

# Inhalt

## Vorwort — V

Hans-Dieter Stölting und Carsten Fräger

<b>1</b>	<b>Einleitung Elektrische Kleinantriebe — 1</b>
1.1	Allgemeines — 1
1.1.1	Wirtschaftliche Bedeutung der Kleinantriebe — 1
1.1.2	Kennzeichen kostengünstiger elektrischer Kleinantriebe — 1
1.1.3	Kennzeichen hochwertiger Kleinantriebe — 4
1.2	Das elektromagnetische Antriebssystem — 4
1.3	Die Antriebskomponenten — 6
1.3.1	Motoren — 6
1.3.2	Elektronische Schaltungen — 10

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

<b>2</b>	<b>Magnetkreis, Permanentmagnete, Kraft- und Drehmomenterzeugung — 19</b>
2.1	Magnetfeld in elektrischen Maschinen — 19
2.2	Zusammenhänge im Magnetfeld, Fluss und Flussverkettung — 20
2.3	Magnetischer Kreis — 20
2.3.1	Unverzweigter magnetischer Kreis — 21
2.3.2	Verzweigter magnetischer Kreis — 21
2.4	Ferromagnetische Materialien für Kleinmotoren — 23
2.5	Permanentmagnete — 23
2.5.1	Entwicklung der Magnetmaterialien und des maximalen Energieprodukts — 24
2.5.2	Magnetische Eigenschaften der Permanentmagnete — 25
2.5.3	Reale Magnetkreise mit Permanentmagneten — 35
2.5.4	Permanentmagnetwerkstoffe für Hysteresemotoren — 39
2.5.5	Aufmagnetisierung und Stabilisierung von Permanentmagneten — 40
2.6	Kraft- und Drehmomenterzeugung in elektrischen Maschinen — 41
2.6.1	Entstehung der Kräfte und Drehmomente — 41
2.6.2	Berechnung der Kräfte und Drehmomente — 46

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

<b>3</b>	<b>Kommutatormotoren – Allgemeines und Kommutatorsystem — 52</b>
3.1	Übersicht — 52
3.2	Kontaktsystem — 55
3.2.1	Bestandteile des Kontaktsystems — 55
3.2.2	Aufbau der Kommutatoren — 56

3.3	Ankerstromkommutierung — <b>58</b>
3.3.1	Kommutierungsvorgang allgemein — <b>58</b>
3.3.2	Qualitative Beschreibung des Kommutierungsvorgangs — <b>61</b>
3.3.3	Zusammensetzung und Eigenschaften des Bürstenkörpers — <b>67</b>
3.4	Funkentstörung bei Kommutatormotoren — <b>70</b>
3.5	Geräuschverhalten — <b>71</b>

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

<b>4</b>	<b>Dauermagneterregte Gleichstrom-Kommutatormotoren — 72</b>
4.1	Konstruktiver Aufbau — <b>72</b>
4.1.1	Ständer — <b>72</b>
4.1.2	Läufer — <b>73</b>
4.1.3	Kommutierungssystem — <b>74</b>
4.1.4	Lager — <b>75</b>
4.1.5	Motoren mit eisenlosem Läufer — <b>76</b>
4.2	Stationäres Betriebsverhalten — <b>78</b>
4.2.1	Betriebskennlinien — <b>78</b>
4.2.2	Wirkungsgrad — <b>81</b>
4.2.3	Betriebsweise — <b>83</b>
4.3	Dynamisches Betriebsverhalten — <b>84</b>

