

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Steuerungs- und Regelungstechnik für Antriebstechnik, Maschinenbau und Verfahrenstechnik . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Grundbegriffe . . . . .	1
1.1.1 Begriffe und Bezeichnungen . . . . .	4
1.1.2 Steuern und Regeln . . . . .	5
1.1.3 Reglereingriff . . . . .	9
1.1.4 Bauformen von Regelgeräten . . . . .	9
1.1.5 Signalarten von analogen und digitalen Reglern . . . . .	15
1.1.6 Prinzipielle Unterschiede . . . . .	17
1.1.7 Stellglieder . . . . .	21
1.1.8 Verfahren zum Konstanthalten von physikalischen Größen . . . . .	23
1.2 Schwerpunkte der Regelungstechnik . . . . .	26
1.2.1 Aufgaben eines Regelungstechnikers . . . . .	27
1.2.2 Aufbau von Regelstrecken . . . . .	27
1.2.3 Strecken mit Ausgleich . . . . .	31
1.2.4 Strecken ohne Ausgleich . . . . .	32
1.2.5 Strecken mit Totzeit . . . . .	34
1.3 Regelstrecken mit Verzögerung . . . . .	35
1.3.1 Strecken mit einer Verzögerung (1. Ordnung) . . . . .	37
1.3.2 Strecken mit zwei Verzögerungen (2. Ordnung) . . . . .	38
1.3.3 Strecken mit mehreren Verzögerungen (höherer Ordnung) . . . . .	39
1.3.4 Aufnahme der Sprungantwort . . . . .	40
1.3.5 Kennwerte von Regelstrecken . . . . .	42
1.3.6 Übertragungsbeiwert und Arbeitspunkt . . . . .	42
1.4 Stetige Regler . . . . .	44
1.4.1 P-Regler . . . . .	45
1.4.2 Proportionalbereich . . . . .	46
1.4.3 Bleibende Regelabweichung und Arbeitspunkt . . . . .	48
1.4.4 Regler mit Dynamik . . . . .	51
1.4.5 I-Regler . . . . .	52

1.4.6	PI-Regler . . . . .	53
1.4.7	PD-Regler. . . . .	56
1.4.8	PID-Regler . . . . .	59
1.5	Regelkreise mit stetigen Reglern . . . . .	61
1.5.1	Stabiles und instabiles Verhalten des Regelkreises . . . . .	62
1.5.2	Führungs- und Störverhalten des Regelkreises . . . . .	63
1.5.3	Führungsverhalten des Regelkreises . . . . .	63
1.5.4	Welcher Regler passt zu welcher Regelstrecke? . . . . .	64
1.5.5	Optimierung von Prozess und Regelstrecke . . . . .	66
1.5.6	Maßstab für die Regelgüte . . . . .	68
1.5.7	Einstellung nach der Schwingungsmethode . . . . .	68
1.5.8	Einstellung nach der Übergangsfunktion bzw. Streckensprungantwort. . . . .	71
1.5.9	Einstellung nach der Anstiegsgeschwindigkeit . . . . .	73
1.5.10	Kontrolle der Reglereinstellung . . . . .	75
1.6	Schaltende Regler . . . . .	77
1.6.1	Leistungssteuerung mit einem unstetigen Regler . . . . .	78
1.6.2	Zweipunktregler ohne Dynamik . . . . .	81
1.6.3	Verlauf der Regelgröße bei Strecken 1. Ordnung . . . . .	81
1.6.4	Verlauf der Regelgröße bei einer Strecke höherer Ordnung . . . . .	84
1.6.5	Verlauf der Regelgröße bei Strecken ohne Ausgleich . . . . .	86
1.6.6	Technische Auslegung von Zweipunktreglern ohne Dynamik . . . . .	86
1.6.7	Zweipunktregler mit Dynamik. . . . .	88
1.6.8	Dreipunktregler mit und ohne Dynamik . . . . .	92
1.6.9	Dreipunktschrittregler . . . . .	94
1.6.10	Stetiger Regler mit integriertem Stellungsregler für Motorstellglieder . . . . .	97
2	<b>Dioden in der Leistungselektronik . . . . .</b>	99
2.1	Aufbau von Dioden . . . . .	100
2.1.1	Raumladung und Raumladeschicht . . . . .	101
2.1.2	PN-Übergang unter verschiedenen äußeren Bedingungen . . . . .	104
2.1.3	PN-Übergang in Sperrrichtung . . . . .	104
2.1.4	PN-Übergang in Durchlassrichtung . . . . .	106
2.1.5	Kennlinien von Dioden . . . . .	109
2.1.6	Farbkennzeichnung von Kleinsignaldiode nach JEDEC und Pro-Electron . . . . .	112
2.1.7	Montage- und Lötvorschriften . . . . .	114
2.1.8	Wärmeableitung . . . . .	116
2.2	Untersuchungen von Dioden . . . . .	120
2.2.1	Kennlinie einer Diode . . . . .	120
2.2.2	Statischer und dynamischer Innenwiderstand . . . . .	123

