
Inhalt

A	Elektrische Maschinen und Antriebe	1
A.1	Einführung in elektrische Maschinen und Antriebe	1
A.1.1	Energieumwandlung und Antriebssysteme	1
A.1.1.1	Einleitung	1
A.1.1.2	Elektromechanische Energieumwandlung	4
A.1.1.3	Elektrische Energieumformung	5
A.1.2	Beschreibung eines Antriebssystems	6
A.1.3	Bedeutung elektrischer Maschinen und Antriebe	8
A.1.4	Projektierung eines Antriebssystems (Schnittstellen)	9
A.1.5	Einsatzgebiete elektrischer Maschinen und Antriebe	12
A.1.6	Innovationen in der Antriebstechnik	12
A.2	Theoretische Grundlagen elektrischer Maschinen	13
A.2.1	Elektrischer und magnetischer Kreis	13
A.2.1.1	Elektrischer Kreis (Stromkreis)	13
A.2.1.2	Magnetischer Kreis und Durchflutungsgesetz	14
A.2.1.3	Analogie zwischen elektrischem und magnetischem Kreis	15
A.2.1.4	Berechnungsbeispiele eines magnetischen Kreises	16
A.2.2	Wirkungen im Magnetfeld	20
A.2.2.1	Spannungserzeugung nach dem Induktionsgesetz	20
A.2.2.2	Erzeugung mechanischer Kräfte und Leistungen	23
A.3	Elektrische Energieversorgung	24
A.3.1	Erzeugung der elektrischen Energie (Drehstromsynchrongenerator im Kraftwerk)	24
A.3.2	Drehstromsystem	31
A.3.3	Verteilung (Transport) der elektrischen Energie	32
A.3.4	Öffentliche Netze für Groß- und Einzelabnehmer	33
A.3.4.1	Drehstromnetze	33
A.3.4.2	Wechselstromnetze	34
A.3.4.3	Gleichstromnetze	35
A.4	Klassische Maschinentypen	35
A.4.1	Gleichstrom-Maschine (GSM)	35
A.4.1.1	Allgemeine Übersicht	35
A.4.1.2	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise	42
A.4.1.2.1	Funktionsprinzip eines Gleichstrom-Generators	42
A.4.1.2.2	Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine (GSM)	43
A.4.1.2.3	Funktionsprinzip eines Gleichstrom-Motors	48
A.4.1.2.4	Grundgleichungen und zugeordnete Maschinenkonstanten	49
A.4.1.2.5	Ankerstrom-Rückwirkung und ihre Kompensation	52

A.4.1.2.6	Aufbau einer sechspoligen GSM	55
A.4.1.3	Schaltungsmöglichkeiten und Klemmenbezeichnungen	55
A.4.1.3.1	Universelles Schaltbild mit genormten Anschlüssen	57
A.4.1.3.2	Gleichstrom-Nebenschluß-Maschine (GS-NSM)	58
A.4.1.3.3	Gleichstrom-Reihenschluß-Maschine (GS-RSM)	59
A.4.1.4	Betriebsarten (Vierquadranten-Betrieb), Arbeitspunkte, Nennbetrieb .	60
A.4.1.4.1	Vierquadranten-Betrieb	60
A.4.1.4.2	Definition Arbeitspunkt AP durch eine Wirkungs-Kausalkette	61
A.4.1.4.3	Nennbetrieb, Leistungs- bzw. Typenschild	63
A.4.1.5	Betriebsverhalten und Kennlinien der GSM	64
A.4.1.6	Betriebsarten und Kennlinien der GS-NSM	64
A.4.1.6.1	GS-NSM als Generator	64
A.4.1.6.2	GS-NSM als Motor, Schaltung und Kennlinien	70
A.4.1.6.3	Geschwindigkeits-Steuerung und -Regelung	75
A.4.1.6.4	Berechnungsbeispiel einer GS-NSM	80