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

<b>5</b>	<b>Kommutatorreihenschlussmotoren, Universalmotoren — 89</b>
5.1	Bezeichnung — <b>89</b>
5.2	Charakteristische Merkmale — <b>91</b>
5.3	Prinzipielles Betriebsverhalten — <b>94</b>
5.3.1	Beschreibung der vereinfachten Anordnung — <b>94</b>
5.3.2	Gleichstrombetrieb — <b>95</b>
5.3.3	Wechselstrombetrieb — <b>96</b>
5.4	Auslegung der Ständerwicklung für den Betrieb als Universalmotor — <b>99</b>
5.5	Drehzahlstellung — <b>100</b>
5.5.1	Anforderungen an die Drehzahl — <b>100</b>
5.5.2	Spannungsstellung mit Transformator — <b>100</b>
5.5.3	Ohmsche Widerstände zur Drehzahlstellung — <b>101</b>
5.5.4	Wicklungsanzapfung — <b>102</b>
5.5.5	Drehzahlstellung durch elektronische Stellglieder — <b>102</b>
5.5.6	Stillsetzen des Motors — <b>104</b>
5.5.7	Drehrichtungsumkehr — <b>105</b>

**Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting**

<b>6</b>	<b>Asynchronmotoren, Induktionsmotoren — 106</b>
6.1	Eigenschaften — 106
6.2	Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele — 107
6.3	Ausführungsarten — 109
6.3.1	Aufbau — 109
6.3.2	Blechschnitt — 111
6.3.3	Rotor — 112
6.4	Schaltungs- und Ausführungsarten der Ständerwicklung — 114
6.4.1	Dreisträngige Motoren für Dreiphasen-Anschluss — 114
6.4.2	Dreisträngige Motoren für Einphasen-Anschluss mit Kondensator — 115
6.4.3	Zweisträngige Motoren für Einphasen-Anschluss mit Kondensatorhilfsstrang — 117
6.5	Wirkungsweise — 121
6.5.1	Asynchron-Drehstrommotoren — 121
6.5.2	Asynchron-Wechselstrommotoren mit Kondensator-Hilfsstrang — 126
6.5.3	Asynchron-Wechselstrommotoren mit Widerstandshilfsstrang — 135
6.5.4	Feldüberwellen — 137
6.6	Reversierbetrieb — 138
6.6.1	Vertauschen von Haupt- und Hilfsstrang — 138
6.6.2	Umkehr der Stromrichtung in einem Strang — 139
6.7	Drehzahlstellen bei Asynchronmotoren — 139
6.7.1	Polumschaltung — 139
6.7.2	Änderung des Schlupfs bzw. der Rotorfrequenz — 141
6.7.3	Frequenzänderung — 143
6.8	Spannungsumschaltung — 145
6.9	Spaltpolmotor — 146
6.9.1	Einsatzgebiete — 146
6.9.2	Wirkungsprinzip — 147
6.9.3	Ausführungsarten — 148
6.9.4	Betriebskennlinien — 149
6.9.5	Änderung der Drehrichtung — 149
6.9.6	Änderung der Drehzahl — 150

**Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting**

<b>7</b>	<b>Synchronmotoren und -generatoren — 151</b>
7.1	Eigenschaften — 151
7.1.1	Drehzahlverhalten — 151
7.1.2	Lastwinkel — 152
7.2	Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele — 153
7.3	Ausführungsarten — 154

7.3.1	Synchronmotoren mit Magnetläufern — 158
7.3.2	Hysteresemotor — 165
7.3.3	Reluktanzmotor — 167
7.3.4	Permanentmagneterregte Motoren mit anisotropem Läufer — 170
7.3.5	Synchron-Klauenpolgenerator mit elektrischer Erregung — 172
7.4	Betriebsverhalten Synchronmotor mit Kondensatorhilfsstrang — 176
7.4.1	Symmetrischer Betrieb dreisträngiger Motor mit Kondensatorhilfsstrang — 176
7.4.2	Symmetrischer Betrieb zweisträngiger Motor mit Kondensatorhilfsstrang — 177
7.4.3	Komplexe Spannungsgleichungen einsträngiger Betrieb — 178
7.4.4	Komplexe Spannungsgleichungen mit Kondensatorhilfsstrang, symmetrische Wicklung — 179
7.4.5	Komplexe Spannungsgleichungen mit Kondensatorhilfsstrang, quasisymmetrische Wicklung — 183
7.5	Anlauf von Permanentmagnet-Synchronmotoren ohne Anlaufkäfig — 184
7.6	Reversierbetrieb — 186
7.7	Drehzahlstellen, Drehzahlregelung bei der Synchronmaschine — 187

