

Inhaltsverzeichnis

I	Lineare Regelung	1
1	Einführung in die Regelung und Steuerung	3
1.1	Regelungen	3
1.2	Steuerungen	7
1.3	Signalflussplan (Blockschaltbild)	8
2	Mathematische Behandlung von Regelkreisgliedern	15
2.1	Die Beschreibung durch Differentialgleichungen.....	15
2.1.1	Die lineare Differentialgleichung	15
2.1.2	Aufstellen der Differentialgleichung	16
2.1.3	Lösung der Differentialgleichung durch einen geeigneten Ansatz...	20
2.1.4	Spezielle Eingangssignale in der Regelungstechnik	23
2.1.5	Die Übergangsfunktion (Sprungantwort)	25
2.2	Darstellung von Regelkreisgliedern durch Übertragungsfunktion und Frequenzgang	27
2.2.1	Die Übertragungsfunktion	27
2.2.2	Der Frequenzgang	29
2.2.3	Grafische Darstellungen des Frequenzgangs.....	32
2.3	Das Rechnen mit Regelkreisgliedern im Blockschaltbild.....	37
2.3.1	Aufstellen von Blockschaltbildern	37
2.3.2	Reihen-, Parallel- und Kreisschaltung von Regelkreisgliedern.....	39
2.3.3	Verlegen von Summations- und Verzweigungsstellen	41
2.3.4	Anwendung der Regeln für das Rechnen mit Blockschaltbildern...	42
3	Regelstrecken	45
3.1	Proportionale Regelstrecken.....	47
3.1.1	Proportionale Strecken ohne Verzögerung (P-Glied)	47
3.1.2	Proportionale Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung (PT ₁ -Glied)	48
3.1.3	Reihenschaltung von Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung	51
3.1.4	Schwingungsfähige PT ₂ -Strecken	57
3.2	Integrierende Regelstrecken	65
3.2.1	Integrierende Strecken ohne Verzögerung (I-Glied).....	65

3.2.2	Integrierende Strecken mit Verzögerungen (IT_n -Glied)	67
3.3	Spezielle Formen von Regelstrecken	69
3.3.1	Strecken mit Totzeit (T_t -Glied)	69
3.3.2	Strecken mit differenzierendem Verhalten (DT_n -Glied)	72
3.3.3	Strecken mit Allpassverhalten	74
3.4	Regelstrecken höherer Ordnung und instabile Regelstrecken	76
3.4.1	Regelstrecken höherer Ordnung	76
3.4.2	Instabile Regelstrecken	79
3.5	Linearisierung einer nichtlinearen Regelstrecke	82
3.6	Modellbildung realer Regelstrecken	85
3.6.1	Analytische Berechnung der Parameter	85
3.6.2	Parameterbestimmung aus der Sprungantwort	85
3.6.3	Parameterbestimmung aus der Ortskurve	86
3.6.4	Parameteridentifizierung	87
4	Das Verhalten linearer Regelkreise	89
4.1	Grundstruktur des einschleifigen Regelkreises	89
4.2	Grundlegende Anforderungen an den Regelkreis	90
4.2.1	Stabilität	91
4.2.2	Führungsverhalten	91
4.2.3	Störverhalten	93
4.2.4	Robustheit	95
4.3	Regelung einer PT_1 -Strecke	95
4.3.1	P-Regler	96
4.3.2	I-Regler	102
4.3.3	PI-Regler	105
4.4	Regelung einer PT_2 -Strecke	108
4.4.1	PI-Regler	109
4.4.2	PDT_D -Regler	113
4.4.3	$PIDT_D$ -Regler	117
4.5	Regelung einer IT_1 -Strecke	121
4.5.1	P-Regler	122
4.5.2	I-Regler	124
4.5.3	PI-Regler	126
4.6	Realisierung elektrischer Regler	128
4.6.1	Analoger Regler	129
4.6.2	Digitaler Regler	132
5	Stabilität von Regelkreisen	137
5.1	Stabilitätsdefinitionen	138
5.1.1	Interne Stabilität	138

