

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zum Geleit</b>	<b>XI</b>
<b>Vorwort zur achten Auflage</b>	<b>XII</b>
<b>Vorwort zur fünfzehnten Auflage</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung in die Regelungstechnik</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabe der Regelungstechnik . . . . .	1
1.2 Begriffe und Benennungen . . . . .	2
1.2.1 Steuerung . . . . .	2
1.2.2 Regelung . . . . .	4
1.2.3 Signalfussplan . . . . .	7
1.3 Bauglieder in Regelkreisen und Steuerketten . . . . .	10
1.3.1 Fühler . . . . .	10
1.3.1.1 Fühler für Druck . . . . .	10
1.3.1.2 Fühler für Durchfluss . . . . .	12
1.3.1.3 Fühler für Füllstand . . . . .	15
1.3.1.4 Fühler für Temperatur . . . . .	16
1.3.1.5 Fühler für Kraft . . . . .	18
1.3.1.6 Fühler für Drehzahl . . . . .	19
1.3.2 Messumformer . . . . .	20
1.3.3 Sollwerteinsteller . . . . .	23
1.3.4 Summierglied, Vergleicher . . . . .	24
1.3.5 Zeitglieder . . . . .	24
1.3.6 Regler . . . . .	26
1.3.7 Stellgerät . . . . .	29
1.4 Steuer- und Regelaufgaben . . . . .	34
1.4.1 Steuerung . . . . .	34

1.4.2	Festwertregelung . . . . .	38
1.4.3	Folgeregelung . . . . .	40
1.4.3.1	Nachlaufregelung . . . . .	40
1.4.3.2	Verhältnisregelung . . . . .	41
1.5	Steuer- und Regelschaltungen . . . . .	42
1.5.1	Festwertregelschaltungen . . . . .	42
1.5.1.1	Einfachregelkreis . . . . .	42
1.5.1.2	Einfachregelkreis mit Aufschaltungen . . . . .	44
1.5.1.3	Kaskadenregelkreis . . . . .	46
1.5.2	Folgeregelschaltungen . . . . .	49
<b>2</b>	<b>Beschreibung des Übertragungsverhaltens</b>	<b>53</b>
2.1	Beschreibung mit Hilfe von Differenzialgleichungen . . . . .	53
2.1.1	Arten von Differenzialgleichungen zur Beschreibung von Regelkreisgliedern . . . . .	53
2.1.2	Eigenschaften linearer zeitinvarianter Übertragungsglieder . . . . .	57
2.1.2.1	Homogenität . . . . .	57
2.1.2.2	Superposition . . . . .	57
2.1.2.3	Zeitinvarianz . . . . .	58
2.1.3	Linearisierung . . . . .	58
2.1.3.1	Statischer Zusammenhang gemäß einer stetigen Kennlinie . . . . .	59
2.1.3.2	Dynamischer Zusammenhang gemäß einer nichtlinearen Differenzialgleichung . . . . .	60
2.1.4	Lösung von gewöhnlichen linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten . . . . .	61
2.1.4.1	Lösung mit Hilfe von Lösungsansätzen . . . . .	61
2.1.4.2	Lösung mit Hilfe der Laplace-Transformation . . . . .	67
2.2	Beschreibung mit Hilfe der Übertragungsfunktion . . . . .	73
2.3	Beschreibung mit Hilfe von Antwortfunktionen . . . . .	74
2.3.1	Impulsfunktion, Impulsantwort . . . . .	75
2.3.2	Sprungfunktion, Sprungantwort . . . . .	76
2.3.3	Anstiegsfunktion, Anstiegsantwort . . . . .	77
2.3.4	Cosinusfunktion, Schwingungsantwort . . . . .	77

<b>3 Lineare Übertragungsglieder</b>	<b>81</b>
3.1 Analogien . . . . .	81
3.1.1 Verallgemeinerte Größen . . . . .	82
3.1.2 Analoge Bauglieder . . . . .	83
3.1.2.1 Energiequellen . . . . .	83
3.1.2.2 Energieverbraucher . . . . .	84
3.1.2.3 Energiespeicher . . . . .	88
3.1.3 Entwurf eines mathematischen Modells . . . . .	89
3.2 Elementare Übertragungsglieder . . . . .	93
3.2.1 Regelstrecken . . . . .	98
3.2.1.1 Regelstrecken mit proportionalem Verhalten . . . . .	98
3.2.1.2 Regelstrecken mit integrierendem Verhalten . . . . .	106
3.2.2 Regler . . . . .	106
3.2.2.1 Proportional wirkender Regler . . . . .	106
3.2.2.2 Integrierend wirkender Regler . . . . .	110
3.2.2.3 Differenzierend wirkender Regler . . . . .	112
3.2.2.4 Proportional und integrierend wirkender Regler . . . . .	114
3.2.2.5 Proportional und differenzierend wirkender Regler . . . . .	118
3.2.2.6 Proportional, integrierend und differenzierend wirkender Regler . . . . .	121
<b>4 Simulation des Zeitverhaltens</b>	<b>127</b>
4.1 Simulatoren . . . . .	127
4.1.1 Analogrechner . . . . .	127
4.1.2 Digitalrechner . . . . .	128
4.2 Simulation am Digitalrechner . . . . .	131
4.2.1 Integrationsverfahren . . . . .	131
4.2.2 Simulationssoftware . . . . .	133
4.2.3 Simulation mit MATLAB/Simulink . . . . .	134
4.2.3.1 Einführung . . . . .	134
4.2.3.2 Simulationsumgebung . . . . .	136
4.2.3.3 Simulationsbeispiel . . . . .	141
4.2.4 Simulationsablauf . . . . .	145

