

Grundlagen der Regelungstechnik

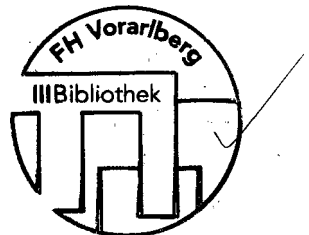
Von Dr.-Ing. Frank Dörrscheidt

Professor an der Universität - Gesamthochschule Paderborn

und Dr.-Ing. Wolfgang Latzel

Professor an der Universität - Gesamthochschule Paderborn

Mit 401 Bildern, 30 Tafeln und 134 Beispielen



B.G. Teubner Stuttgart 1989

Inhalt

1 Grundbegriffe der Regelungstechnik (Frank Dörrscheidt)

1.1	Einordnung und Aufgabenstellung der Regelungstechnik	1
1.2	Beispiele für Regelungen	4
1.2.1	Biologische Regelungen	5
1.2.2	Soziologische Regelungen	6
1.2.3	Ökonomische Regelungen	6
1.2.4	Technische Regelungen	7
	1.2.4.1 Regelung der Raumtemperatur. 1.2.4.2 Abstandsregelung im Straßenverkehr. 1.2.4.3 Der Mensch im Regelkreis	
1.2.5	Gemeinsamkeiten technischer und nichttechnischer Regelungen	12
1.3	Komponenten und Verhaltensweisen technischer Regelungen	13
1.3.1	Struktur und Komponenten des einschleifigen Regelkreises	13
	1.3.1.1 Prozeß. 1.3.1.2 Meßwertgeber. 1.3.1.3 Führungsgrößengeber. 1.3.1.4 Vergleichler. 1.3.1.5 Regelglied. 1.3.1.6 Steller. 1.3.1.7 Struktur des Regelkreises	
1.3.2	Dynamisches Verhalten des einschleifigen Regelkreises	17
	1.3.2.1 Führungsverhalten. 1.3.2.2 Störverhalten. 1.3.2.3 Stabilitätsverhalten. 1.3.2.4 Verhalten bei Parameteränderungen	
1.3.3	Forderungen an die Regelung	20
1.4	Entwurf technischer Regelungen	21
1.4.1	Abwicklung regelungstechnischer Projekte	21
1.4.2	Entwicklung regelungstechnischer Konzepte	23

2 Lineare kontinuierliche Prozesse (Frank Dörrscheidt)

2.1	Grundbegriffe	26
2.1.1	Übertragungsverhalten und Übertragungsglied	27

2.1.2	Darstellung von Übertragungsgliedern und ihrer Wirkungsbeziehungen	30
2.1.2.1	Elemente des Wirkungsplans. 2.1.2.2 Elementare Übertragungsglieder	
2.1.3	Grundlegende Eigenschaften von Übertragungsgliedern . . .	35
2.1.3.1	Linearität. 2.1.3.2 Zeitvarianz. 2.1.3.3 Klassifizierung	
2.1.4	Informationsaustausch zwischen Übertragungsgliedern . . .	43
2.1.4.1	Signal und Informationsparameter. 2.1.4.2 Signalklassifizierung	
2.1.5	Reaktion von Übertragungsgliedern auf Testsignale.	45
2.1.5.1	Testsignale der Regelungstechnik. 2.1.5.2 Systemreaktionen auf Testsignale	
2.2	Mathematische Beschreibung linearer Prozesse.	51
2.2.1	Eingangs-Ausgangs-Beschreibung im Zeitbereich	52
2.2.1.1	Aufstellen der Differentialgleichung. 2.2.1.2 Formelmäßige Lösung. 2.2.1.3 Numerische Lösung	
2.2.2	Eingangs-Ausgangs-Beschreibung im Bildbereich	64
2.2.2.1	Definition der Laplace-Transformation. 2.2.2.2 Eigenschaften der Laplace-Transformation. 2.2.2.3 Anwendung auf lineare Übertragungsglieder. 2.2.2.4 Rücktransformation in den Zeitbereich	
2.2.3	Eingangs-Ausgangs-Beschreibung im Frequenzbereich	84
2.2.3.1	Definition, Eigenschaften und Rechenregeln der Fourier-Transformation. 2.2.3.2 Anwendung der Fourier-Transformation auf lineare Übertragungsglieder. 2.2.3.3 Berechnung und Messung des Frequenzgangs. 2.2.3.4 Graphische Darstellung des Frequenzgangs	
2.2.4	Zustandsbeschreibung linearer Übertragungsglieder.	95
2.2.4.1	Systembeschreibung durch Zustandsvariable. 2.2.4.2 Lösung der Vektordifferentialgleichung. 2.2.4.3 Eigenschaften der Transitionsmatrix. 2.2.4.4 Berechnung der Transitionsmatrix. 2.2.4.5 Übertragungsfunktion und Zustandsdarstellung. 2.2.4.6 Digitale Simulation	
2.3	Lineare Übertragungsglieder der Regelungstechnik.	118
2.3.1	Elementare Übertragungsglieder.	118
2.3.1.1	Rationale Übertragungsglieder. 2.3.1.2 Nichtrationale Übertragungsglieder	
2.3.2	Zusammenschalten von Übertragungsgliedern	123
2.3.2.1	Parallelstruktur. 2.3.2.2 Kettenstruktur. 2.3.2.3 Kreisstruktur. 2.3.2.4 Umformen von Wirkungsplänen	

