

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	13
1.1 Stand der elektrischen Antriebstechnik	13
1.2 Besondere Eigenschaften	16
1.3 Qual der Auswahl	16
1.4 Komponenten	17
1.5 Direkt und ohne Mechanik – «Mechatronik»	18
1.6 Dezentral installiert	18
1.7 Gleichstrom- oder Drehstromlösung?	19
1.8 Kfz-(Hilfs-)Antriebe	20
1.9 Lebensdauerkosten	21
2 Das moderne Antriebspaket	23
2.1 Bestimmungsgrößen bei der Auswahl	23
2.2 Mikrorechner sorgen für Wirtschaftlichkeit	24
2.3 Vorteile der veränderbaren Drehzahl	24
2.4 Antriebsbeispiele	25
2.5 Drehzahlveränderbare Antriebe im Vergleich	26
3 Allgemeine Grundlagen der Antriebstechnik	29
3.1 Grundsystem des Antriebs	29
3.2 Physikalische Gesetze	30
3.3 Antriebsmomente elektrischer Maschinen	33
3.4 Grundtypen der Lastkennlinien (Arbeitsmaschinen)	35
3.5 Stabiler Betriebspunkt (Arbeitspunkt des Antriebs)	35
3.6 Erwärmung	37
3.7 Kühlung	40
3.8 Zeitkonstanten	42
3.9 Betriebsarten	43
3.10 Äquivalente Belastung (mittlere Belastung)	48
3.11 Mechanische Übergangsvorgänge	49
3.12 Energieumsatz	52
3.13 Wachstumsgesetze	56
4 Controller-Komponenten	57
4.1 Versorgung am Netz oder über Stromrichter	59
4.2 Ventile: elektronische Leistungsschalter	58
4.3 Grundlagen der Halbleitertechnik	60
4.4 Schutz von Halbleiterschaltern	68
4.5 Signalelektronik	71
4.6 Ausfallraten	76
5 Elektrische Maschinen und Aktoren	83
5.1 Allgemeine Grundlagen	83
5.2 Erzeugung einer kontinuierlichen Drehbewegung	84
5.3 Bauformen	87
5.4 Schutzarten	87
5.5 Leistungsschild	87
5.6 Lager und Schmierung	91
5.7 Permanentmagnete in elektrischen Maschinen	91
5.7.1 Arbeitspunkt der Magnete	93
5.8 Maschinenschutz	95
5.9 Lüfter	95
5.10 Magnetlager	95
5.11 Wicklungen elektrischer Maschinen	95
5.11.1 Gleichstrom	97
5.11.2 Entstehung des Drehmoments	101
5.11.3 Drehfeldmaschinen	102

5.11.4	Wicklungen in der Maschine	104
5.12	Polwicklung – verteilte Wicklung	105
6	Antriebspraxis mit Stromwendermaschinen	107
6.1	Stromwendermaschinen	107
6.1.1	Gleichstrommaschinen – fremderregt.	107
6.1.1.1	Aufbau	110
6.1.1.2	Betriebsverhalten der fremderregten Gleichstrommaschine (fGM)	110
6.1.1.3	Besonderheiten	112
6.1.1.4	Kennlinien	114
6.1.1.5	Betrieb der Gleichstrommaschine an konstanter Spannung	114
6.1.1.6	Drehzahlvariabler Betrieb der PM- und fremderregten Gleichstrommaschine	114
6.2	Drive Controller – Stromquellen für Maschinen mit Stromwendern	117
6.2.1	Netzgeführte Stromrichter	117
6.2.1.1	Stromquellen	118
6.2.1.2	Schaltungen netzgeführter Stromrichter	123
6.2.1.3	Ausgangsspannung mit ungesteuerten Ventilen.	125
6.2.1.4	Steuerung der Ausgangsspannung mit steuerbaren Ventilen.	128
