

# 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 Vergleicher. 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 Dörrscheidt)

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-	
	benes 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	
 <b>4 Abtastregelungen (Wolfgang Latzel)</b>		
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 Wurzelortkurvenverfahren. 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 <sub>2</sub> -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
 <b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	 460