2.3.3	Nichtelementare rationale Übertragungsglieder	133
2.3.3.1	Rationale Übertragungsglieder erster Ordnung. 2.3.3.2	
	Rationale Übertragungsglieder zweiter Ordnung	
2.3.4	Approximation linearer Übertragungsglieder.	154
2.3.4.1	Approximation im Zeitbereich. 2.3.4.2 Approximation	
	im Bildbereich	
2.3.5	Stabilität linearer Übertragungsglieder.	165
2.3.5.1	Stabilitätsdefinitionen. 2.3.5.2 Stabilitätsprüfung mit-	
	tels der Übertragungsfunktion. 2.3.5.3 Algebraische Stabili-	
	tätskriterien	
2.3.6	Parameterempfindlichkeit linearer Übertragungsglieder	173

3 Lineare kontinuierliche Regelkreise (Frank Dörsscheidt)

3.1	Struktur und Eigenschaften des einschleifigen Regelkreises	179
3.1.1	Struktur und Übertragungsverhalten	179
3.1.2	Stabilität	183
3.1.2.1	Stabilitätskriterien. 3.1.2.2 Algebraische Stabilitätsprü-	
	fung. 3.1.2.3 Stabilitätsprüfung mittels der Ortskurve des Fre-	
	quenzgangs. 3.1.2.4 Stabilitätsprüfung im Bode-Diagramm	
3.1.3	Stationäre Genauigkeit	200
3.1.4	Transientes Verhalten	204
3.1.4.1	Kenngrößen der Übergangsfunktion. 3.1.4.2 Kenngrö-	
	ßen der Übergangsfunktion des Verzögerungsgliedes 2. Ord-	
	nung	
3.1.5	Parameterempfindlichkeit	211
3.2	Entwurf einschleifiger Regelkreise.	214
3.2.1	Grundlagen des Reglerentwurfs.	215
3.2.1.1	Allgemeine Aspekte des Reglerentwurfs. 3.2.1.2 Ent-	
	wurfsforderungen. 3.2.1.3 Entwurfsverfahren	
3.2.2	Reglerentwurf bei vorgegebenem Übertragungsverhalten des	
	Regelkreises.	219
3.2.2.1	Entwurfsspezifikationen. 3.2.2.2 Entwurf auf vorgege-	
	gebenes Führungsverhalten. 3.2.2.3 Entwurf auf vorgegebenes	
	Führungs- und Störverhalten	
3.2.3	Reglerentwurf mit der Übertragungsfunktion des offenen Re-	
	gelkreises.	236
3.2.3.1	Entwurfsspezifikationen. 3.2.3.2 Entwurf von Kompen-	
	sationsreglern	

3.2.4	Reglerentwurf durch Parameteroptimierung	253
3.2.4.1	Optimierungskriterien. 3.2.4.2 Minimierung der quadratischen Regelfläche. 3.2.4.3 Numerische Berechnung der optimalen Reglerparameter	
3.2.5	Realisierung linearer Regler mit Operationsverstärkern	263
3.2.5.1	Eigenschaften des Operationsverstärkers. 3.2.5.2 Beschaltung des Operationsverstärkers. 3.2.5.3 Realisierung bilinearer Reglerschaltungen. 3.2.5.4 Kanonische Realisierung rationaler Übertragungsfunktionen	
3.3	Entwurf einschleifiger Regelkreise mit erweiterter Struktur	275
3.3.1	Regelung mit Störgrößenaufschaltung	275
3.3.2	Regelung mit Hilfsstellgröße	282
3.4	Entwurf mehrschleifiger Regelkreise	287
3.4.1	Regelung mit Hilfsregelgröße (Kaskadenregelung)	288
3.4.1.1	Struktur und Übertragungsverhalten der Kaskadenregelung. 3.4.1.2 Auslegung der Kaskadenregelung	
3.4.2	Zustandsregelung	296
3.4.2.1	Struktur der Zustandsregelung. 3.4.2.2 Berechnung des Zustandsreglers nach dem Verfahren der Polvorgabe. 3.4.2.3 Schätzung des Systemzustands	

