben des Umformers	269	12.2.2	Polvorgabe bei Regelungsnormalform der Strecke	326
10.1.2	Aufbau des Umformersatzes	269	12.2.3	Polvorgabe bei beliebiger Zustandsdarstellung der Strecke	327
10.1.3	Die Regelung des Umformers	269	12.2.4	Nullstellen der Strecke bei Polvorgabe	328
10.1.4	Verkopplungen zwischen Wirk- und Blindleistungs-Regelkreis	270	12.2.5	Polvorgabe bei mehreren Eingangsgrößen	328
10.1.5	Systemverhalten bei kleinen Bewegungen um einen Arbeitspunkt	271	12.3	Der Entwurf auf endliche Einstellzeit	329
10.1.6	Stationäre Entkopplung der AM	272	12.3.1	Formulierung der Entwurfsaufgabe	329
10.1.7	Dynamisches Verhalten der Regelkreise	273	12.3.2	Entwurf des Rückführreglers und des Vorfilters	330
10.2	Lageregelung eines Radioteleskops	274	12.3.3	Anwendung auf eine einfache Regelstrecke	333
10.2.1	Beschreibung der Anlage	274	12.4	Modale Regelung	335
10.2.2	Die Getriebeverspannung	276	12.4.1	Definition der modalen Regelung	335
10.2.3	Drehzahlregelung bei Mehrmaschinenantrieben	277	12.4.2	Durchführung der modalen Regelung	336
10.2.4	Überprüfung des Entwurfs durch Simulation	279	12.4.3	Beispiel	339
11	Systembeschreibung und -analyse mit Zustandsvariablen	281	12.5	Der Luenberger-Beobachter	340
11.1	Einführung der Zustandsvariablen	281	12.5.1	Die Idee des Luenberger-Beobachters	340
11.2	Aufstellen der Zustandsgleichungen	284	12.5.2	Bestimmung des Beobachters für Systeme mit <i>einer</i> Ausgangsgröße	342
11.2.1	Die Regelungsnormalform der Zustandsgleichungen	284	12.5.3	Beobachter reduzierter Ordnung	344
11.2.2	Die Beobachtungsnormalform der Zustandsgleichungen	286	12.5.4	Beobachter bei Mehrfachsystemen	348
11.2.3	Die Jordansche Normalform der Zustandsgleichungen	286	12.5.5	Reduktion des Beobachters bei Meßbarkeit einzelner Zustandsvariablen	348
11.2.4	Aufstellen der Zustandsgleichungen aus dem Strukturbild	289	12.5.6	Schätzung von Linearkombinationen der Zustandsvariablen	350
11.2.5	Allgemeine Form der Zustandsgleichungen eines linearen Systems	292	12.5.7	Der Beobachter und die Stabilität des Regelungssystems	351
11.3	Lösung der Zustandsgleichungen von linearen zeitinvarianten Systemen	293	12.5.8	Einfache näherungsweise Lösung des Beobachtungsproblems	353
11.3.1	Die Matrizenfunktion e^{Az}	293	12.6	Berücksichtigung von Störgrößen	354
11.3.2	Lösung der Zustandsgleichungen im Zeitbereich	295			
11.3.3	Anwendung der Laplace-Transformation auf die Zustandsgleichungen	299			

12.6.1	Verallgemeinerte Störgrößenaufschaltung bei meßbaren Störgrößen	354	14.1.4	Lösung von Differentialgleichungen	376
12.6.2	Modellerweiterung bei nicht meßbaren Störgrößen	355	14.1.5	Residuum und Residuensatz bei rationalen Funktionen	378
13	Synthese der Regelung einer Verladebrücke im Zustandsraum	357	14.1.6	Fourier-Integral und Parsevalsche Gleichung	379
13.1	Beschreibung der Regelstrecke	357	14.2	Elemente der Vektor- und Matrizenrechnung	379
13.1.1	Die Struktur der Regelstrecke	357	14.2.1	Vektoren	379
13.1.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit der Strecke	359	14.2.1.1	Vektoren als gerichtete Strecken in der Ebene und im Anschauungsraum	379
13.2	Reglerentwurf durch Polvorgabe	360	14.2.1.2	Koordinatendarstellung der Vektoren	380
13.2.1	Festlegen der Pole des geschlossenen Kreises	360	14.2.1.3	Der n -dimensionale Vektorraum	381
13.2.2	Berechnung der Reglerparameter	362	14.2.1.4	Lineare Abhängigkeit und Unabhängigkeit von Vektoren	382
13.3	Entwurf auf endliche Einstellzeit	364	14.2.1.5	Längen- und Winkelmessung im n -dimensionalen Vektorraum	384
13.3.1	Berechnung der Reglerparameter	364	14.2.2	Matrizen	384
13.3.2	Realisierung des schrittoptimalen Abtastreglers	365	14.2.2.1	Der Matrizenbegriff	384
13.4	Entwurf von Beobachtern	366	14.2.2.2	Multiplikation von Matrizen	385
13.4.1	Vollständiger Beobachter bei Messung der Katzposition	367	14.2.2.3	Inverse Matrix	387
13.4.2	Reduzierter Beobachter bei Messung der Katzposition	369	14.2.2.4	Rang einer Matrix	388
13.5	Verhalten der vollständigen Regelung	372	14.2.2.5	Basen und reziproke Basen im Vektorraum	389
13.5.1	Verhalten der durch Polvorgabe entworfenen Regelung	372	14.2.2.6	Matrix-Analysis	391
13.5.2	Verhalten des auf endliche Einstellzeit entworfenen Regelkreises	373	14.2.3	Determinanten	392
14	Mathematischer Anhang	374	14.2.3.1	Der Determinantenbegriff	392
14.1	Elemente der Laplace-Transformation	374	14.2.3.2	Eigenschaften der Determinanten	394
14.1.1	Das Laplace-Integral	374	14.2.3.3	Der Laplacesche Entwicklungssatz	394
14.1.2	Die Laplace-Transformation	374	14.2.4	Lineare Gleichungen	395
14.1.3	Rechenregeln der Laplace-Transformation	375	14.2.4.1	Das homogene Gleichungssystem	395
			14.2.4.2	Das inhomogene Gleichungssystem	396
			14.2.4.3	Das lineare Gleichungssystem mit eindeutiger Lösung	397
			14.2.4.4	Das unterbestimmte und das überbestimmte Gleichungssystem	398
			15	Schrifttum	400
			15.1	Schrifttum zu den Kapiteln	400
			15.2	Allgemeines Schrifttum	402