

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | Einleitung | 13 |
| 1.1 | Allgemeines | 13 |
| 1.2 | Das elektromagnetische Antriebssystem | 14 |
| 1.3 | Die Antriebskomponenten | 15 |
| 1.3.1 | Motoren | 15 |
| 1.3.1.1 | Motorsystematik | 15 |
| 1.3.1.2 | Grundsätzliche Konstruktionsmöglichkeiten | 15 |
| 1.3.2 | Elektronische Schaltungen | 19 |
| 1.3.2.1 | Schaltungen für selbstgeführte Motoren | 19 |
| 1.3.2.2 | Schaltungen für fremdgeführte Motoren | 21 |
| 1.4 | Dauermagnete im elektromagnetischen Kreis | 21 |
| 1.4.1 | Steigerung des maximalen Energieprodukts | 21 |
| 1.4.2 | Magnetische Eigenschaften der Dauermagnete | 23 |
| 1.4.2.1 | Charakteristische Daten | 23 |
| 1.4.2.2 | Hysteresekurven der Dauermagnete | 23 |
| 1.4.2.3 | Lage der Arbeitspunkte auf der Hysteresekurve | 25 |
| 1.4.2.4 | Verschiebung der Arbeitspunkte im dynamischen Betrieb | 26 |
| 1.4.2.5 | Veränderung der magnetischen Eigenschaften bei Temperaturschwankungen | 27 |
| 1.4.3 | Reale Dauermagnetkreise | 28 |
| 1.4.4 | Dauermagnetwerkstoffe für HystereseMotoren | 31 |
| 1.4.5 | Aufmagnetisierung und Stabilisierung | 31 |
| 2 | Antriebe mit kontinuierlicher Bewegung | 33 |
| 2.1 | Kommutatormotoren | 33 |
| 2.1.1 | Übersicht | 33 |
| 2.1.2 | Dauermagneterregte Motoren | 34 |
| 2.1.2.1 | Aufbau | 34 |
| 2.1.2.2 | Stationäres Betriebsverhalten | 39 |
| 2.1.2.3 | Dynamisches Betriebsverhalten | 43 |
| 2.1.3 | Kommutatorreihenschlussmotor (Universalmotor) | 46 |
| 2.1.3.1 | Bezeichnung | 46 |
| 2.1.3.2 | Charakteristische Merkmale | 47 |
| 2.1.3.3 | Prinzipielles Betriebsverhalten | 49 |
| 2.1.3.4 | Auslegung der Ständerwicklung für den Betrieb als Universalmotor | 53 |
| 2.1.3.5 | Drehzahlstellung | 54 |
| 2.1.4 | Kontaktsystem und Kommutierung | 58 |
| 2.1.4.1 | Bestandteile des Kontaktsystems | 58 |
| 2.1.4.2 | Aufbau der Kommutatoren | 59 |
| 2.1.4.3 | Zusammensetzung und Eigenschaften des Bürstenkörpers | 60 |
| 2.1.4.4 | Kommutierungsvorgang allgemein | 62 |
| 2.1.4.5 | Elektrische Einflussgrößen | 64 |
| 2.1.4.6 | Qualitative Beschreibung des Kommutierungsvorgangs | 64 |
| 2.1.4.7 | Unterschied Gleich- und Wechselspannungsbetrieb | 68 |
| 2.1.5 | Das Geräuschverhalten | 68 |
| 2.1.6 | Funkentstörung | 70 |
| 2.2 | Bürstenlose Permanentmagnetmotoren | 71 |
| 2.2.1 | Einleitung | 71 |
| 2.2.1.1 | Definitionen | 71 |

| | | | |
|----------|---------|---|------------|
| | 2.2.1.2 | Verwandtschaften zu anderen Motorarten | 72 |
| 2.2.2 | | Konstruktive Besonderheiten | 74 |
| | 2.2.2.1 | Ausführung und Auswahl der Ankerwicklung | 75 |
| | 2.2.2.2 | Ausführung und Auswahl der Permanentmagnetformen | 81 |
| | 2.2.2.3 | Ausführung und Auswahl der Motorbauform | 85 |
| 2.2.3 | | Dynamisches Modell des Permanentmagnetmotors | 89 |
| | 2.2.3.1 | Motormodell | 90 |
| | 2.2.3.2 | Zweisträngiges Ersatzmodell für die feldorientierte Steuerung | 91 |