A.4.1.6.5	Permanentmagneterregte GS-NSM (PM-GSM)	85
A.4.1.6.6	Normierte Gleichungen und Kennlinien der GS-NSM	86
A.4.1.7	Gleichstrom-Reihenschluß-Maschine (GS-RSM)	86
A.4.1.7.1	Betriebsarten und Kennlinien der GS-RSM	86
A.4.1.7.2	Berechnungsbeispiel einer GS-RSM mit nichtlinearer Magnetisierungskurve	92
A.4.1.7.3	Berechnungsbeispiel einer GS-RSM mit linearer magnetischer Aussteuerung	98
A.4.1.8	Leistungsbilanz, Wirkungsgrad und Leistungsgrenzen der GSM	100
A.4.1.9	Anwendung von Gleichstrommaschinen	103
A.4.2	Drehstrom-Asynchronmaschine (DS-ASM)	104
A.4.2.1	Allgemeine Übersicht und Einsatzgebiete von Asynchronmaschinen . .	104
A.4.2.2	Aufbau und Drehfeld der DS-ASM	109
A.4.2.2.1	Stator mit Drehstromwicklung	109
A.4.2.2.2	Schaltarten der Statorwicklungen	110
A.4.2.2.3	Erzeugung des Statordrehfeldes	110
A.4.2.2.4	Polpaarzahl und Synchrondrehzahl	115
A.4.2.2.5	Kurzschluß- oder Käfig-Läufer (DS-ASM-KL)	116
A.4.2.2.6	Schleifringläufer (DS-ASM-SRL)	116
A.4.2.3	Wirkungsweise der DS-ASM (Schlupf- oder Induktionsmaschine) . . .	117
A.4.2.3.1	Wirkungskausalkette der DS-ASM	118
A.4.2.3.2	Schlupf, Drehzahl, Drehmoment und Betriebsbereiche	119
A.4.2.3.3	DS-ASM als Frequenzwandler und Transformator	120
A.4.2.3.4	Ersatzschaltbilder der DS-ASM (analog zum Trafo)	122
A.4.2.3.5	Ableitung der Kloß'schen Formel, Kippmoment und Kippschlupf . . .	127
A.4.2.3.6	Drehmoment-Schlupf (bzw. -Drehzahl)-Kennlinien, Arbeitspunkte und Nennbetrieb	129
A.4.2.4	Ortskurven und verschiedene Kennlinien	131
A.4.2.4.1	Ortskurven für vereinfachtes Ersatzschaltbild	131
A.4.2.4.2	Leistungskomponenten in der Ortskurve	133
A.4.2.4.3	Meßtechnisch-grafische Ermittlung der Stromortskurve	134
A.4.2.4.4	Grafische Ermittlung der Schlupfbezifferung (<i>s</i> -Skala)	135
A.4.2.4.5	Schlupfbezifferung mit Vorwiderständen beim Schleifringläufer	136
A.4.2.4.6	Ermittlung verschiedener Kennlinien aus der Stromortskurve	138
A.4.2.5	Betrieb der DS-ASM	138

A.4.2.5.1	Klemmenbrett und verschiedene Anschlußmöglichkeiten	138
A.4.2.5.2	Einschalten und Hochlauf (Stern-Dreieck-Anlauf)	139
A.4.2.5.3	Kennlinien für verschiedene Vorwiderstände beim Schleifringläufer . .	142
A.4.2.5.4	Leistungen und Wirkungsgrad	143
A.4.2.5.5	Typen- oder Leistungsschild und Datenblatt	144
A.4.2.5.6	Drehzahlsteuerung	145
A.4.2.6	Varianten von Drehstrom-Asynchronmotoren	148
A.4.2.6.1	Stromverdrängungsläufer: Keilstab-, Tropfenstab-, Hochstab- und Doppelstabläufer	148
A.4.2.6.2	Polumschaltbare Kurzschlußläufer	148
A.4.2.6.3	Schleifringläufer mit Vorwiderständen	149
A.4.2.7	Berechnungsbeispiele für Drehstrom-Asynchronmaschinen	150
A.4.2.7.1	Berechnungsbeispiel eines DS-ASM-SRL (Schleifringläufers)	150