5.1.2	Externe Stabilität	141
5.2	Das Hurwitz-Kriterium	145
5.3	Das Nyquist-Kriterium	149
5.3.1	Das vereinfachte Nyquist-Kriterium	151
5.3.2	Amplitudenrand und Phasenrand	156
5.3.3	Das verallgemeinerte Nyquist-Stabilitätskriterium	159
6	Reglersynthese mit klassischen Methoden	165
6.1	Grundlegende Entwurfsverfahren	165
6.1.1	Pol-/Nullstellenkompensation	165
6.1.2	Der Kompensationsregler	170
6.1.3	Reglereinstellung durch Parameteroptimierung	173
6.1.4	Das Betragsoptimum	176
6.2	Empirische Einstellregeln	179
6.2.1	Reglereinstellung nach Ziegler und Nichols	179
6.2.2	Reglereinstellung nach Chien, Hrones und Reswick	181
6.2.3	Reglereinstellung nach Latzel	182
7	Reglersynthese mit dem Bode-Diagramm	187
7.1	Grundlagen von Bode-Diagrammen	187
7.1.1	Approximation von Amplituden- und Phasengang	188
7.1.2	Reihenschaltung von Regelkreisgliedern im Bode-Diagramm	189
7.2	Bode-Diagramme einfacher Regelkreisglieder	192
7.2.1	Bode-Diagramme von Verzögerungsgliedern	192
7.2.2	Bode-Diagramme von integrierenden Regelkreisgliedern	197
7.2.3	Bode-Diagramme anderer Strecken	199
7.2.4	Bode-Diagramme einfacher Regler	200
7.3	Entwurfsanforderungen im Bode-Diagramm	206
7.3.1	Stabilität, Amplituden- und Phasenrand	206
7.3.2	Führungsverhalten	208
7.3.3	Störverhalten	212
7.4	Reglerentwurf mit dem Bode-Diagramm	213
7.4.1	Nicht schwingungsfähige Proportionalstrecken	213
7.4.2	Schwingungsfähige Proportionalstrecken	216
7.4.3	Integrierende Regelstrecken (Das symmetrische Optimum)	218
7.4.4	Phasenkorrigierende Netzwerke	223
8	Reglersynthese mit der Wurzelortskurve	227
8.1	Definition der Wurzelortskurve (WOK)	227
8.2	Regeln zum Zeichnen der Wurzelortskurve	229
8.3	Entwurfsanforderungen in der s-Ebene	237

8.3.1	Stabilität	237
8.3.2	Führungsverhalten	238
8.3.3	Störverhalten	243
8.4	Reglerentwurf mit der Wurzelortskurve	244
8.4.1	Einfluss der Pole und Nullstellen des Reglers	244
8.4.2	Regelung einer PT ₃ -Strecke	251
8.4.3	Regelung einer instabilen Regelstrecke	253
9	Varianten der Regelungsstruktur	257
9.1	Strukturen zur Verbesserung des Führungsverhaltens	257
9.1.1	Verwendung eines Vorfilters	257
9.1.2	Verwendung einer Vorsteuerung	260
9.1.3	Struktur mit zwei Freiheitsgraden	263
9.1.4	Struktur mit Referenzregelkreis	265
9.1.5	Struktur mit Bahnplanung	267
9.2	Vermeidung des Reglerüberlaufs	271
9.3	Smith-Regler und Prädiktor zur Regelung von Totzeitstrecken	273
9.4	Verwendung zusätzlicher Rückführsignale	276
9.4.1	Kaskadenregelung	276
9.4.2	Störgrößenaufschaltung	279
9.4.3	Hilfsregelgrößenaufschaltung	280
9.4.4	Hilfsstellgrößenaufschaltung	283
9.4.5	Verhältnisregelung	285
10	Zweigrößenregelung	289
10.1	Zweigrößenregelstrecken	289
10.2	Systementkopplung	293
10.2.1	Vollständige Entkopplung	293
10.2.2	Angenäherte Entkopplung durch Vereinfachung der Übertragungsfunktion $F_K(s)$	295
10.2.3	Stationäre Entkopplung	296
10.3	Spezialform von Zweigrößenregelstrecken	298
II	Nichtlineare Regelung	301
11	Regelkreise mit nichtlinearen Übertragungsgliedern	303
11.1	Nichtlineare Übertragungsglieder	303
11.2	Die harmonische Balance als Analysemethode	306
11.3	Berechnung von Beschreibungsfunktionen	312
11.3.1	Vorlast	312