6.2.1.5	Steuerkennlinie	129
6.2.1.6	Kommutierung	130
6.2.1.7	Betriebskennlinien	134
6.2.1.8	Arbeitspunkt des Antriebs	135
6.2.1.9	Glättungsmittel	137
6.2.1.10	Netzurückwirkungen	147
6.2.1.11	Regelung des netzgeführten Stromrichters	150
6.2.1.12	Betrieb in den 4 Quadranten	157
6.2.1.13	4-Q-Diagramm	161
6.2.1.14	Umsteuervorgang	162
6.2.1.15	Umkehrstromrichter mit Kreisstrom und Brückenmodulation	163
6.2.1.16	Stromrichterbetrieb im Feldschwächbereich	163
6.2.2	Selbstgeführte Stromrichter – Gleichstromsteller (Chopper)	165
6.2.2.1	Tiefsetzsteller – IQ-Betrieb	165
6.2.2.2	1-Quadranten-Betrieb (Tiefsetzsteller)	168
6.2.2.3	4-Quadranten-Betrieb	168
6.2.2.4	Umsetzung der Bremsenergie	171
6.2.2.5	Regelung beim Steller	171
6.2.2.6	Netzurückwirkungen	172
6.2.2.7	Übersetzungsverhältnis beim Gleichstrom-Tiefsetzsteller	174
6.3	Universalmotor (AC und DC) – Reihenschlussmotor	174
6.3.1	Aufbau	174
6.3.2	Betriebsverhalten	175
6.3.3	Phasenanschnittsteuerung des Reihenschlussmotors	178
6.3.4	Pulsbetrieb des Reihenschlussmotors.	179
6.4	Kleinmaschinen	182
7	Antriebspraxis mit Drehfeldmaschinen	183
7.1	Übersicht.	183
7.1.1	Entwicklung der AC-Antriebe	184
7.1.1.1	AC-Bewegungsantriebe / Bearbeitungsantriebe	185
7.1.1.2	AC-Kompaktantriebe als dezentrale Antriebe.	186
7.1.1.3	AC-Positionierantriebe / Servoantriebe	187
7.1.1.4	Drehende und lineare AC-Direktantriebe	188
7.2	Drehfeldmaschinen.	188
7.2.1	Aufbau der Drehstrommaschinen in der Übersicht	188
7.2.2	Drehstrom-Asynchronmaschine	189
7.2.2.1	Aufbau	189
7.2.2.2	Allgemeiner Betrieb	190
7.2.2.3	50-Hz-Betrieb	192
7.2.2.4	Betrieb mit besonderen Läuferarten	196
7.2.2.5	Betrieb am 50-Hz-Drehstromnetz	199
7.2.2.6	Direktschalten (Direct on Line, DOL)	200
7.2.2.7	Konventionelle Anlaufverfahren (Hochlauf)	201
7.2.2.8	Bremsschaltungen	205

7.2.2.9	Drehzahlsteuerung von Asynchronmaschinen	207
7.2.2.10	Betrieb am 50-Hz-Wechselstromnetz	208
7.2.2.11	Betrieb mit variabler Speisefrequenz	213
7.2.2.12	Asynchron-Servomaschinen	215
7.2.2.13	Asynchron-Linearantrieb	215
7.2.3	Drehstrom-Synchronmaschine	216
7.2.3.1	Aufbau	216
7.2.3.2	Betrieb mit variabler Frequenz	222
7.2.3.3	Synchron-Linearantriebe	223
7.2.4	Bürstenlose Gleichstrommaschinen – Elektronisch kommutierte Maschine (EKM, AC-Servo)	223
7.2.4.1	Aufbau	223
7.2.4.2	Betrieb mit variabler Drehzahl	226
7.2.4.3	EK-Servomaschinen	226
7.2.4.4	EK-Linearantriebe	226
7.2.5	Reluktanzmaschine	226
7.2.5.1	Aufbau und Betrieb mit 50 Hz	226
7.2.5.2	Synchron-Reluktanzmaschine	226
7.2.6	Linear-Aktoren und Linear-Motoren	230
7.2.6.1	Piezo-Aktoren	231
7.2.6.2	Elastomer-Aktoren	231
7.2.6.3	Linearantrieb	232
7.2.7	Transversalflussmotor	233