A.4.2.7.2	Berechnungsbeispiel eines DS-ASM-KL (Käfigläufers) mit Stern-Dreieck-Anlauf	154
A.4.3	Einphasen-Asynchronmaschine (EP-ASM)	158
A.4.3.1	Der reine Einphasenmotor (ohne Hilfswicklung)	158
A.4.3.2	Einphasenasynchronmotor mit Hilfswicklung (Kondensatormotor) . .	160
A.4.3.3	Einphasen-ASM mit Widerstandshilfsphase	162
A.4.3.4	Der Spaltpolmotor	163
A.4.4	Drehstrom-Synchronmaschine (DS-SM)	164
A.4.4.1	Allgemeine Übersicht und Einsatzgebiete	164
A.4.4.2	Aufbau und Wirkungsweise der Drehstrom-Synchronmaschine (DS-SM)	166
A.4.4.2.1	Stator und Drehfeld	166
A.4.4.2.2	Vollpol- und Schenkelpol-Rotor, Synchronbetrieb	166
A.4.4.3	Drehstrom-Synchronmaschine als Generator im Kraftwerk	168
A.4.4.3.1	Leerlauf und Belastungsbetrieb, Dauer- und Stoß-Kurzschlußbetrieb .	168
A.4.4.3.2	Synchronisation im Netzbetrieb	173
A.4.4.4	Drehstrom-Synchronmaschine als Motor (Leerlauf und Belastungsbetrieb)	175
A.4.4.5	Vierquadrantenbetriebe, Über- und Untererregung, Zeigerdiagramm und Ortskurve	176
A.4.4.5.1	Mechanischer und elektrischer Vierquadrantenbetrieb, Zeigerdiagramme	176
A.4.4.5.2	Ortskurve in der komplexen Darstellung (komplexe Zahlenebene) . . .	178
A.4.4.6	Drehmoment-Lastwinkel-Kennlinie	180
A.4.4.7	Anlaufverfahren bei Synchronmaschinen	181
A.4.4.7.1	Synchronisierung von Synchrongeneratoren	181
A.4.4.7.2	Anlauf von Synchronmotoren	181
A.4.4.8	Sonderbauarten von Synchronmotoren	182
A.4.4.8.1	Reluktanzmotor	182
A.4.4.8.2	Einphasensynchronmotor, Hysteresemotoren (EP-SM)	184
A.4.4.8.3	Synchron-Kleinstmotoren	185
A.4.5	Universalmotoren für Gleich- und Wechselstrombetrieb	186
A.4.5.1	Aufbau und Einsatzgebiete	186
A.4.5.2	Funktionsweise als Wechselstrommotor und Betriebskennlinien	187
A.4.5.3	Variation und Steuerung/Regelung der Drehzahl	188
A.5	Sonderausführungen für steuer/regelbare Antriebe (Servoantriebe) . .	188
A.5.1	Gleichstromgesteuerte Servoantriebe	189

A.5.1.1	Permanenterregte, bürstenkommutierte Scheibenläufermaschinen . . .	189
A.5.1.1.1	Funktionsprinzip und Aufbau	189
A.5.1.1.2	Formeln und Kennlinien	191
A.5.1.1.3	Besondere Eigenschaften und Vorteile	193
A.5.1.1.4	Scheibenläufer-Antriebspakete	194
A.5.1.1.5	Anwendungsbereiche	195
A.5.1.1.6	Datenblätter und Auswahl von Scheibenläufertypen	195
A.5.1.2	Bürstenkommutierte Drehmoment-(Torque-)Motoren für Direktantriebe	196
A.5.1.2.1	Aufbau und Wirkungsweise	196
A.5.1.2.2	Eigenschaften des bürstenkommutierten Torquemotors	198
A.5.1.2.3	Anwendungen (in gesteuerten oder geregelten Antrieben bzw. Servosystemen)	201
A.5.1.2.4	Bürstenloser (brushles) Torquemotor	201
A.5.1.3	Elektronikmotoren mit elektronischer Kommutierung	203