Wolfgang Amrhein

8	<b>Bürstenlose Permanentmagnetmotoren mit Block- und Sinuskommutierung — 188</b>
8.1	Einleitung — 188
8.1.1	Definitionen — 188
8.1.2	Verwandtschaften zu anderen Motorarten — 189
8.2	Konstruktive Besonderheiten und resultierende Applikationen — 192
8.2.1	Ausführung und Auswahl der Statorwicklung — 195
8.2.2	Ausführung und Auswahl der Permanentmagnetbauformen — 202
8.2.3	Ausführung und Auswahl der Motorbauform — 207
8.3	Mathematische Modellierung des permanentmagneterregten Synchronmotors — 213
8.3.1	Einfaches Maschinenmodell — 213
8.3.2	Zweisträngiges Ersatzmodell für die feldorientierte Steuerung — 216
8.3.3	Feldschwächbetrieb — 221
8.3.4	Aus der Spannungsgleichung gewonnene Übertragungsfunktion — 222
8.3.5	Beispiel für eine feldorientierte Regelung — 225
8.3.6	Flussbasiertes Maschinenmodell — 226
8.4	Elektronische Unterdrückung von Drehmomentschwankungen — 228
8.4.1	Motor mit Mittelpunktanschluss der Wicklung — 229
8.4.2	Motor ohne Mittelpunktanschluss der Wicklung — 230

8.4.3	Praktische Ausführung einer Korrekturstromspeisung — 231
8.5	Entmagnetisierung der Permanentmagnete — 233
8.6	Motorkennlinien — 236

Wolfgang Amrhein und Johannes Schmid

9	Geschaltete Reluktanzmotoren — 238
9.1	Grundlagen — 239
9.1.1	Energiewandlung und Drehmomentbildung — 241
9.1.2	Radialkraftbildung — 244
9.2	Mathematisches Modell — 245
9.3	Typische Kennfelder — 247
9.4	Leistungselektronik und Ansteuerung — 249
9.4.1	Schaltzustände der Leistungselektronik — 250
9.5	Motorischer und generatorischer Betrieb — 253
9.6	Stromformung — 254

Marcus Herrmann und Thomas Roschke

10	Elektromagnetische Schrittantriebe — 256
10.1	Überblick — 256
10.2	Bauformen von Schrittmotoren — 257
10.3	Betriebsverhalten des Schrittmotors — 263
10.3.1	Der Schrittmotor als Teil eines Antriebssystems — 263
10.3.2	Schrittwinkel und Rotorausrichtung — 265
10.3.3	Drehzahl — 268
10.3.4	Drehmoment — 269
10.3.5	Reibung und Positioniergenauigkeit — 273
10.3.6	Schritt-Zeit-Verlauf — 274
10.3.7	Betriebsbereiche und Grenzkennlinien — 277
10.3.8	Ersatzmodell des Schrittmotors — 280
10.4	Ansteuerung von Schrittmotoren — 282
10.4.1	Ansteuerregime (Softwareeinfluss) — 282
10.4.2	Elektrische Beschaltung von Schrittmotoren (Hardwareeinfluss) — 289
10.5	Dynamik und Bewegungsabläufe — 297
10.5.1	Dynamik von Schrittmotor und Antriebssystem — 297
10.5.2	Typische Bewegungsabläufe — 298
10.5.3	Referenzpunktbestimmung und Anschlagerkennung — 300
10.5.4	Resonanzfrequenzen — 302
10.6	Auswahlkriterien und Spezifikation für die Anwendung — 305