---

2.2.3	Dynamische Aufnahme der Kennlinie . . . . .	124
2.2.4	Kennlinien verschiedener Dioden . . . . .	128
2.2.5	Aufbau von Datenblättern . . . . .	129
2.2.6	Begriffserklärungen zu Dioden . . . . .	131
2.3	Gleichrichterschaltungen mit Dioden . . . . .	134
2.3.1	Einweggleichrichter . . . . .	135
2.3.2	Zweiweggleichrichter . . . . .	138
2.3.3	Brückengleichrichter . . . . .	140
2.3.4	Drehstrom-Mittelpunkt-Schaltung . . . . .	142
2.3.5	Drehstrom-Brückengleichrichter . . . . .	144
2.3.6	Einphasengleichrichter mit Ladekondensator . . . . .	147
2.3.7	Doppelweggleichrichter mit Ladekondensator . . . . .	151
2.3.8	Siebschaltungen . . . . .	153
<b>3</b>	<b>Leistungselektronik mit Thyristoren, TRIACs und IGBTs als Leistungssteller . . . . .</b>	<b>161</b>
3.1	Vierschichtdioden . . . . .	162
3.2	Thyristoren . . . . .	168
3.2.1	Gleichstromzündung eines Thyristors . . . . .	172
3.2.2	Wechselstromzündung eines Thyristors . . . . .	175
3.2.3	Impulszündung des Thyristors . . . . .	177
3.2.4	Dynamisches Verhalten von Thyristoren . . . . .	179
3.2.5	Löscherfahren . . . . .	183
3.2.6	Reihen- und Parallelschaltung von Thyristoren . . . . .	186
3.2.7	Schutzschaltungen . . . . .	188
3.2.8	Elektromagnetische Verträglichkeit . . . . .	191
3.2.9	Entstörmaßnahmen an induktiven Lasten . . . . .	199
3.2.10	Entstörmaßnahmen bei Thyristoren . . . . .	204
3.3	Thyristoren als Leistungsschalter . . . . .	206
3.3.1	Schaltende Leistungssteuerung . . . . .	209
3.3.2	Prinzip der Phasenanschnittsteuerung . . . . .	210
3.3.3	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor . . . . .	214
3.3.4	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor im Gleichstromkreis . . . . .	217
3.3.5	Unijektiontransistor . . . . .	217
3.3.6	Phasenanschnittsteuerung mit Thyristor im Wechselstromkreis . . . . .	222
3.3.7	Nullspannungsschalter mit Thyristor . . . . .	224
3.3.8	Schwingungspaketschalter . . . . .	226
3.4	Thyristoren als steuerbarer Gleichrichter . . . . .	229
3.4.1	Halbgesteuerte Brückenschaltung . . . . .	230
3.4.2	Steuerbarer Gleichrichter in Mittelpunktschaltung . . . . .	232
3.4.3	Steuerbare Drehstromgleichrichter . . . . .	232

3.5	Statische Wechselrichter mit Thyristoren . . . . .	236
3.5.1	Thyristor-Wechselrichter in Mittelpunktschaltung . . . . .	236
3.5.2	Thyristor-Wechselrichter in Brückenschaltung . . . . .	239
3.6	Leistungselektronik mit DIAC und TRIAC . . . . .	241
3.6.1	Aufbau eines DIAC . . . . .	241
3.6.2	Aufbau eines TRIAC . . . . .	244
3.6.3	Phasenanschnitt mit DIAC und TRIAC . . . . .	246
3.7	IC-Leistungselektronik . . . . .	249
3.7.1	Phasenanschnittsteuerung mit TRIAC . . . . .	250
3.7.2	Nullspannungsschalter mit TRIAC . . . . .	252
3.7.3	Schwingungspaketschaltung . . . . .	253
3.8	IGBT als Leistungssteller . . . . .	254
3.8.1	Aufbau und Funktionsweise von IGBTs . . . . .	255
3.8.2	Schaltvorgänge . . . . .	257
3.8.3	Ansteuerung von IGBTs . . . . .	260
3.8.4	Asymmetrische Ansteuerung mit Widerstand für die IGBT-Ansteuerung . . . . .	265
3.8.5	Schaltüberspannung durch $di/dt$ -Regeleingriff . . . . .	267
3.8.6	Unipolare und bipolare Ansteuerung der IGBTs . . . . .	269
3.8.7	IGBT-Leistungssteller als Stellglied . . . . .	272
4	<b>Drehstrommotor . . . . .</b>	277
4.1	Grundlagen des Asynchronmotors . . . . .	279
4.1.1	Elektromagnetische Induktion . . . . .	280
4.1.2	Spule mit Eisenkern . . . . .	282
4.1.3	Magnetischer Widerstand und magnetischer Leitwert . . . . .	286
4.1.4	Kraft im Magnetfeld . . . . .	287
4.1.5	Kraftwirkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld . . . . .	293
4.1.6	Induktion der Bewegung . . . . .	296
4.1.7	Selbstinduktion und magnetische Energie . . . . .	298
4.1.8	Induktiver Blindwiderstand . . . . .	300
4.2	Magnetismus und Drehstrom . . . . .	303
4.2.1	Magnetfeld . . . . .	303
4.2.2	Schlupf, Moment und Drehzahl . . . . .	307
4.2.3	Wirkungsgrad und Verlust . . . . .	310
4.2.4	Drehzahländerungen . . . . .	314
4.2.5	Motordaten . . . . .	319
4.2.6	Belastungscharakteristiken . . . . .	327
4.3	Synchronmotoren . . . . .	330
4.4	Drehstrom-Reluktanzmotor . . . . .	332