4 Abtastregelungen (Wolfgang Latzel)

4.1	Mathematische Beschreibung von Abtastvorgängen.	306
4.1.1	Abtastvorgänge in technischen Systemen	306
4.1.2	Mathematische Beschreibung von Abtaster und Halteglied ;	310
4.2	Die z-Transformation zur Beschreibung von Abtastsystemen	314
4.2.1	Definition der z-Transformation.	314
4.2.2	Beispiele für die Ermittlung von z-Transformierten	315
4.2.3	Rechenregeln der z-Transformation.	318
4.2.3.1	Regeln zur Differenzbildung. 4.2.3.2 Summationsregel. 4.2.3.3 Faltungsregel	
4.2.4	z-Übertragungsfunktionen zusammengesetzter Abtastsysteme	327
4.2.5	Anwendung der z-Transformation auf Abtastregelungen . . .	331
4.2.6	Stabilitätsprüfung von Abtastsystemen im z-Bereich	338
4.2.6.1	Pol-Nullstellen-Verteilung von z-Transformierten.	
4.2.6.2	Stabilitätsdefinitionen. 4.2.6.3 Algebraische Stabilitätskriterien. 4.2.6.4 Grafische Stabilitätsprüfung mit dem Wurzelortskurvenverfahren. 4.2.6.5 Übergangsverhalten von Abtastregelkreisen	

4.3 Entwurf von Abtastregelungen im Frequenzbereich	351
4.3.1 Frequenzkennliniendarstellung von Abtastsystemen	352
4.3.1.1 Einführung der w -Ebene. 4.3.1.2 w -Übertragungsfunktion und Abtast-Frequenzgang. 4.3.1.3 Veranschaulichung des Abtast-Frequenzganges	
4.3.2 w -Übertragungsfunktionen von Abtastsystemen mit Halteglied	360
4.3.2.1 w -Übertragungsfunktionen von P-T ₂ -Gliedern. 4.3.2.2 w -Übertragungsfunktionen proportionaler Abtastsysteme. 4.3.2.3 w -Übertragungsfunktionen integrierender Abtastsysteme. 4.3.2.4 w -Übertragungsfunktionen von Totzeitgliedern	
4.3.3 w -Übertragungsfunktionen von Abtastreglern	371
4.3.3.1 Regelalgorithmen 1. Ordnung. 4.3.3.2 Übergangsfunktion und Abtast-Frequenzgang beim PD-Regelalgorithmus. 4.3.3.3 Veranschaulichung des Abtast-Frequenzganges beim PD-Regelalgorithmus. 4.3.3.4 PI-Regelalgorithmus. 4.3.3.5 Regelalgorithmen 2. Ordnung	
4.3.4 Anpassungsbedingungen für Abtastregelungen	383
4.3.4.1 Stabilitätsprüfung mit dem Nyquist-Kriterium. 4.3.4.2 Anpassungsbedingungen aus Referenzsystem. 4.3.4.3 Anwendung der Methode der Anpassungsbedingungen. 4.3.4.4 Vergleichende Ergebnisse mit der Methode der Anpassungsbedingungen	
4.4 Digitale Regelungen	404
4.4.1 Struktur und Aufbau digitaler Regelungen	404
4.4.1.1 Aufbau und Wirkungsweise von Prozeßrechnern. 4.4.1.2 Analog-Digital-Umsetzer als Eingabegeräte für den Prozeßrechner. 4.4.1.3 Digital-Analog-Umsetzer als Ausgabegeräte für den Prozeßrechner	
4.4.2 Quasikontinuierliche Regelalgorithmen nach der Rechteckregel	412
4.4.2.1 Stellungs- und Geschwindigkeits-Algorithmus mit der Rechteck-Regel. 4.4.2.2 Ergebnisse mit der Rechteck-Regel	
4.4.3 Quasikontinuierliche Regelalgorithmen mit der Trapezregel und Berücksichtigung des Abtast-Haltegliedes	418
4.4.3.1 Frequenzgang von Abtaster und Halteglied. 4.4.3.2 Regelalgorithmen 1. Ordnung. 4.4.3.3 Regelalgorithmen 2. Ordnung. 4.4.3.4 PI- und PID-Regelalgorithmen in Summenform. 4.4.3.5 Dimensionierung quasikontinuierlicher Abtastregler. 4.4.3.6 Wahl der Abtastzeit. 4.4.3.7 Zusammenfassung und Vergleich	

Anhang

Literaturverzeichnis.447
DIN-Normblätter (Auswahl).450
Formelzeichenliste (Größen, Koeffizienten und Kennwerte).451
Schreibweise der zeit- bzw. frequenzabhängigen Größen.452
Schreibweise der Übertragungsfunktionen und Frequenzgänge.452
Indizes.453
Glossar.453
Sachverzeichnis.460