| 2.2.4 | | Elektronische Unterdrückung von Drehmomentschwankungen | 94 |
| | 2.2.4.1 | Motor mit Mittelpunktanschluss der Wicklung | 95 |
| | 2.2.4.2 | Motor ohne Mittelpunktanschluss der Wicklung | 95 |
| | 2.2.4.3 | Praktische Ausführung einer Korrekturstromspeisung | 96 |
| 2.2.5 | | Motorkennlinien | 97 |
| 2.2.6 | | Sensorik | 98 |
| | 2.2.6.1 | Resolver | 98 |
| | 2.2.6.2 | Inkrementale optische Encoder | 99 |
| | 2.2.6.3 | Magnetische Sensoren | 100 |
| 2.2.7 | | Sonderbauformen bürstenloser Permanentmagnetmotoren | 101 |
| | 2.2.7.1 | Einsträngiger Motor mit elliptischer Spule | 102 |
| | 2.2.7.2 | Direktantriebe für niedrige Drehzahlen | 102 |
| 2.3 | | Der geschaltete Reluktanzmotor | 105 |
| | 2.3.1 | Grundlagen | 105 |
| | 2.3.1.1 | Energiewandlung und Drehmomentbildung | 106 |
| | 2.3.1.2 | Radialkraftbildung | 108 |
| | 2.3.2 | Mathematisches Modell | 108 |
| | 2.3.3 | Leistungselektronik und Ansteuerung | 110 |
| | 2.3.3.1 | Schaltzustände der Leistungselektronik | 110 |
| | 2.3.4 | Motorischer und generatorischer Betrieb | 112 |
| | 2.3.5 | Stromformung | 112 |
| | 2.3.6 | Typische Kennfelder | 114 |
| 2.4 | | Drehfeldmotoren | 116 |
| | 2.4.1 | Asynchronmotoren | 116 |
| | 2.4.1.1 | Eigenschaften und Einsatzgebiete | 116 |
| | 2.4.1.2 | Ausführungsarten | 116 |
| | 2.4.1.3 | Schaltungs- und Ausführungsarten der Ständerwicklung | 118 |
| | 2.4.1.4 | Wirkungsweise | 120 |
| | 2.4.1.5 | Betriebsverhalten | 122 |
| | 2.4.1.6 | Steuerungsverfahren | 124 |
| | 2.4.1.7 | Spaltpolmotor | 127 |
| | 2.4.2 | Synchronmotoren | 130 |
| | 2.4.2.1 | Eigenschaften und Einsatzgebiete | 130 |
| | 2.4.2.2 | Ausführungsarten | 130 |
| | 2.4.2.3 | Synchronmotoren mit Magnetläufern | 132 |
| | 2.4.2.4 | Hysteresemotor | 133 |
| | 2.4.2.5 | Reluktanzmotor | 134 |
| | 2.4.2.6 | Permanenterregte Motoren mit anisotropem Läufer | 136 |
| 3 | | Elektromagnetische Schrittantriebe | 139 |
| 3.1 | | Übersicht | 139 |
| 3.2 | | Schrittmotorarten | 141 |
| | 3.2.1 | Klauenpolschrittmotoren | 141 |
| | 3.2.2 | Scheibenläuferschrittmotoren | 142 |
| | 3.2.3 | Reluktanzschrittmotoren | 143 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2.4 | Hybridschrittmotoren | 143 |
| 3.3 | Ansteuerung von Schrittmotoren | 145 |
| 3.4 | Betriebsverhalten von Schrittantrieben | 150 |
| 3.4.1 | Schrittwinkel | 150 |
| 3.4.2 | Drehmoment | 152 |
| 3.4.3 | Positioniergenauigkeit | 153 |
| 3.4.4 | Schritt-Zeit-Verlauf | 153 |
| 3.4.5 | Betriebskennlinien | 154 |
| 3.4.6 | Resonanzfrequenzen | 156 |
| 3.4.7 | Besonderheiten des Mikroschrittbetriebes | 156 |
| 3.4.8 | Referenzpunktbestimmung | 157 |
| 3.5 | Bewegungsabläufe | 158 |
| 3.5.1 | Klassifizierte Bewegungsabläufe | 158 |
| 3.5.2 | Spezielle Betrachtung des dynamischen Betriebes | 160 |
| 4 | Antriebe mit begrenzter Bewegung | 167 |
| 4.1 | Elektromagnete | 167 |
| 4.1.1 | Elektromagnete als Antriebsselemente | 167 |