7.2.8	Geschaltete Reluktanzmaschine (gRM)	234
7.2.8.1	Aufbau und Betrieb	234
7.2.8.2	Einsatz	235
7.2.9	Schrittmotoren – reiner Positionierantrieb	235
7.2.9.1	Aufbau	235
7.2.9.2	Positionierbetrieb	235
7.3	Umrichter mit U - und I -Zwischenkreis	237
7.3.1	Übersicht: Maschinen und Umrichter	237
7.3.2	Elektronische Drehspannungserzeugung	237
7.3.2.1	Umrichterarten	237
7.3.2.2	Aufbau der Zwischenkreisumrichter	239
7.3.3	Umrichter mit Spannungszwischenkreis (U -Umrichter)	241
7.3.3.1	Wechselspannungs-Wechselrichter (1-phasig)	241
7.3.3.2	Drehspannungserzeugung (Sinus)	242
7.3.3.3	Drehspannungen (Block)	242
7.3.3.4	Spannungsraumzeiger	246
7.3.3.5	Drehfeld	247
7.3.3.6	Realisierung der U/f -Kennlinie beim U -Umrichter	247
7.3.4	Umrichter mit Stromzwischenkreis (I -Umrichter)	250
7.3.4.1	Drehfelderzeugung beim I -Umrichter	250
7.3.4.2	Strompulslen	252
7.3.4.3	U/f -Kennlinie beim I -Umrichter	254
7.3.4.4	Vorteile der «Sinus»-Pulsung	255
7.3.5	Modulationsverfahren bei U -Umrichtern	255
7.3.5.1	Allgemeines Ziel	255
7.3.5.2	Anforderungen an die Ventilsteuerung	255
7.3.5.3	Blockbetrieb-Grundfrequenztaktung	256
7.3.5.4	Unterschwingungsverfahren (PWM, Sinus- Δ -Modulation)	257
7.3.5.5	Verwandte Modulationsverfahren (Voltage-Vector-Control, Überlagerungsverfahren)	260
7.3.5.6	Pulserzeugung in der Steuerung	261
7.3.5.7	Raum-Zeiger-Modulation (RZM, SZM)	263
7.3.5.8	Hysterese-Strom-Modulation (HSM, Pulslen mit Stromvorgabe, Toleranzbandregelung)	269
7.3.5.9	Steuerbausteine und Grenzen	269
7.3.6	Steuerteil und Software der Umrichter	269
7.3.6.1	Software	272
7.3.6.2	Schnittstellen, Parameter und Funktionen	273
7.3.6.3	Wichtige Parameter und ihre Auswirkungen	274
7.3.7	Drehzahl- und Drehmomentregelung (Verfahren)	281
7.3.7.1	Allgemeines	281
7.3.7.2	U/f -Kennliniensteuerung bzw. Frequenzregelung	282
7.3.7.3	Mehrmaschinenantriebe	282

7.3.7.4	Entwicklung der Drehmomentregelung	282
7.3.7.5	Feldorientierte Regelung (FOR, «Vektor»-Regelung)	283
7.3.7.6	Direkte Drehmomentregelung – Direct Torque Control (DTC)	289
7.3.7.7	FOR-Regelung beim <i>I</i> -Umrichter	295
7.3.7.8	Gegenüberstellung der Regelverfahren	296
7.4	Sonderfragen bei Umrichterantrieben	298
7.4.1	Erwärmung bei Umrichterbetrieb	298
7.4.2	Netzurückwirkungen	299
7.4.2.1	Allgemeiner Vergleich der Stromrichter	299
7.4.2.2	<i>U</i> -Umrichter	299
7.4.2.3	<i>I</i> -Umrichter	309
7.4.3	Bremsbetrieb	309
7.4.3.1	Allgemeines	309
7.4.3.2	<i>U</i> -Umrichter	310
7.4.3.3	<i>I</i> -Umrichter – nur Nutzbremsen	315
7.4.4	Pendelmomente	317
7.4.5	Geräusche	318
7.4.6	Vergleich <i>U</i> -Umrichter gegen <i>I</i> -Umrichter	321