Axel Mertens

11	Leistungselektronik und Regler für Kleinantriebe — 306
11.1	Einleitung — 306

11.2	Elektronische Stellelemente — 306
11.2.1	Analoge Stellelemente — 307
11.2.2	Grundprinzip schaltender Stellelemente — 308
11.2.3	Leistungselektronische Bauelemente — 309
11.2.4	Gleichstromsteller — 317
11.2.5	Wechselrichter — 322
11.2.6	Dreiphasiger Wechselrichter — 323
11.2.7	Diodengleichrichter — 328
11.2.8	Gesteuerte Gleichrichter — 330
11.2.9	Wechselstromsteller — 333
11.3	Regler — 335
11.3.1	Regelung der Gleichstrommaschine — 336
11.3.2	Regelung eines Permanentmagnet-Synchronmotors — 347
11.3.3	Regelung eines Asynchronmotors/Induktionsmotors — 353

Thomas Bertolini und Thomas Fuchs

<b>12</b>	<b>Schwingungen und Geräusche — 358</b>
12.1	Einführung — 358
12.1.1	Relevanz der Geräuschentwicklung elektrischer Antriebe — 358
12.1.2	Grundsätzliches zur Geräuschentstehung in elektromechanischen Systemen — 358
12.2	Geräuschentwicklung bei elektrischen Kleinantrieben — 359
12.2.1	Mechanisch verursachte Wechselkräfte — 359
12.2.2	Elektromotorisch verursachte Wechselkräfte — 362
12.3	Messung, Analyse und Prüfung von Geräuschen und Schwingungen — 363
12.3.1	Messmittel nach aktuellem Stand der Technik — 363
12.3.2	Vorgehensweise zur Analyse und Prüfung von Geräuschen — 365
12.4	Hören und Hörempfinden — 372
12.4.1	Bewertungskurven — 373
12.4.2	Psychoakustische Größen — 374

Andreas Wagener

<b>13</b>	<b>Elektromagnetische Verträglichkeit bei elektrischen Kleinantrieben — 376</b>
13.1	Einführung in die EMV — 376
13.2	Rechtlicher Rahmen — 377
13.2.1	Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) — 378
13.2.2	Niederspannungsrichtlinie — 378
13.2.3	EMV-Richtlinie — 378
13.3	Elektromagnetische Kopplungen bei elektrischen Kleinantrieben — 380
13.3.1	Leitungsgebundene Störungen — 381

13.3.2	Kapazitive Kopplungen — 381
13.3.3	Induktive Kopplungen — 383
13.3.4	Galvanische Kopplung — 383
13.4	Funkausbreitung — 385
13.5	Typische Beobachtungen bei elektrischen Antrieben — 385
13.5.1	Störungen durch Schaltvorgänge und Funkenbildung — 385
13.5.2	Überspannung am Gerät durch elektrostatische Aufladung — 387
13.5.3	Überspannung durch unbeabsichtigte Schaltvorgänge — 388
13.6	EMV-Effekte im Überblick — 388
13.6.1	Störfestigkeit — 389
13.6.2	Störaussendung — 390
13.7	Messverfahren zur Bewertung der EMV — 391
13.8	Funktionserdung als Basis — 393
13.8.1	Schutzerdung — 394
13.8.2	Funktionserdung — 394
13.9	Räumliche Anordnung von Leitungen — 395
13.10	Entstörung durch Filter und Schirmung — 396
13.10.1	Kapazitive Filter — 397
13.10.2	Kombinierte Filter — 398
13.10.3	Schirmung und Gehäuse — 399
13.11	Entstörung eines DC-Motors — 400
13.11.1	Störverhalten bei unterschiedlicher Leitungslänge — 400
13.11.2	Entstörung des Motors über ein Vorschaltfilter — 405
13.12	Schutzmaßnahmen für elektronische Schaltungen — 405
13.12.1	Überspannungseffekte – Auswirkungen und Abhilfe — 405
13.12.2	LatchUp-Effekt — 408
13.12.3	Abhilfemaßnahmen — 409
13.12.4	Robuste Signalkodierung am Beispiel von Quadratursignalen — 411
 <b>Formelzeichen und Formelschreibweise — 415</b>	
 <b>Tabellenverzeichnis — 419</b>	
 <b>Abbildungsverzeichnis — 421</b>	
 <b>Die Autoren — 437</b>	
 <b>Literatur — 441</b>	
 <b>Stichwortverzeichnis — 457</b>	