

Gerd Schulz

Regelungs- technik

Grundlagen, Analyse und Entwurf von
Regelkreisen, rechnergestützte Methoden

Mit 288 Abbildungen



Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Regelung und Steuerung	1
1.1	Einfache Regelungen	1
1.2	Steuerungen	5
1.3	Signalfußplan (Blockschaltbild)	5
1.4	Leitfaden durch das Buch	10
2	Mathematische Behandlung von Regelkreisgliedern	11
2.1	Die Beschreibung durch Differentialgleichungen	11
2.1.1	Die Differentialgleichung	11
2.1.2	Spezielle Eingangssignale in der Regelungstechnik	17
2.1.3	Die Übergangsfunktion (Sprungantwort)	18
2.2	Darstellung von Regelkreisgliedern durch Übertragungsfunktion und Frequenzgang	20
2.2.1	Die Übertragungsfunktion	20
2.2.2	Der Frequenzgang	22
2.2.3	Graphische Darstellungen des Frequenzgangs	24
2.3	Das Rechnen mit Regelkreisgliedern im Blockschaltbild	28
2.3.1	Darstellung von Regelkreisgliedern durch Blocksymbole	28
2.3.2	Reihen-, Parallel- und Kreisschaltung von Regelkreisgliedern	30
2.3.3	Verlegen von Summations- und Verzweigungsstellen	31
2.3.4	Anwendung der Regeln für das Rechnen mit Blockschaltbildern	31

3 Regelstrecken	35
3.1 Proportionale Regelstrecken	37
3.1.1 Proportionale Strecken ohne Verzögerung (P-Glied)	37
3.1.2 Proportionale Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung (PT ₁ -Glied)	38
3.1.3 Reihenschaltung von mehreren Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung	41
3.1.4 Schwingungsfähige Proportionalstrecken (PT ₂ -Glied)	46
3.2 Integrierende Regelstrecken	52
3.2.1 Integrierende Strecken ohne Verzögerung (I-Glied)	52
3.2.2 Integrierende Strecken mit Verzögerungen (IT _n -Glied)	54
3.3 Spezielle Formen von Regelstrecken	56
3.3.1 Strecken mit Totzeit (T _t -Glied)	56
3.3.2 Strecken mit differenzierendem Verhalten (DT _n -Glied)	58
3.3.3 Strecken mit Allpaßverhalten	60
3.4 Regelstrecken höherer Ordnung und instabile Regelstrecken	62
3.4.1 Regelstrecken höherer Ordnung	62
3.4.2 Instabile Regelstrecken	65
3.5 Modellbildung realer Regelstrecken	67
3.5.1 Analytische Berechnung der Parameter	67
3.5.2 Parameterbestimmung aus der Sprungantwort	68
3.5.3 Parameterbestimmung aus der Ortskurve	69
3.5.4 Parameteridentifizierung	70
4 Regler und ihre Strukturen	72
4.1 Realisierung elektrischer Regler	72
4.1.1 Analoger Regler	72
4.1.2 Digitaler Regler	76
4.2 Regler im geschlossenen Regelkreis	82
4.2.1 Führungsverhalten	83
4.2.2 Störverhalten	83
4.3 Regler für proportionale Strecken	84

4.3.1	Verzögerungsstrecke 1. Ordnung (PT_1 -Strecke)	84
4.3.2	Verzögerungsstrecke 2. Ordnung (PT_2 -Strecke)	94
4.4	Regler für integrierende Regelstrecken	105
4.4.1	P-Regler	106
4.4.2	I-Regler	107
4.4.3	PI-Regler	108
5	Stabilität von Regelkreisen	111
5.1	Definition der Stabilität	111
5.2	Das Hurwitz-Kriterium	116
5.3	Das Nyquist-Kriterium	120
5.3.1	Amplitudenrand und Phasenrand	126
5.3.2	Das verallgemeinerte Nyquist-Stabilitätskriterium	128
6	Synthese von Regelkreisen	133
6.1	Grundlegende Anforderungen an den Regelkreis	133
6.1.1	Forderung 1 : Stabilität	134
6.1.2	Forderung 2 : „Gutes“ Führungsverhalten	134
6.1.3	Forderung 3 : „Gutes“ Störverhalten	138
6.1.4	Forderung 4 : Reduzierung des Einflusses von Parameteränderungen	140
6.2	Grundsätzliche Reglerstruktur und Entwurfsempfehlungen	141
6.3	Analytische Bestimmung der Regelparameter	147
6.3.1	Dynamische Kompensation	147
6.3.2	Reglereinstellung durch Parameteroptimierung	149
6.3.3	Das Betragsoptimum	151
6.3.4	Der Kompensationsregler	154
6.4	Empirische Einstellregeln	157
6.4.1	Einstellregeln nach Ziegler und Nichols	157
6.4.2	Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick	158
6.5	Änderungen der Regelkreisstruktur	159
6.5.1	Kaskadenregelung	159
6.5.2	Störgrößenaufschaltung	162
6.5.3	Weitere Strukturänderungen	165