7.5	Besonderer Betrieb von Umrichterantrieben	323
7.5.1	IE/IES-Effizienzklassen – Wirkungsgrade	323
7.5.1.1	Effizienzklassen von Motoren	323
7.5.1.2	Effizienzklassen von Controllern	323
7.5.1.3	Effizienzklassen von Antriebssystemen (Motorsysteme)	323
7.5.2	Antriebsüberwachung	325
7.5.2.1	Sonolyzer – einfache Leistungsmessung	325
7.5.2.2	Intelligente Zustandsüberwachung mit Sensor-Tag	326
7.5.3	Energieeinsparung	326
7.5.4	Netze	328
7.5.5	Asynchron-Servomaschinen	330
7.6	Umrichter und elektronisch kommutierte Maschine	330
7.6.1	Entwicklung und Einsatz	330
7.6.2	Arbeitsweise der EK-Maschine	331
7.6.2.1	Blockstrom	331
7.6.2.2	Arbeitsweise Sinus-Bestromung	333
7.6.2.3	Vergleich: Blockbetrieb und Sinus-Bestromung	337
7.6.3	Gebersysteme	337
7.6.4	Stromrichtereinheit und Regelung	338
7.7	Umrichter und «geschaltete Reluktanzmaschine» (gRM)	341
7.8	Umrichter und Linearantriebe	343
7.8.1	Piezo-Aktor	343
7.8.2	Elastomer-Aktoren	344
7.8.3	Tauchspulaktor (DC-Aktor)	345
7.8.4	Linear-Motoren	346
7.8.4.1	Motortypen	347
7.8.4.2	Software	349
7.8.5	Solenoid	349
7.8.6	Linearantriebe – Einsatz	350
7.9	Controller (Drehstromsteller) und Drehstrom-Asynchronmaschine	351
7.9.1	Arbeitsweise und Einsatzmöglichkeiten	351
7.9.2	Steller als Sanftanlaufgerät	352
7.9.3	Steller als Sanftauslaufgerät	354
7.9.4	Elektronische KUSA-Schaltung	354
7.9.5	Betrieb mit variabler Drehzahl	354
7.9.5.1	Gesteuerter Betrieb	354
7.9.6	Grenzen des Betriebs	357
7.9.7	Verluste bei Belastung	358
7.9.8	Argumente für den Einsatz	358
7.9.9	Energiesparfunktion	358
7.9.10	Drehstromsteller mit Unterschwingungen	359
7.10	Drehzahlstarter (Eaton)	359
7.10.1	Aufbau	359
7.10.2	Betrieb	359
7.10.3	Parameter	361
7.10.4	Auswahl	361

7.11	Stromrichterantriebe mit Schleifringläufern	361
7.11.1	Stromrichterkaskade	362
7.11.1.1	Untersynchroner Betrieb	362
7.11.1.2	Bemessung	362
7.11.1.3	Übersynchroner Betrieb	362
7.11.2	Doppeltgespeister Schleifringläufer	363
7.12	Controller und Schrittmotoren	364
7.12.1	Positionieren mit Schrittmotoren	364
7.12.2	Betrieb und Ansteuerung	365
7.12.2.1	Blockbestromung	365
7.12.2.2	Sinusbestromung	367
7.12.2.3	Kennlinien	371
7.12.2.4	Steuerung	372
7.13	Besondere AC-Antriebe	374
7.13.1	Getriebemotoren	374
7.13.2	Integral- und Kompaktantriebe	376
7.14	Stromrichter-AC-Direktantriebe	376
7.14.1	Maschine und Mechanik	376
7.14.2	Elektroniksteuerung	376
7.14.3	Direkte Linearantriebe	376
7.14.3.1	Aufbau	376
7.14.3.2	Typische Einsatzgebiete	377
7.14.4	Direkte Drehantriebe	378
7.14.4.1	Aufbau	378
7.14.4.2	Typische Einsatzgebiete	380
7.15	Antriebe im Vergleich	380
7.15.1	Bewegungsantriebe	380
7.15.2	Servoantriebe – Positionierantriebe	382