A.5.1.3.1	Elektronisch kommutierter (EC-) Motor (Elektronikmotor)	204
A.5.1.3.2	Elektronische Block- oder Sinus-Kommutierung	205
A.5.1.3.3	Systembeschreibung (EC-Motor, Winkelgeber und Sinusverstärker)	209
A.5.1.3.4	Vorteile und Anwendungsgebiete	210
A.5.1.4	DC-Motoren mit eisenlosem Rotor (Glockenankermotor)	211
A.5.1.4.1	Bürstenbehaftete, mechanische kommutierte DC-Motoren (Ausführung Glockenanker)	211
A.5.1.4.2	Bürstenlose, elektronisch kommutierte DC-Glockenankermotoren	212
A.5.1.4.3	Einsatzgebiete	214
A.5.2	Linearantriebe	214
A.5.2.1	Vergleich linearer Direktantrieb gegen Zahnstangen, Spindeln und Exzenter	214
A.5.2.2	Lineare Piezoantriebe	215
A.5.2.3	Magnetostruktionsantriebe	215
A.5.2.4	Proportionalmagnete, Magnetmotor	216
A.5.2.5	Gleichstrom-Linearmotoren	216
A.5.2.6	Reluktanz-Linearantrieb	218
A.5.2.7	Magnetlager	220
A.5.3	Piezostelltechnik (Piezotranslator PZT, Piezo Walk Drive, Inchworm Drive)	221
A.5.3.1	Einleitung und Anwendungsgebiete	221
A.5.3.2	Grundlagen der piezoelektrischen Stelltechnik	222
A.5.3.3	Erreichbare Ausdehnung eines PZT-Translators	223
A.5.3.4	Dynamischer Betrieb	225
A.5.3.5	Ansteuerung von Piezotranslatoren	225
A.5.3.6	Positionsgeregelter Betrieb	226
A.5.3.7	Erwärmung des Piezotranslators	227
A.5.3.8	Bauformen piezoelektrischer Stellelemente	227
A.5.3.9	Piezo-Wanderantrieb (<i>Piezo Walk Drive</i>)	229
A.5.4	Schrittmotoren (Stepper Motor)	230
A.5.4.1	Einleitung und Einsatzgebiete	230
A.5.4.2	Verschiedene Bauformen, Aufbau, Wirkungsweise	231
A.5.4.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	231
A.5.4.2.2	Schrittmotor mit Permanentmagnet (PM-Schrittmotor)	234
A.5.4.2.3	Hybrid-Schrittmotor	235

A.5.4.2.4	Scheibenmagnet-Schrittmotor (SM-SM)	237
A.5.4.3	Betriebsverhalten des Schrittmotors	238
A.5.4.3.1	Lastwinkel und Haltemoment	238
A.5.4.3.2	Bewegungsvorgang bei Einzelschritten	239
A.5.4.3.3	Drehmoment-Schrittfrequenz-Kennlinie	239
A.5.4.3.4	Leistung und Wirkungsgrad	241
A.5.4.4	Ansteuerschaltungen von Schrittmotoren (Steuerelektronik)	241
A.5.4.4.1	Schrittmotor-Steuerungen und -Steuersysteme	241
A.5.4.4.2	Verschiedene Varianten von Schrittmotor-Treibern	242
A.5.4.5	Mikroschrittbetrieb	244
A.5.4.6	Schrittmotor als Linearantrieb	247
A.5.5	Asynchron- oder Synchron-Servomotoren mit Umrichtertechnik	247
A.6	Dynamisches Verhalten elektrischer Antriebe	248
A.6.1	Vergleich statischer und dynamischer Betrieb	248
A.6.2	Statischer Betrieb	250
A.6.2.1	Statische Motor- und Last-Kennlinien	251
A.6.2.2	Statischer Arbeitspunkt und dessen Stabilität (Stabilitätskriterium)	252
A.6.3	Dynamischer Betrieb	254
A.6.3.1	Massenträgheits- und Beschleunigungsmoment	254