| 4.1.2 | Gleichstrommagnete | 168 |
| 4.1.2.1 | Besonderheiten | 168 |
| 4.1.2.2 | Stationäres Verhalten von Gleichstrommagneten | 169 |
| 4.1.2.3 | Dynamisches Verhalten von Gleichstrommagneten | 173 |
| 4.1.2.4 | Einfluss der Wirbelströme auf das dynamische Verhalten von Gleichstrommagneten | 177 |
| 4.1.2.5 | Maßnahmen zur Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten | 178 |
| 4.1.3 | Wechselstrommagnete | 183 |
| 4.1.3.1 | Allgemeines | 183 |
| 4.1.3.2 | Berechnung der Magnetkraft von Einphasenwechselstrommagneten | 183 |
| 4.1.3.3 | Zeitabhängigkeit der Magnetkraft von Einphasenwechselstrommagneten | 184 |
| 4.1.3.4 | Magnetkraft des Dreiphasenwechselstrommagneten | 186 |
| 4.1.3.5 | Dynamisches Verhalten von Wechselstrommagneten | 187 |
| 4.1.4 | Polarisierte Elektromagnete | 188 |
| 4.1.4.1 | Besonderheiten | 188 |
| 4.1.4.2 | Magnetkraft polarisierter Elektromagnete mit einem Reihenkreis | 189 |
| 4.1.4.3 | Anwendung von polarisierten Elektromagneten | 191 |
| 4.1.5 | Projektierung von Elektromagneten und Magnetantrieben | 192 |
| 4.1.6 | Entwurf von Magnetantrieben | 192 |
| 4.1.6.1 | Magnetantriebe als mechatronische Systeme | 192 |
| 4.1.6.2 | Berechnungsverfahren für Magnetantriebe | 193 |
| 4.1.6.3 | Netzwerkmethode für Magnetantriebe | 193 |
| 4.2 | Elektrodynamische Linear- und Mehrkoordinatenantriebe | 200 |
| 4.2.1 | Wirkprinzip und Grundstruktur | 201 |
| 4.2.2 | Bauformen elektrodynamischer Linearmotoren | 204 |
| 4.2.2.1 | Bauformen mit bewegten Spulen | 204 |
| 4.2.2.2 | Bauformen mit bewegten Magneten | 211 |
| 4.2.2.3 | Bauformen mit bewegten Dauermagnetkreisen | 213 |
| 4.2.3 | Bauformen integrierter elektrodynamischer Mehrkoordinatenantriebe mit Einmassenläufern für xy -, $x\varphi$ -, $xy\varphi$ -, $xy\varphi z$ -Bewegungen | 215 |
| 4.2.3.1 | Elektrodynamische Mehrkoordinatenmotoren mit Flachspulen | 215 |
| 4.2.3.2 | Elektrodynamische Mehrkoordinatenmotoren mit Kastenspulen | 222 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2.3.3 | Elektrodynamische Mehrkoordinatenmotoren mit Zylinderspulen und gekrümmten Flachspulen für eine $x\varphi$ -Bewegung | 226 |
| 4.2.4 | Betriebsverhalten elektrodynamischer Linear- und Mehrkoordinatenmotoren | 228 |
| 4.2.4.1 | Statischer und quasistatischer Betrieb permanenterregter Motoren | 228 |
| 4.2.4.2 | Dynamischer Betrieb | 229 |
| 4.2.5 | Ansteuerung elektrodynamischer Linear- und Mehrkoordinatenmotoren | 230 |
| 4.2.5.1 | Ansteuerung elektrodynamischer Linearmotoren | 231 |
| 4.2.5.2 | Ansteuerung elektrodynamischer Mehrkoordinatenmotoren | 233 |
| 4.2.6 | Linear- und Mehrkoordinatenantriebe nach dem Asynchronmotorprinzip | 237 |
| 4.2.7 | Kommerziell angebotene Systeme | 240 |
| 4.3 | Lineare und planare Hybridschrittantriebe | 241 |
| 4.3.1 | Lineare Hybridschrittmotoren | 241 |
| 4.3.2 | Mehrkoordinatenhybridschrittmotoren | 244 |