11.3.2	Idealer Zweipunktregler	313
11.3.3	Zweipunktregler mit Hysterese	314
11.3.4	Dreipunktregler	317
11.3.5	Magnetisierungskennlinie	318
11.4	Stabilitätsuntersuchung mit dem Zweiortskurvenverfahren	320
11.5	Nichtlineare Regler	327
12	Entwurf nichtlinearer Regler	331
12.1	Realisierung nichtlinearer Regler	331
12.2	Regelung von Verzögerungsstrecken	335
12.2.1	Idealer Zweipunktregler	336
12.2.2	Zweipunktregler mit Hysterese für eine PT_n -Strecke	341
12.2.3	Zweipunktregler mit Hysterese für eine PT_1 -Strecke ohne Totzeit	343
12.2.4	Zweipunktregler mit Hysterese und Rückführung	345
12.2.5	Dreipunktregler mit Hysterese	350
12.3	Regelung von integrierenden Regelstrecken	353
12.3.1	Zweipunktregler mit Hysterese	353
12.3.2	Dreipunktregler mit Hysterese	354
13	Anwendungsbeispiele linearer und nichtlinearer Regelungen	357
13.1	Drehzahlregelung einer Gleichstrommaschine mit einer Kaskadenregelung	357
13.1.1	Struktur der Regelstrecke Gleichstromantrieb	357
13.1.2	Auslegung des Stromregelkreises	359
13.1.3	Auslegung des Drehzahlregelkreises	362
13.2	Stabilisierung eines instabilen Pendels	366
13.2.1	Dynamikgleichungen von Stellmotor und Getriebe	366
13.2.2	Analyse des Regelkreises	368
13.2.3	Auslegung des Regelkreises	371
III	Rechnergestützter Reglerentwurf	373
14	Numerische Grundlagen	375
14.1	Nullstellenberechnung von Polynomen	376
14.2	Simulation linearer Systeme	378
14.2.1	Darstellung linearer Systeme im Zustandsraum	378
14.2.2	Simulation des zeitdiskreten Systems	383
14.3	Simulation nichtlinearer Systeme	388
14.3.1	Formulierung der Vektordifferentialgleichung... ..	388
14.3.2	Integration von Differentialgleichungen	390

15	Spezielle Reglerentwurfverfahren und -werkzeuge	395
15.1	SISO Design Tool von MATLAB	395
15.2	Regelsystem-Prototypenentwurf, Produktion und Test	397
15.2.1	Entwicklungsprozess	397
15.2.2	Rapid Control Prototyping (RCP)	399
15.2.3	Hardware-in-the-Loop-Simulation (HIL)	401
A	Die Laplace-Transformation	403
A.1	Definition der Laplace-Transformation	403
A.2	Rechenregeln der Laplace-Transformation	405
A.2.1	Überlagerungssätze	405
A.2.2	Ähnlichkeitssatz	405
A.2.3	Verschiebungssatz	406
A.2.4	Differentiation und Integration	406
A.2.5	Dämpfungssatz	407
A.2.6	Faltungssatz	408
A.2.7	Grenzwertsätze	408
A.3	Die inverse Laplace-Transformation	409
A.4	Anwendungen der Laplace-Transformation	409
A.4.1	Lösung von Differentialgleichungen	409
A.4.2	Die Übertragungsfunktion	411
A.4.3	Die Gewichtsfunktion	412
B	Tabelle häufig vorkommender Regelkreisglieder	417
	Literaturverzeichnis	423
	Index	429
	Glossar	435