<b>5 Grafische Darstellung der Übertragungsfunktion</b>	<b>147</b>
5.1 Pol-Nullstellen-Verteilung . . . . .	147
5.2 Frequenzgang . . . . .	154
5.2.1 Ortskurve . . . . .	157
5.2.1.1 Ortskurven elementarer Übertragungsglieder . . . . .	157
5.2.1.2 Ortskurven von Übertragungssystemen . . . . .	160
5.2.2 Frequenzkennlinien . . . . .	162
5.2.2.1 Frequenzkennlinien elementarer Übertragungsglieder	162
5.2.2.2 Konstruktionshilfsmittel für Frequenzkennlinien .	170
5.2.2.3 Frequenzkennlinien von Übertragungssystemen .	172
<b>6 Entwurf von Regelkreisen</b>	<b>177</b>
6.1 Stabilität, Regelgüte und Empfindlichkeit . . . . .	177
6.1.1 Übertragungsfunktionen des Regelkreises . . . . .	177
6.1.2 Stabilität . . . . .	180
6.1.3 Regelgüte . . . . .	182
6.1.3.1 Regelgüte im Beharrungszustand . . . . .	184
6.1.3.2 Regelgüte während des Einschwingvorganges .	188
6.1.4 Stabilitätskriterien . . . . .	190
6.1.4.1 Hurwitz-Kriterium . . . . .	190
6.1.4.2 Nyquist-Kriterium . . . . .	193
6.1.5 Empfindlichkeit . . . . .	199
6.2 Entwurf von Regelkreisen im Zeitbereich . . . . .	201
6.2.1 Auswahl geeigneter Regler . . . . .	202
6.2.2 Vergleich der Wirkung verschiedener Regler . . . . .	204
6.2.2.1 Regelkreis mit P-T <sub>3</sub> -Regelstrecke . . . . .	204
6.2.2.2 Regelkreis mit I-T <sub>2</sub> -Regelstrecke . . . . .	217
6.2.3 Günstige Einstellung der Reglerkennwerte . . . . .	220
6.2.3.1 Einstellregeln nach Ziegler und Nichols . . . . .	220
6.2.3.2 Einstellregeln nach Chien, Hrones und Reswick .	224
6.2.3.3 Einstellregeln nach Kessler . . . . .	227
6.2.3.4 Einstellregeln nach Naslin . . . . .	231
6.3 Entwurf von Regelkreisen im Frequenzbereich . . . . .	234
6.3.1 Wurzelortsverfahren . . . . .	235

6.3.1.1	Definition der Wurzelortskurve . . . . .	235
6.3.1.2	Phasenbeziehung und Betragsbeziehung . . . . .	236
6.3.1.3	Konstruktionsregeln für Wurzelortskurven . . . . .	238
6.3.1.4	Reglerentwurf . . . . .	245
6.3.2	Frequenzkennlinienverfahren . . . . .	250
6.3.2.1	Spezifikationen . . . . .	250
6.3.2.2	Reglerentwurf . . . . .	258
6.4	Auslegung von Regelschaltungen . . . . .	267
6.4.1	Einfachregelkreis mit Störgrößenaufschaltung . . . . .	267
6.4.1.1	Aufschaltung auf den Reglerausgang . . . . .	267
6.4.1.2	Aufschaltung auf den Reglereingang . . . . .	269
6.4.2	Einfachregelkreis mit Hilfsgrößenaufschaltung . . . . .	270
6.4.3	Kaskadenregelkreis . . . . .	271
<b>7</b>	<b>Abtastsysteme</b>	<b>275</b>
7.1	Beschreibung von Abtastvorgängen . . . . .	275
7.2	Einführung in die z-Transformation . . . . .	283
7.2.1	Definition . . . . .	283
7.2.2	Korrespondenzen . . . . .	284
7.2.3	Rechenregeln . . . . .	287
7.2.4	z-Übertragungsfunktion . . . . .	293
7.3	Digitale Regelungen . . . . .	296
7.3.1	Aufbau des Regelkreises . . . . .	296
7.3.2	Stabilität . . . . .	299
7.3.3	Quasikontinuierlicher Abtastregler . . . . .	301
7.3.4	Kompensationsregler . . . . .	305
7.3.5	Regler für endliche Einstellzeit . . . . .	306
7.4	Realisierung digitaler Regelungen . . . . .	310
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>315</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>319</b>