

**Eberhard Kallenbach · Rüdiger Eick ·  
Tom Ströhla · Karsten Feindt ·  
Matthias Kallenbach · Oliver Radler**

# **Elektromagnete**

Grundlagen, Berechnung, Entwurf und  
Anwendung

**5. Auflage**

**Springer Vieweg**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines	1
1.2	Historische Entwicklung der Elektromagnete	3
1.3	Definitionen	9
1.4	Grundaufbau von Elektromagneten und elektromagnetischen Antriebs- elementen	10
1.5	Entwurfsprozess für elektromagnetische Antriebe	11
1.6	Quellen	12
<b>2</b>	<b>Grundgesetze des magnetischen Feldes</b>	<b>17</b>
2.1	Das stationäre Magnetfeld	17
2.1.1	Grundgesetze und Grundgrößen	17
2.1.2	Magnetische Feldstärke und Flussdichte in magnetisch inhomogenen Feldgebieten	21
2.1.3	Grundlagen zur Berechnung einfacher magnetischer Kreise . . . . .	22
2.1.4	Integralparameter des magnetischen Feldes	25
2.2	Grundgesetze des quasistationären elektromagnetischen Feldes	29
2.2.1	Das Induktionsgesetz	29
2.2.2	Wirbelströme und Feldverdrängung	32
2.3	Das System der Maxwell'schen Gleichungen	34
2.4	Eigenschaften magnetischer Werkstoffe	35
2.4.1	Einteilung magnetischer Werkstoffe	35
2.4.2	Die Gefügestruktur	37
2.4.3	Magnetische Anisotropien, Magnetostriktion	39
2.4.4	Die Magnetisierungskurve	40
2.4.5	Beeinflussung der Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe .	42
2.4.6	Magnetisch halbhartes Werkstoffe	48
2.4.7	Eigenschaften hartmagnetischer Werkstoffe	48
2.4.8	Kunststoffgebundene Dauermagnete	51
2.5	Quellen	53

<b>3</b>	<b>Magnetkraft und Energie</b>	<b>55</b>
3.1	Allgemeines	55
3.2	Der Gleichstrommagnet als stationärer Energiewandler	56
3.2.1	Stationäre Betriebszustände	56
3.2.2	Die elektrische Grundstruktur	56
3.2.3	Die magnetische Grundstruktur des neutralen Magnetkreises . .	58
3.2.4	Die magnetische Grundstruktur polarisierter Elektromagnete . .	61
3.2.5	Energetische Kennziffern zur Bewertung der stationären Energiewandlung	64
3.2.6	Der Gesamtwirkungsgrad von Elektromagneten	67
3.3	Elektromagnete als dynamische Energiewandler	67
3.3.1	Die dynamische EnergieWandlung	67
3.3.2	Der neutrale Elektromagnet	68
3.3.3	Energetische Kennziffern zur Bewertung der dynamischen Energiewandlung	69
3.4	Magnetkraftberechnung	71
3.4.1	Kraftwirkung im magnetischen Feld	71
3.4.2	Berechnung der Magnetkraft aus dem $\wedge$ -I-Kennlinienfeld . . . .	75
3.4.3	Energie- und Kraftberechnung mit magnetischen Netzwerken . .	77
3.4.4	Magnetkraft und Maxwellschen Spannungen	80
3.5	Magnetkraftkennlinien	81
3.5.1	Magnetkraft-Hub- und Magnetkraft-Strom-Kennlinien	81
3.5.2	Beeinflussung der Magnetkraft-Hub-Kennlinie	83
3.5.3	Charakteristische Anker-Ankergegenstück-Systeme	85
3.5.4	Untersuchungen an Topfmagneten mit Kennlinienbeeinflussung .	86
3.5.5	Analyse und Synthese der Kennlinienbeeinflussung	91
3.6	Wechselstrommagnete	95
3.7	Quellen	103
<b>4</b>	<b>Berechnung des magnetischen Feldes von Elektromagneten</b>	<b>105</b>
4.1	Überblick über die Berechnungsverfahren	105
4.2	Magnetkreisberechnung mit Netzwerkmethoden	108
4.3	Magnetkreisberechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode	113
4.3.1	Grundgleichungen	113
4.3.2	Datenvorbereitung	120
4.3.3	Datenauswertung	125
4.3.4	Adaptive FEM	129
4.4	Polarisierte Magnetkreise	132
4.5	Quellen	135

