

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Historische Entwicklung der Elektromagnete	3
1.3	Definitionen	5
1.4	Grundaufbau von Elektromagneten und elektromagnetischen Antriebs- elementen	7
1.5	Entwurfsprozess für elektromagnetische Antriebe	8
2	Grundgesetze des magnetischen Feldes	9
2.1	Das stationäre Magnetfeld	9
2.1.1	Grundgesetze und Grundgrößen	9
2.1.2	Magnetische Feldstärke und Flussdichte in magnetisch inhomogenen Feldgebieten	13
2.1.3	Grundlagen zur Berechnung einfacher magnetischer Kreise	14
2.1.4	Integralparameter des magnetischen Feldes	17
2.2	Grundgesetze des quasistationären elektromagnetischen Feldes	21
2.2.1	Das Induktionsgesetz	21
2.2.2	Wirbelströme und Feldverdrängung	24
2.3	Das System der Maxwellschen Gleichungen	26
2.4	Eigenschaften magnetischer Werkstoffe	28
2.4.1	Einteilung magnetischer Werkstoffe	28
2.4.2	Die Gefügestruktur	30
2.4.3	Magnetische Anisotropien, Magnetostriktion	31
2.4.4	Die Magnetisierungskurve	32
2.4.5	Beeinflussung der Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe	35
2.4.6	Magnetisch halbhartes Werkstoffe	39
2.4.7	Eigenschaften hartmagnetischer Werkstoffe	40
2.4.8	Kunststoffgebundene Dauermagnete	43

Magnetkraft und Energie	47
3.1 Allgemeines	47
3.2 Der Gleichstrommagnet als stationärer Energiewandler	48
3.2.1 Stationäre Betriebszustände	48
3.2.2 Die elektrische Grundstruktur	48
3.2.3 Die magnetische Grundstruktur des neutralen Magnetkreises . .	50
3.2.4 Die magnetische Grundstruktur polarisierter Elektromagnete . .	53
3.2.5 Energetische Kennziffern zur Bewertung der stationären Energie- wandlung	56
3.2.6 Der Gesamtwirkungsgrad von Elektromagneten	59
3.3 Elektromagnete als dynamische Energiewandler	59
3.3.1 Die dynamische Energiewandlung	59
3.3.2 Der neutrale Elektromagnet	60
3.3.3 Energetische Kennziffern zur Bewertung der dynamischen Ener- gie wandlung	61
3.4 Magnetkraftberechnung	63
3.4.1 Kraftwirkung im magnetischen Feld	63
3.4.2 Berechnung der Magnetkraft aus dem Ψ -I-Kennlinienfeld	67
3.4.3 Energie- und Kraftberechnung mit magnetischen Netzwerken . .	69
3.4.4 Magnetkraft und Maxwellschen Spannungen	72
3.5 Magnetkraftkennlinien	73
3.5.1 Magnetkraft-Hub- und Magnetkraft-Strom-Kennlinien	73
3.5.2 Beeinflussung der Magnetkraft-Hub-Kennlinie	75
3.5.3 Charakteristische Anker-Ankergegenstück-Systeme	77
3.5.4 Untersuchungen an Topfmagneten mit Kennlinienbeeinflussung .	78
3.5.5 Analyse und Synthese der Kennlinienbeeinflussung	83
3.6 Wechselstrommagnete	87
Berechnung des magnetischen Feldes von Elektromagneten	95
4.1 Überblick über die Berechnungsverfahren	95
4.2 Magnetkreisberechnung mit Netzwerkmethoden	98
4.3 Magnetkreisberechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	103
4.3.1 Grundgleichungen	103
4.3.2 Datenvorbereitung	110
4.3.3 Datenauswertung	115
4.3.4 Adaptive FEM	119
4.4 Polarisierter Magnetkreise	122