A.6.3.2	Transformation durch Zwischengetriebe	254
A.6.3.3	Zustandsgleichung nach NEWTON (Newtonsches Aktionsprinzip)	259
A.6.3.4	Verschiedene Hochlaufkurven	259
A.6.3.4.1	Linearer Hochlauf (Standard Geschwindigkeits-Zeit-Rampe)	259
A.6.3.4.2	Exponentieller Hochlauf (Zeitkonstanten)	260
A.6.3.4.3	Graphisch-rechnerische Ermittlung des Hochlaufs (allgemeiner Fall)	268
A.6.4	Berechnungsbeispiele	270
A.6.4.1	Linearer Hochlauf mit Gleichstrom-Permanentmagnetmotor	270
A.6.4.2	Exponentieller Hochlauf mit Gleichstrom-Permanentmagnetmotor	275
A.6.4.3	Hochlauf nach grafisch-rechnerischer Lösungsmethode	277
A.7	Thermodynamisches Verhalten	278
A.7.1	Allgemeines	278
A.7.2	Betriebsarten und thermisches Verhalten (Erwärmungskurven)	281
A.7.2.1	Dauerbetrieb	281
A.7.2.1.1	Berechnungsbeispiel thermischer Dauerbetrieb	282
A.7.2.2	Kurzzeitbetrieb	284
A.7.2.2.1	Berechnung der Beharrungstemperatur bei vorgegebener Einschalt- oder Betriebsdauer	284
A.7.2.2.2	Ermittlung der erforderlichen Stillstands- oder Abkühlungsdauer	285
A.7.2.2.3	Berechnungsbeispiel thermischer Kurzzeitbetrieb	285
A.7.2.3	Aussetzbetrieb, periodischer Ein/Ausschaltbetrieb (intermittierender Betrieb)	289
A.7.3	Bestimmung der Motorleistung vom Aspekt der Erwärmung	292
A.7.3.1	Motorleistung bei Dauerbetrieb	292
A.7.3.2	Motorleistung bei Kurzzeitbetrieb	293
A.7.3.3	Motorleistung bei Aussetzbetrieb	293
A.7.3.4	Motorleistung bei stark wechselnder Belastung	294
A.7.3.5	Berechnungsbeispiel für intermittierenden Betrieb	294
A.8	Normrichtlinien: Bauformen, Schutzarten, Kühlung und Isolation	295
A.8.1	Bauformen	295

A.8.2	Schutzarten	297
A.8.3	Kühlung	298
A.8.4	Isolation	298
B	Elektromechanik	299
B.1	Begriffe, Normung und Darstellung	300
B.2	Mechanische Bauelemente	303
B.2.1	Schalter	303
B.2.2	Leuchtmelder	308
B.3	Elektromechanische Bauteile	309
B.3.1	Relais	309
B.3.2	Halbleiterrelais	314
B.3.2.1	Halbleiterrelais für Gleichstrom mit einem bipolaren Leistungstransistor	319
B.3.2.2	Halbleiterrelais für Gleichstrom mit MOSFET	323
B.3.2.3	Halbleiterrelais für Wechselstrom	323
B.3.2.3.1	Realisierung eines Wechselspannungsrelais mit Thyristoren	324
B.3.2.3.2	Eingangsschaltung mit Potentialtrennung	325
B.3.2.3.3	Steuerschaltung mit Thyristoren	326
B.3.2.4	Halbleiterschalter für dreiphasigen Wechselstrom	326
B.3.2.5	Schutzbeschaltung für Halbleiterrelais	327
B.3.3	Zeitrelais	327
B.3.4	Schütze	330
B.3.4.1	Schütztechnik	330
B.3.4.2	Stern-Dreieck-Schütz	332
B.3.4.3	Wendeschutzschaltung	334
B.3.4.4	Zusatzbeschaltung von Schützen	336
B.4	Sicherheitsbaugruppen	340
B.4.1	Sicherheitsschalter	341
B.4.2	Sicherheitsverriegelungen	343
B.4.3	Überwachungsbausteine	344