7	Synthese von Regelkreisen mit dem Bode-Diagramm	169
7.1	Regelkreisanalyse im Frequenzbereich	169
7.2	Bode-Diagramme einfacher Regelkreisglieder	173
7.2.1	Bode-Diagramme von Verzögerungsgliedern	173
7.2.2	Bode-Diagramme von integrierenden Regelkreisgliedern	177
7.2.3	Bode-Diagramme anderer Strecken	178
7.2.4	Bode-Diagramme einfacher Regler	180
7.3	Entwurfspanforderungen im Frequenzbereich	185
7.3.1	Stabilitätsanforderungen	185
7.3.2	Anforderungen an das Führungsverhalten	187
7.3.3	Anforderungen an das Störverhalten	189
7.4	Reglersynthese mit dem Bode-Diagramm	191
7.4.1	Reglersynthese für Verzögerungsstrecken	191
7.4.2	Reglersynthese für integrierende Regelstrecken	196
7.4.3	Phasenkorrigierende Netzwerke	201
8	Synthese von Regelkreisen mit dem Wurzelortskurvenverfahren	204
8.1	Definition der Wurzelortskurve	204
8.2	Entwurfsspezifikationen in der s -Ebene	210
8.2.1	Stabilitätsanforderungen	210
8.2.2	Anforderungen an das Führungsverhalten	210
8.2.3	Anforderungen an das Störverhalten	215
8.3	Reglerentwurf mit der Wurzelortskurve	216
8.3.1	Einfluß zusätzlicher Pole und Nullstellen des Reglers	216
8.3.2	Regelung einer Verzögerungsstrecke 3. Ordnung	220
8.3.3	Regelung einer instabilen Regelstrecke	222
9	Regelkreise mit nichtlinearen Übertragungsgliedern	225
9.1	Nichtlineare Übertragungsglieder	225
9.2	Die harmonische Balance als Analysemethode	228
9.3	Ermittlung einzelner Beschreibungsfunktionen	233
9.3.1	Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Vorlast	233

9.3.2	Beschreibungsfunktion eines idealen Zweipunktreglers . . .	235
9.3.3	Beschreibungsfunktion für einen Zweipunktregler mit Hysterese	236
9.3.4	Beschreibungsfunktion für einen Dreipunktregler	238
9.3.5	Beschreibungsfunktion für eine Magnetisierungskennlinie .	239
9.4	Stabilitätsuntersuchung mit dem Zweiortskurvenverfahren	241
9.5	Nichtlineare Regler	247
10	Entwurf nichtlinearer Regler	250
10.1	Realisierung nichtlinearer Regler	250
10.2	Regelung von Verzögerungsstrecken	254
10.2.1	Idealer Zweipunktregler	254
10.2.2	Zweipunktregler mit Hysterese	259
10.2.3	Zweipunktregler mit Hysterese für eine PT_1 -Strecke ohne Totzeit	261
10.2.4	Zweipunktregler mit Hysterese und Rückführung	263
10.2.5	Dreipunktregler mit Hysterese	268
10.3	Regelung von integrierenden Regelstrecken	270
10.3.1	Zweipunktregler mit Hysterese	270
10.3.2	Dreipunktschalter mit Hysterese	272
11	Anwendungsbeispiele	274
11.1	Drehzahlregelung einer Gleichstrommaschine mit einer Kaskadenregelung	274
11.1.1	Struktur der Regelstrecke Gleichstromantrieb	274
11.1.2	Auslegung des Stromregelkreises	276
11.1.3	Auslegung des Drehzahlregelkreises	279
11.2	Stabilisierung eines instabilen Pendels	282
11.2.1	Dynamikgleichungen von Stellmotor und Getriebe	283
11.2.2	Analyse des Regelkreises	285
11.2.3	Auslegung des Regelkreises	287

12 Simulation und Analyse mit dem Digitalrechner	290
12.1 Simulation linearer Systeme	291
12.1.1 Darstellung linearer Systeme im Zustandsraum	291
12.1.2 Simulation des zeitdiskreten Systems	296
12.2 Simulation nichtlinearer Systeme	303
12.2.1 Formulierung der Vektordifferentialgleichung 1. Ordnung eines nichtlinearen Übertragungssystems	303
12.2.2 Integration von Differentialgleichungen	305
12.3 Nullstellenberechnung von Polynomen	310
12.3.1 Laguerre's Methode	310
A Die Laplace-Transformation	312
A.1 Definition der Laplace-Transformation	312
A.2 Rechenregeln der Laplace-Transformation	314
A.3 Die inverse Laplace-Transformation	318
A.4 Anwendungen der Laplace-Transformation	318
A.4.1 Lösung von Differentialgleichungen	318
A.4.2 Die Übertragungsfunktion	320
B Tabelle häufig vorkommender Regelkreisglieder	325
Literaturverzeichnis	330
Sachverzeichnis	333