<b>5</b>	<b>Das dynamische Verhalten von Elektromagneten</b>	<b>139</b>
5.1	Allgemeines	139
5.2	Das dynamische Verhalten von Gleichstrommagneten	141
5.2.1	Theoretische Grundlagen	141
5.2.2	Näherungsmethoden zur Berechnung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten	147
5.2.3	Numerische Berechnung des dynamischen Verhaltens	158
5.2.4	Einfluss der Wirbelströme auf das dynamische Verhalten	164
5.2.5	Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten in offener Steuerkette mittels elektronischer Schaltungen	174
5.2.6	Einteilung der elektro-magneto-mechanischen Antriebe bezüglich ihrer dynamischen Eigenschaften	182
5.2.7	Gleichstrommagnete als Stellelemente in Positionierantrieben	184
5.3	Dynamisches Verhalten von Wechselstrommagneten	196
5.3.1	Grundgleichungen	196
5.3.2	Berechnung der Schaltzeiten	197
5.3.3	Dynamisches Kennlinienfeld von Wechselstrommagneten	200
5.4	Quellen	201
<b>6</b>	<b>Erwärmung von Antrieben</b>	<b>205</b>
6.1	Allgemeines	205
6.2	Grundlagen der Wärmetübertragung	206
6.2.1	Wärmeleitung	207
6.2.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	211
6.2.3	Wärmeabgabe durch Strahlung	212
6.3	Erwärmung von Gleichstrommagneten	215
6.3.1	Temperaturbegriffe	215
6.3.2	Spulenerwärmung unter idealen Bedingungen	215
6.3.3	Berechnung der Spulentemperatur bei Berücksichtigung der thermisch bedingten Leistungsänderung	217
6.3.4	Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Betriebsarten	219
6.3.5	Temperaturverteilung über dem Hauptschnitt eines Topfmagneten	224
6.4	Betriebszuverlässigkeit	227
6.5	Quellen	230
<b>7</b>	<b>Elektromagnetische Schrittmotoren</b>	<b>231</b>
7.1	Das Wesen elektromagnetischer Schrittmotoren	231
7.2	Konstruktiver Aufbau und Wirkungsweise	236
7.2.1	Besonderheiten elektromagnetischer Schrittmotoren	236
7.2.2	Reluktanzschrittmotoren	238
7.2.3	Wechselpol-schrittmotoren	241
7.2.4	Hybridschrittmotoren	245
7.3	Dynamische Eigenschaften von Schrittmotoren	252
7.3.1	Bewegungsgleichungen	252
7.3.2	Schrittmotorcharakteristik	258
7.3.3	Elektronische Schrittteilung	259

7.4	Die Ansteuerung von Schrittmotoren	262
7.4.1	Aufgaben der Ansteuerung	262
7.4.2	Leistungsstellglieder für Schrittmotoren	263
7.4.3	Schrittmotoren in Regelkreisen	268
7.5	Quellen	271
<b>8</b>	<b>Entwurf elektromagnetischer Antriebe</b>	<b>275</b>
8.1	Struktur des Entwurfsprozesses	275
8.2	Einteilungskriterien für magnetische Aktoren	279
8.3	Berechnung der Magnethauptabmessungen	281
8.4	Besonderheiten bei der konstruktiven Auslegung	284
8.4.1	Der Eisenkreis	285
8.4.2	Luftspalte im Magnetkreis	289
8.4.3	Allgemeine Gestaltungsrichtlinien	294
8.5	Aufbau und Technologie der Erregerspule	297
8.5.1	Allgemeines	297
8.5.2	Füllfaktoren	299
8.5.3	Die Berechnung der Spulendaten von Gleichstrommagneten . . .	301
8.5.4	Spulenkörper und Kontaktierung	304
8.6	Quellen	309
<b>9</b>	<b>Spezielle Magnetkonstruktionen</b>	<b>311</b>
9.1	Hubmagnete	313
9.2	Polarisierte Magnete	316
9.3	Ventilmagnete	318
9.3.1	Schaltventilmagnete	320
9.3.2	Proportionalmagnete	325
9.4	Drehmagnete	329
9.5	Haftmagnete	333
9.6	Elektromagnetisch schaltbare Bremsen und Kupplungen	335
9.7	Elektromagnetische Relais	339
9.8	Quellen	341
<b>10</b>	<b>Magnetische Mikroaktoren</b>	<b>343</b>
10.1	Einführung	343
10.2	Ähnlichkeitsgesetze	344
10.3	Herstellungstechnologien magnetischer Mikroaktoren und Magnetwerkstoffe	348
10.3.1	Spulenminiaturisierung	349
10.3.2	Herstellung von miniaturisierten Spulen	351
10.3.3	Mikroplanarspulen auf Halbleitersubstraten	352
10.3.4	Keramik- und Folienspulen	355
10.3.5	Eisenkreis	360
10.3.6	Dauermagnetmaterialien	364
10.4	Mikrotechnische Funktionsgruppen	366
10.5	Quellen	370

<b>11 Magnetische Messtechnik</b>	<b>373</b>
11.1 Messung magnetischer Eigenschaften und Qualitätssicherung elektromagnetischer Systeme	373
11.2 Statische Magnetisierung	374
11.3 Dynamische Magnetisierung	374
11.4 Probenformen	376
11.5 Feldsensoren	378
11.5.1 Feldmessspulen	378
11.5.2 Magnetischer Spannungsmesscr	379
11.5.3 Hallsensoren	380
11.5.4 Magneto-resistive Schichten	380
11.6 Messung magnetischer Eigenschaften mit der Induktionsmethode . . . .	381
11.7 Erregerspulenmessung	382
11.8 Messung von Materialeigenschaften	385
11.8.1 Statische Materialkennlinien	386
11.8.2 Dynamische Materialkennlinien	387
11.9 Messung von Aktoren	390
11.9.1 Messung statischer Kennlinien	390
11.9.2 Berücksichtigung der Verluste	391
11.9.3 Messungen mit bewegtem Anker	395
11.10 Quellen	398
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>403</b>
<b>Anhang</b>	<b>407</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>424</b>