B.5	Klemmen	345
B.6	Sicherungen	346
C	Steuerungen und Regelungen	349
C.1	Digitale Schaltungen	349
C.1.1	Grundlagen der digitalen Schaltungstechnik	349
C.1.1.1	Binäres Zahlensystem	350
C.1.1.2	Verknüpfungen nach Boole und De Morgan	353
C.1.2	Flipflop und Zähler	358
C.1.3	Digitale Speicher	363
C.1.4	Rechnertechnik	370
C.2	Digital-Analog- (DA) und Analog-Digital-Wandler (AD)	373
C.2.1	Digital-Analog-Wandler (DA-Wandler)	374

C.2.1.1	Das R-2R-Leiternetzwerk	375
C.2.1.2	Multiplizierender DA-Wandler	376
C.2.1.3	Vierquadrantenmultiplizierer	377
C.2.1.4	DA-Wandler mit fester Referenzspannung	379
C.2.1.5	Datenwandler mit Mikroprozessor-kompatibler Schnittstelle	380
C.2.1.6	Fehler bei der Datenumsetzung	381
C.2.2	Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler)	382
C.2.2.1	Integrierende Analog-Digital-Wandler	382
C.2.2.2	Analog-Digital-Wandler nach dem Prinzip der sukzessiven Approximation	386
C.2.2.3	Die Abtast- und Halteschaltung (Sample and Hold)	389
C.2.2.4	Parallel Analog-Digital-Wandler	390
C.3	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	393
C.3.1	Einführung	393
C.3.2	Aufbau und Wirkungsweise	394
C.3.3	Programmierung speicherprogrammierbarer Steuerungen	398
C.3.3.1	Befehlsvorrat einer SPS	398
C.3.3.2	Arten der Programmdarstellung	399
C.3.4	Programmierung einfacher Steuerungsfunktionen	401
C.3.4.1	Steuerungen mit Verknüpfungsfunktionen	401
C.3.4.1.1	ODER-Funktion, UND-Funktion und Negation	401
C.3.4.1.2	Disjunktive und konjunktive Schaltfunktionen	403
C.3.4.2	Speicherfunktion	404
C.3.4.3	Auswertung von Signalfanken	407
C.3.4.4	Zeitgeberfunktion (Timer)	408
C.3.4.4.1	Zeitgeber mit verlängertem Impuls (Monoflop)	408
C.3.4.4.2	Übersicht über verschiedene Zeitgeberfunktionen	411
C.3.4.5	Zählfunktionen	413
C.3.4.6	Realisierung von Ablaufsteuerungen	415
C.3.4.7	Diagnose und Überwachungsfunktionen	419
C.3.5	Wortverarbeitung und höhere Funktionen	420
C.3.5.1	Wortbildung und Befehlsliste	420
C.3.5.2	Lade-, Transfer- und Vergleichsoperationen	423
C.3.5.3	Lade-, Transfer- und Vergleichsoperationen mit Zählern	425
C.3.5.4	Lade-, Transfer- und Vergleichsoperationen mit Zeitgebern	426
C.3.5.5	Analogwertverarbeitung in speicherprogrammierbaren Steuerungen	427
C.3.5.6	Regelung in speicherprogrammierbaren Steuerungen	430
C.3.6	Programmierung mit symbolischen Parametern und Software-Bausteinen	432
C.3.6.1	Programmierung mit symbolischen Parametern	432
C.3.6.2	Programmierung mit Software-Bausteinen	433
C.3.7	Programmiereinrichtungen	434
C.3.8	Geräte für Prozeßbedienung und Prozeßvisualisierung	435
C.3.9	Vernetzung von SPS-Systemen	435
	Übungsaufgaben	437
	Weiterführende Literatur	437