5	Das dynamische Verhalten von Elektromagneten	125
5.1	Allgemeines	125
5.2	Das dynamische Verhalten von Gleichstrommagneten	127
5.2.1	Theoretische Grundlagen	127
5.2.2	Näherungsmethoden zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten	133
5.2.3	Numerische Berechnung des dynamischen Verhaltens	144
5.2.4	Einfluss der Wirbelströme auf das dynamische Verhalten	150
5.2.5	Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten in offener Steuerkette mittels elektronischer Schaltungen	160
5.2.6	Einteilung der elektro-magneto-mechanischen Antriebe bezüglich ihrer dynamischen Eigenschaften	168
5.2.7	Gleichstrommagnete als Stellelemente in Positionierantrieben	170
5.3	Dynamisches Verhalten von Wechselstrommagneten	182
5.3.1	Grundgleichungen	182
5.3.2	Berechnung der Schaltzeiten	183
5.3.3	Dynamisches Kennlinienfeld von Wechselstrommagneten	186
6	Erwärmung von Antrieben	189
6.1	Allgemeines	189
6.2	Grundlagen der Wärmeübertragung	190
6.2.1	Wärmeleitung	191
6.2.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	195
6.2.3	Wärmeabgabe durch Strahlung	196
6.3	Erwärmung von Gleichstrommagneten	199
6.3.1	Temperaturbegriffe	199
6.3.2	Spulenerwärmung unter idealen Bedingungen	199
6.3.3	Berechnung der Spulentemperatur bei Berücksichtigung der thermisch bedingten Leistungsänderung	201
6.3.4	Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Betriebsarten	203
6.3.5	Temperaturverteilung über dem Hauptschnitt eines Topfmagneten	208
6.4	Betriebszuverlässigkeit	211
7	Elektromagnetische Schrittmotoren	215
7.1	Das Wesen elektromagnetischer Schrittmotoren	215
7.2	Konstruktiver Aufbau und Wirkungsweise	220
7.2.1	Besonderheiten elektromagnetischer Schrittmotoren	220
7.2.2	Wechselpol-schrittmotoren	225
7.2.3	Hybridschrittmotoren	229
7.3	Dynamische Eigenschaften von Schrittmotoren	237
7.3.1	Bewegungsgleichungen	237
7.3.2	Schrittmotorcharakteristik	242
7.3.3	Elektronische Schrittteilung	243
7.4	Die Ansteuerung von Schrittmotoren	246
7.4.1	Aufgaben der Ansteuerung	246
7.4.2	Leistungsstellglieder für Schrittmotoren	247

7.4.3	Schrittmotoren in Regelkreisen	252
8	Entwurf elektromagnetischer Antriebe	257
8.1	Struktur des Entwurfsprozesses	257
8.2	Einteilungskriterien für magnetische Aktoren	261
8.3	Berechnung der Magnethauptabmessungen	263
8.4	Besonderheiten bei der konstruktiven Auslegung	266
8.4.1	Der Eisenkreis	267
8.4.2	Luftspalte im Magnetkreis	271
8.4.3	Allgemeine Gestaltungsrichtlinien	276
8.5	Aufbau und Technologie der Erregerspule	279
8.5.1	Allgemeines	279
8.5.2	Füllfaktoren	281
8.5.3	Die Berechnung der Spulendaten von Gleichstrommagneten	283
8.5.4	Spulenkörper und Kontaktierung	286
9	Spezielle Magnetkonstruktionen	293
9.1	Hubmagnete	295
9.2	Polarisierte Magnete	298
9.3	Ventilmagnete	300
9.3.1	Schaltventilmagnete	302
9.3.2	Proportionalmagnete	307
9.4	Drehmagnete	311
9.5	Haftmagnete	315
9.6	Elektromagnetisch schaltbare Bremsen und Kupplungen	317
9.7	Elektromagnetische Relais	321
10	Magnetische Mikroaktoren	323
10.1	Einführung	323
10.2	Ähnlichkeitsgesetze	324
10.3	Herstellungstechnologien magnetischer Mikroaktoren und Magnetwerkstoffe	328
10.3.1	Spulenminiaturisierung	329
10.3.2	Herstellung von miniaturisierten Spulen	331
10.3.3	Mikroplanarspulen auf Halbleitersubstraten	332
10.3.4	Keramik- und Folienspulen	335
10.3.5	Eisenkreis	340
10.3.6	Dauermagnetmaterialien	344
10.4	Mikrotechnische Funktionsgruppen	346

11 Magnetische Messtechnik	351
11.1 Messung magnetischer Eigenschaften und Qualitätssicherung elektromagnetischer Systeme	351
11.2 Statische Magnetisierung	352
11.3 Dynamische Magnetisierung	352
11.4 Probenformen	354
11.5 Feldsensoren	356
11.5.1 Feldmessspulen	356
11.5.2 Magnetischer Spannungsmesser	357
11.5.3 Hallsensoren	358
11.5.4 Magneto-resistive Schichten	358
11.6 Messung magnetischer Eigenschaften mit der Induktionsmethode	359
11.7 Erregerspulenmessung	360
11.8 Messung von Materialeigenschaften	363
11.8.1 Statische Materialkennlinien	364
11.8.2 Dynamische Materialkennlinien	365
11.9 Messung von Aktoren	368
11.9.1 Messung statischer Kennlinien	368
11.9.2 Berücksichtigung der Verluste	369
11.9.3 Messungen mit bewegtem Anker	373
Literaturverzeichnis	379
Formelzeichenverzeichnis	399
Anhang	403
Stichwortverzeichnis	420