7.15.3	Dezentrale Antriebe (Module)	389
7.15.3.1	Dezentrale Intelligenz (Submodule)	389
7.15.3.2	Subsysteme	390
7.16	Motion Control und Mechatronik	390
7.16.1	Motion-Funktionen	390
8	Digitalisierung und Antriebsvernetzung, Industrie 4.0, dezentrale Module und Sicherheitsfunktionen	401
8.1	Digitalisierung und Industrie 4.0	401
8.1.1	Digitalisierung und Vernetzung	401
8.1.2	Bussystem-Nutzergruppen	407
8.1.3	Vorteile der Vernetzung	409
8.2	Dezentrale Installation	409
8.3	Sicherheitsfunktionen elektrischer Antriebe	409
8.4	Antriebsintegrierte Sicherheit	412
9	Auswahl und Bemessung festdrehzahl- und drehzahlvariabler Stromrichter-Antriebe	415
9.1	Allgemeine Hinweise	415
9.2	Netzdrosseln, Netztransformatoren und Filter	418
9.2.1	Drosseln	418
9.2.2	Netztransformatoren	419
9.2.3	Filter	419
9.3	Checklisten zur Festlegung der Antriebsdaten	419
9.3.1	Netzgeführter Stromrichter und Gleichstrommaschine	419
9.3.2	U-Umrichter und Drehstrom-Asynchronmaschine	419
9.3.3	Positionierantriebe – Motion Control	419
9.4	Maschinendaten	422
9.5	Fallbeispiele	422
9.5.1	Maschinen	422
9.5.2	Mechanik	425
9.5.3	Gleichstrom	428
9.5.4	Drehstrom	430
9.5.5	EK-Motor (Positionierantrieb)	436
9.5.6	Schrittmotor (Positionierantrieb)	438
9.6	Klemmkennzeichnung	441
9.7	Normen und Vorschriften	441
9.8	Auslegungsprogramme	441

- 10 Messungen an Antrieben 445
 - 10.1 Messungen allgemein 445
 - 10.1.1 Besonderheiten 445
 - 10.1.2 Aliasing-Effekt 446
 - 10.1.3 Geräteanzeige 446
 - 10.2 Elektrische Messungen am Antrieb 448
 - 10.2.1 Netzgeführte Stromrichter 448
 - 10.2.2 Umrichter und Drehstromsteller 448
 - 10.2.2.1 Vorbemerkung 448
 - 10.2.2.2 Messungen am Umrichter 449
 - 10.3 Mechanische Messungen am Antrieb 454
 - 10.3.1 Drehzahl und Drehmoment 454
 - 10.3.2 Lager 455
 - 10.3.2.1 Lagerschwingungen 455
 - 10.3.2.2 Lagerströme 457
 - 10.3.3 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) 461
 - 10.3.4 Erwärmungsmessungen 461
 - 10.3.4.1 Erwärmung 461
 - 10.3.4.2 Infrarot-Thermografie 461
 - 10.4 Simulation 461
- 11 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) 465
 - 11.1 Gesetz zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) 465
 - 11.2 Störungen 465
 - 11.3 Ursache und Ausbreitung der Störungen bei Frequenzumrichtern 466
 - 11.4 Störfestigkeit und Entstörung 467
 - 11.4.1 Leitungsgebundene Störungen 467
 - 11.4.2 Nicht leitungsgebundene Störungen 467
 - 11.5 Neubeschaffung 470
 - 11.6 Messungen 470
 - 11.7 Anschlusshinweise 471
- Anhang 475
- Formelzeichen (Auswahl) 479
- Abkürzungen und Begriffe (Auswahl) 481
- Literaturverzeichnis 483
- Stichwortverzeichnis 489