	Normen und Richtlinien	438
C.4	Numerische Steuerungen (NC)	438
C.4.1	Einführung und Übersicht	438

C.4.2	Positioniersteuerungen	440
C.4.3	NC-Antriebe	440
C.4.4	Bahnsteuerungen	442
C.4.4.1	Zahl und Anordnung der NC-Achsen	442
C.4.4.2	Interpolation	444
C.4.4.3	Bahnfehlerkompensation	445
C.4.4.4	Bewegungsführung und Bahnplanung	447
C.4.4.5	Framekonzept	449
C.4.4.6	Koordinatentransformation	450
C.4.5	Kommunikation	451
C.4.6	Programmierung	452
C.4.6.1	Programmierung nach DIN 66025	452
C.4.6.2	Grafisch-Interaktive-Programmierung	453
C.4.7	Indikatoren der Leistungsfähigkeit	454
C.5	Feldbusse	455
C.5.1	Topologie von Feldbussen	458
C.5.2	Bitbus	460
C.5.3	Profibus	461
C.5.4	Interbus-S	464
C.5.5	CAN-Bus	466
C.5.6	AS-Interface	471
C.5.7	LON	472
C.5.8	SERCOS	475
C.6	Regelungstechnik	478
C.6.1	Einleitung	478
C.6.1.1	Unterschied zwischen Steuern und Regeln	478
C.6.1.2	Analoge und digitale Regler	479
C.6.1.3	Grundstruktur einer Regelung und Anforderungen	480
C.6.1.4	Beispiele aus der Praxis	481
C.6.2	Berechnung von Regelkreis- oder Übertragungsgliedern	484
C.6.2.1	Zeitverhalten von Übertragungsgliedern, Zeitdiagramme	484
C.6.2.2	Frequenzverhalten von Übertragungsgliedern, Frequenzgang, Bode-Diagramm	491
C.6.3	Auslegung von Regelkreisen und Untersuchung der Stabilität	493
C.6.3.1	Grundgleichung des Regelkreises	493
C.6.3.2	Stabilität eines Regelkreises	497
C.6.4	Vorgehen beim Entwurf einer stabilen Regelung (Beispiel Spannungsregler)	499
C.6.4.1	Aufbau des Spannungsreglers	499
C.6.4.2	Stabilitätsbedingung (Stabilitätskriterium)	500
C.6.4.3	Beurteilung des Regelkreises mit dem Bode-Diagramm	500
C.6.4.4	Einschwingverhalten	504
C.6.4.5	Verbleibende Regelabweichung	505
D	Einführung in die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	507
D.1	Definition und Begriffe	507
D.2	Physikalische Größen und Einheiten	510

D.3	Elektromagnetische Kopplung	511
D.3.1	Leitungsgebundene Kopplungen	513
D.3.2	Die Wellenlänge λ als Maßstab	516
D.3.3	Gestrahlte Kopplungen	516
D.3.3.1	Verringerung von Kopplungen durch Schirmung	518
D.4	Funkentstör-Bauelemente	520
D.4.1	Kondensatoren	521
D.4.2	Induktivitäten	521
D.4.3	Filter	523
D.4.4	Spezielle Entstörbauelemente	524
D.4.5	Schirmgehäuse und Schirmmaterialien	525
D.5	Forderungen und Maßnahmen zur Realisierung der EMV	526
D.5.1	Eigenschaften von Signalen, Störabstand und parasitäre Effekte	529
D.5.2	Gesetzliche Vorgaben	532
D.5.3	Normen	533
D.5.3.1	Fachgrundnormen und Grundnormen	535
D.5.3.2	Produktfamilien-Normen und Produktnormen	539
D.5.3.3	Sonstige Normen	543
D.6	EG-Konformitätserklärung und CE-Kennzeichnung	544
D.7	Meßtechnik	545
D.7.1	Meßgeräte	547