<b>5 Steuerungen eines Drehstrom-Asynchronmotors</b>	335
5.1 Wirkungsweise eines Asynchronmotors	337
5.1.1 Aufbau von Läuferspulen	339
5.1.2 Sondernut-Motoren	342
5.1.3 Stern- und Dreieckschaltung	347
5.1.4 Sternschaltung im Vierleiternetz	349
5.1.5 Dreieckschaltung	356
5.2 Ansteuerungen von Drehstrommotoren	359
5.2.1 Leitungsschutz	359
5.2.2 Schutzschalter	366
5.2.3 Leistungsschutzschalter	367
5.2.4 Schütz	370
5.2.5 Stern-Dreieck-Schaltung	378
5.3 Starten von Kurzschlussläufermotoren	381
5.3.1 Normaler Stern-Dreieck-Anlauf	381
5.3.2 Verstärkter Stern-Dreieck-Anlauf	386
5.3.3 Autotransformator-Anlauf	389
5.3.4 Anlauf über Drosseln oder Widerstände	389
5.3.5 Mehrstufenmotoren	391
5.4 Elektronischer Softstarter für Drehstrommotoren	393
5.4.1 Realisierung einer Sanftanlaufes	393
5.4.2 Anlaufarten	396
5.4.3 Softstarter-Typen	397
5.4.4 Thermische Belastung beim Start	400
5.5 Anwendungen von Schützschaltungen in der Praxis	402
5.5.1 Einspeisung und Schutzmaßnahmen von elektrischen Anlagen	403
5.5.2 Schützschaltung mit Selbsthaltung	406
5.5.3 Einfache Schützschaltungen	406
5.5.4 Automatischer Stern-Dreieck-Schalter	408
5.5.5 Automatischer Wende-Stern-Dreieck-Schalter	415
5.5.6 Drehstrommotor mit zwei Geschwindigkeiten	420
5.5.7 Drehstrommotor mit drei Geschwindigkeiten	425
5.6 Drehstrommotoren mit Getriebe	429
5.6.1 Drehstromantriebe mit mechanischen Verstellgetrieben	430
5.6.2 Standardgetriebe	434
<b>6 Drehstrommotoren am Frequenzumrichter</b>	445
6.1 Direkter Frequenzumrichter	447
6.1.1 Umrichter mit Zwischenkreis	447
6.1.2 Gleichrichter	449

6.1.3	Funktionen des Zwischenkreises . . . . .	452
6.1.4	Wechselrichter im Frequenzumrichter . . . . .	456
6.2	Frequenzumrichter in der Praxis . . . . .	456
6.2.1	Modulationsverfahren . . . . .	458
6.2.2	SFAVM und 60°-AVM . . . . .	461
6.2.3	Steuerkreis des Frequenzumrichters . . . . .	465
6.2.4	Raum- und Spannungsvektor . . . . .	469
6.3	Frequenzumrichter und Motoren . . . . .	479
6.3.1	U/f-Kennlinie und Drehmoment . . . . .	479
6.3.2	Startspannung, Startausgleich und Schlupfausgleich . . . . .	482
6.3.3	Automatische Motoranpassung (AMA) . . . . .	485
6.3.4	Motordrehmomentregelung . . . . .	489
6.3.5	Überwachungseinheit mit Watchdog . . . . .	490
6.3.6	Dynamischer Bremsbetrieb . . . . .	491
6.3.7	Statischer Bremsbetrieb . . . . .	494
6.3.8	Funktionale Sicherheit . . . . .	497
6.4	Berechnungsbeispiele . . . . .	499
6.4.1	Fahrantrieb mit Frequenzumrichter . . . . .	499
6.4.2	Hubantrieb mit Frequenzumrichter . . . . .	504
6.4.3	Kettenförderer mit Frequenzumrichter . . . . .	509
6.4.4	Rollenbahn mit Frequenzumrichter . . . . .	511
6.4.5	Drehtischantrieb mit Frequenzumrichter . . . . .	514
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>517</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>519</b>