| 4.3.3 | Dynamische Eigenschaften von linearen Hybridschrittmotoren | 245 |
| 4.3.4 | Prinzip der elektronischen Schrittteilung | 248 |
| 4.3.5 | Lineare Hybridschrittmotoren als magnetisch nichtlineare Antriebs Elemente | 249 |
| 5 | Piezoelektrische Antriebe | 251 |
| 5.1 | Physikalischer Effekt | 251 |
| 5.2 | Piezoelektrische Bauelemente | 252 |
| 5.2.1 | Piezoelektrische Werkstoffe | 252 |
| 5.2.2 | Piezokeramische Elemente | 253 |
| 5.3 | Piezoantriebe mit begrenzter Auslenkung | 254 |
| 5.3.1 | Stapeltranslatoren | 255 |
| 5.3.2 | Streifentranslatoren | 257 |
| 5.3.3 | Biegeelemente | 257 |
| 5.3.4 | Tubusse | 258 |
| 5.3.5 | Piezowandler mit Wegübersetzung | 258 |
| 5.4 | Piezoantriebe mit unbegrenzter Auslenkung | 260 |
| 5.4.1 | Wurm- und Schreit antriebe | 260 |
| 5.4.2 | Trägheitsantriebe | 262 |
| 5.4.3 | Piezo Actuator Drive (PAD) | 263 |
| 5.4.4 | Ultraschallmotoren | 264 |
| 5.4.4.1 | Stehwellen-Ultraschallmotoren | 264 |
| 5.4.4.2 | Wanderwellen-Ultraschallmotoren | 267 |
| 5.4.5 | Einige Auswahl- und Entwurfskriterien | 268 |
| 5.5 | Steuerelektronik für Piezoantriebe | 270 |
| 5.5.1 | Leistungsverstärker | 270 |
| 5.5.2 | Linearisierung des Aktor-Übertragungsverhaltens | 272 |
| 5.6 | Realisierungsbeispiele | 272 |
| 5.6.1 | Positioniertisch mit Piezoantrieb | 273 |
| 5.6.2 | Klemmelemente für Wurmmotoren | 274 |
| 6 | Stellglieder und Regler für Kleinantriebe | 277 |
| 6.1 | Einleitung | 277 |
| 6.2 | Elektronische Stellelemente | 277 |
| 6.2.1 | Analoge Stellelemente | 277 |
| 6.2.2 | Grundprinzip schaltender Stellelemente | 278 |
| 6.2.3 | Leistungselektronische Bauelemente | 279 |
| 6.2.4 | Gleichstromsteller | 284 |
| 6.2.5 | Wechselrichter | 286 |
| 6.2.6 | Dreiphasiger Wechselrichter | 287 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.2.7 | Diodengleichrichter | 291 |
| 6.2.8 | Gesteuerte Gleichrichter | 293 |
| 6.2.9 | Wechselstromsteller | 295 |
| 6.3 | Regler | 297 |
| 6.3.1 | Regelung eines Gleichstrommotors | 297 |
| 6.3.2 | Regelung eines Permanentmagnet-Synchronmotors | 305 |
| 6.3.3 | Regelung eines Asynchronmotors | 309 |
| 7 | Magnetlagertechnik | 315 |
| 7.1 | Einleitung | 315 |
| 7.2 | Passive Magnetlager | 316 |
| 7.2.1 | Permanentmagnetlager | 317 |
| 7.3 | Aktive Magnetlagersysteme | 322 |
| 7.3.1 | Elektromagnetlager | 322 |
| 7.3.1.1 | Magnetlager mit Gleichstromvormagnetisierung | 322 |
| 7.3.1.2 | Magnetlager mit permanentmagnetischer Vormagnetisierung | 326 |
| 7.3.2 | Lagerlose Motoren | 327 |
| 7.3.2.1 | Lagerlose Permanentmagnetmotoren | 327 |
| 7.3.2.2 | Lagerlose Asynchronmotoren | 331 |
| 8 | Mechanische Übertragungselemente | 333 |
| 8.1 | Getriebe | 333 |
| 8.1.1 | Getriebearten | 334 |
| 8.1.2 | Zahnradgetriebe | 335 |
| 8.1.2.1 | Einteilung | 335 |
| 8.1.2.2 | Zahnräder | 337 |
| 8.1.2.3 | Stirnradgetriebe | 339 |
| 8.1.2.4 | Schraubenstirnradgetriebe | 345 |