D.7.2	Dokumentation und Prüfbericht	548
	Zitierte Normen	548
	Weiterführende Literatur	551
	Anschriften	552
E	Produktsicherheit	553
E.1	Einführung	553
E.1.1	Erwartungen der Benutzer	553
E.1.2	Gesetzliche Anforderungen	553
E.1.3	Elektrische Ausrüstung	554
E.2	Sicherheit und Gefahr	555
E.2.1	Risiko	555
E.2.2	Risikobewertung	556
E.2.3	Anwendbare Normen	556
E.3	Betriebsbedingungen	557
E.3.1	Umgebungstemperatur der Luft	558
E.3.2	Luftfeuchte	558
E.3.3	Höhenlage	558
E.3.4	Verschmutzung	558
E.3.5	Ionisierende und nichtionisierende Strahlung	559
E.3.6	Vibration und Schock	559
E.3.7	Transport und Lagerung	559
E.3.8	Checkliste der Betriebsbedingungen	559
E.3.9	Anwendbare Normen	559

E.4	Mechanische Gefahren und Schutzmaßnahmen	559
E.4.1	Gefahrenquellen	559
E.4.2	Konstruktive Schutzmaßnahmen	561
E.4.3	Elektrische Schutzmaßnahmen	562
E.4.3.1	STOP	562
E.4.3.2	NOT-AUS	563
E.4.4	Anwendbare Normen	564
E.5	Elektrische Gefahren	565
E.5.1	Gefährlicher Körperstrom	565
E.5.2	Lebensgefährliche Auswirkungen	566
E.5.3	Gefährliche Auswirkungen	566
E.5.4	Gefährdungsbereiche	567
E.5.5	Stromimpulse	568
E.5.6	Energiegefahr	569
E.6	Schutzmaßnahmen gegen elektrische Gefahren	569
E.6.1	Prinzipielle Anforderungen	569
E.6.2	Komponenten der Isolationskoordination	570
E.6.3	Beispiel zur Koordinierung der Schutzmaßnahmen	572
E.6.3.1	Schritt 1: Identifizierung der externen Schnittstellen und der internen Stromkreise	572
E.6.3.2	Schritt 2: Bestimmung der Trennstellen	574
E.6.3.3	Schritt 3: Bestimmen der Parameter für die elektrische Dimensionierung der Isolationen	576
E.6.3.4	Schritt 4: Auswahl der Abstände	576
E.6.3.5	Schritt 5: Auswahl des Schutzleiterquerschnitts	577
E.6.4	Anwendbare Normen	578
E.7	Thermische Gefahren und Schutzmaßnahmen	578
E.7.1	Verbrennungen oder Verbrühungen	578
E.7.2	Arbeitsumgebung mit extremen Temperaturen	579
E.7.3	Wärmeerzeugende Komponenten	579
E.7.4	Schutzmaßnahmen	579
E.7.5	Anwendbare Normen	579
E.8	Strahlende Gefahren	580
E.8.1	Laser	580
E.8.1.1	Gefährdung durch Laser	580
E.8.1.2	Schutzmaßnahmen	580
E.8.1.3	Anwendbare Normen	582
E.8.2	Ionisierende Strahlung	582
E.8.2.1	Gefährdungen	582
E.8.2.2	Schutzmaßnahmen	582
E.8.2.3	Anwendbare Verordnungen	582
E.8.3	Elektromagnetische Strahlung	582
E.8.3.1	Gefährdungen	582
E.8.4	Akustische Gefahren	583
E.8.4.1	Gefährdung durch Lärm	583
E.8.4.2	Schutzmaßnahmen	583
E.8.4.3	Anwendbare Normen	583

E.9	Chemische Gefahren	584
E.9.1	Gefährdungen	584
E.9.2	Schutzmaßnahmen	584
E.9.3	Anwendbare Normen	584
E.10	Biologische Gefahren	584
E.10.1	Gefährdungen	584
E.10.2	Schutzmaßnahmen	585
E.10.3	Anwendbare Normen	585
	Lösungen der Übungsaufgaben	587
	Sachverzeichnis	589