| 8.1.2.5 | Schneckengetriebe | 346 |
| 8.1.2.6 | Kegelrad- und Kronenradgetriebe | 347 |
| 8.1.3 | Zugmittelgetriebe | 349 |
| 8.1.4 | Schraubenge triebe | 353 |
| 8.1.5 | Koppelgetriebe | 354 |
| 8.1.6 | Kurvengetriebe | 355 |
| 8.1.7 | Schrittgetriebe | 356 |
| 8.2 | Kupplungen | 358 |
| 8.2.1 | Feste Kupplungen | 358 |
| 8.2.2 | Ausgleichskupplungen | 359 |
| 8.2.3 | Schaltkupplungen | 361 |
| 8.3 | Achsen und Wellen | 365 |
| 8.3.1 | Entwurfsberechnung | 365 |
| 8.3.2 | Nachrechnung | 366 |
| 8.4 | Lager | 367 |
| 8.4.1 | Gleitlager | 368 |
| 8.4.2 | Wälzlager | 371 |
| 9 | Schwingungen und Geräusche | 375 |
| 9.1 | Einführung | 375 |
| 9.1.1 | Relevanz der Geräuschentwicklung elektrischer Antriebe | 375 |
| 9.1.2 | Grundsätzliches zur Geräuschentstehung in elektromechanischen Systemen | 375 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 9.2 | Geräusentwicklung bei elektrischen Kleinantrieben | 376 |
| 9.2.1 | Mechanisch verursachte Wechselkräfte | 376 |
| 9.2.1.1 | Unwucht | 376 |
| 9.2.1.2 | Lager | 376 |
| 9.2.1.3 | Zahnräder | 377 |
| 9.2.1.4 | Mechanische Kommutierung | 377 |
| 9.2.1.5 | Spiel und Lose | 377 |
| 9.2.2 | Elektromotorisch verursachte Wechselkräfte | 378 |
| 9.3 | Messung, Analyse und Prüfung von Geräuschen und Schwingungen | 379 |
| 9.3.1 | Messmittel nach aktuellem Stand der Technik | 379 |
| 9.3.1.1 | Luftschallmesstechnik | 379 |
| 9.3.1.2 | Körperschallmesstechnik | 380 |
| 9.3.2 | Vorgehensweise zur Analyse und Prüfung von Geräuschen | 381 |
| 9.3.2.1 | Beschreibung der Problemstellung | 382 |
| 9.3.2.2 | Subjektive Bewertung von Geräuschen (Klassifizierung) | 382 |
| 9.3.2.3 | Reproduzierbares Messen | 382 |
| 9.3.2.4 | Analyse von Geräuschen | 384 |
| 9.3.2.5 | Psychoakustik | 385 |
| 9.3.2.6 | Prüfung in der Serie | 385 |
| 10 | Projektierung von Antriebssystemen | 387 |
| 10.1 | Forderungen an Antriebssysteme | 387 |
| 10.2 | Lösungsweg für Antriebsaufgaben | 388 |
| 10.3 | Systematik typischer Antriebsaufgaben | 389 |
| 10.3.1 | Systematik nach der Bewegung | 389 |
| 10.3.2 | Systematik nach der Betriebsweise | 390 |
| 10.4 | Besonderheiten bei der Antriebsauswahl | 392 |
| 10.5 | Vergleich lage geregelter Gleichstromantriebe mit Schrittantrieben | 394 |
| 10.6 | Umrechnung mechanischer Antriebsparameter | 396 |
| 10.7 | Beispiele für Antriebsaufgaben | 398 |
| 10.7.1 | Direktantrieb eines Plattenspeichergerätes | 398 |
| 10.7.2 | Antrieb einer Kolbendosierpumpe | 402 |
| 10.7.3 | Antrieb einer Leiterplattenbohrereinheit | 406 |
| 10.7.4 | Antrieb eines Lichtzeichenkopfes | 410 |
| 10.7.5 | Antrieb einer Schlauchpumpe | 414 |
| 10.7.6 | Seilzugantrieb für ein schreibendes Gerät | 417 |
| 10.7.7 | Antrieb einer Trommel | 422 |
| Anhang | | |
| | Formelzeichenverzeichnis | 429 |
| | Literaturverzeichnis | 431 |
| | Die Autoren | 451 |
| | Sachwortverzeichnis | 455 |