

Inhalt

Vorwort — V

Eberhard Kallenbach und Gerald Puchner

1	Elektromagnete — 1
1.1	Elektromagnete als Antriebselemente — 1
1.2	Gleichstrommagnete — 4
1.2.1	Besonderheiten — 4
1.2.2	Stationäres Verhalten von Gleichstrommagneten — 4
1.2.3	Dynamisches Verhalten von Gleichstrommagneten — 11
1.2.4	Einfluss der Wirbelströme auf das dynamische Verhalten von Gleichstrommagneten — 15
1.2.5	Maßnahmen zur Beeinflussung des dynamischen Verhaltens von Gleichstrommagneten — 17
1.3	Wechselstrommagnete — 23
1.3.1	Berechnung der Magnetkraft von Einphasenwechselstrommagneten — 24
1.3.2	Zeitabhängigkeit der Magnetkraft von Einphasenwechselstrommagneten — 26
1.3.3	Magnetkraft des Dreiphasenwechselstrommagneten — 28
1.3.4	Dynamisches Verhalten von Wechselstrommagneten — 29
1.4	Polarisierte Elektromagnete — 32
1.4.1	Besonderheiten — 32
1.4.2	Magnetkraft polarisierter Elektromagnete mit einem Reihenkreis — 33
1.4.3	Anwendung von polarisierten Elektromagneten — 35
1.5	Anwendung der Elektromagnete — 36
1.5.1	Elektromagnetantriebe als mechatronische Baugruppe — 36
1.5.2	Bauformen und Funktionen von Elektromagneten — 37
1.5.3	Ausführungsformen und Applikationsbeispiele — 42
1.5.4	Elektrische Ansteuerverfahren und ihr Einfluss auf die Funktion des Elektromagneten — 49
1.6	Entwurf von Elektromagnetantrieben — 54
1.6.1	Entwurfsprozess — 54
1.6.2	Analytische Abschätzung der Haltekraft von Haltemagneten — 55
1.6.3	Numerische Feldberechnungsverfahren – FEM — 56

Wolfgang Schinköthe, Hans-Jürgen Furchert und Christoph Schäffel

2	Linear- und Mehrkoordinatenantriebe — 63
2.1	Elektrodynamische Linear- und Mehrkoordinatenantriebe — 63
2.1.1	Wirkprinzip und Grundstruktur — 64
2.1.2	Bauformen elektrodynamischer Linearmotoren — 68

- 2.1.3 Bauformen integrierter elektrodynamischer Mehrkoordinatenantriebe mit Einmassenläufern für xy -, $x\varphi$ -, $xy\varphi$ - und $xy\varphi z$ - Bewegungen — **84**
- 2.1.4 Betriebsverhalten elektrodynamischer Linear- und Mehrkoordinatenmotoren — **99**
- 2.1.5 Ansteuerung elektrodynamischer Linear- und Mehrkoordinatenmotoren — **104**
- 2.1.6 Linear- und Mehrkoordinatenantriebe nach dem Asynchronmotorprinzip — **113**
- 2.1.7 Kommerziell angebotene Systeme — **116**
- 2.2 Lineare und planare Hybridschrittmotoren — **117**
- 2.2.1 Lineare Hybridschrittmotoren — **117**
- 2.2.2 Mehrkoordinatenhybridschrittmotoren — **121**
- 2.2.3 Dynamische Eigenschaften von linearen Hybridschrittmotoren — **123**
- 2.2.4 Prinzip der elektronischen Schrittteilung — **128**
- 2.2.5 Lineare Hybridschrittmotoren als magnetisch nichtlineare Antriebselemente — **129**

Hartmut Janocha und Stefan Seelecke

3 Piezoelektrische Antriebe — 131

- 3.1 Physikalischer Effekt — **131**
- 3.1.1 Einführung — **131**
- 3.1.2 Analytische Beschreibung — **132**
- 3.2 Piezoelektrische Bauelemente — **134**
- 3.2.1 Piezoelektrische Werkstoffe — **134**
- 3.2.2 Piezokeramische Elemente — **136**
- 3.3 Piezoantriebe mit begrenzter Auslenkung — **137**
- 3.3.1 Stapeltranslatoren — **138**
- 3.3.2 Streifentranslatoren — **141**
- 3.3.3 Biegeelemente — **142**
- 3.3.4 Tubusse — **143**
- 3.3.5 Piezowandler mit Wegübersetzung — **144**
- 3.4 Piezoantriebe mit unbegrenzter Auslenkung — **145**
- 3.4.1 Wurm- und Schreitantriebe — **146**
- 3.4.2 Trägheitsantriebe — **149**
- 3.4.3 Piezo Actuator Drive (PAD) — **150**
- 3.4.4 Ultraschallmotoren — **151**
- 3.4.5 Einige Auswahl- und Entwurfskriterien — **158**
- 3.5 Steuerelektronik für Piezoantriebe — **160**
- 3.5.1 Leistungsverstärker — **160**
- 3.5.2 Controller — **162**
- 3.5.3 Linearisierung des Aktor-Übertragungsverhaltens — **163**
- 3.6 Realisierungsbeispiele — **164**

- 3.6.1 Positioniertisch — 164
- 3.6.2 Hexapod — 166

Carsten Fräger

- 4 Servoantriebe — 169**
 - 4.1 Übersicht — 169
 - 4.2 Anwendungen für Servoantriebe — 170
 - 4.2.1 Dynamische Positionieranwendungen in Produktionsmaschinen — 171
 - 4.2.2 Präzise Anwendungen in Produktionsmaschinen — 172
 - 4.2.3 Ventilverstellungen, Klappenverstellungen, Leitradeinstellungen an Turbinen — 173
 - 4.2.4 Anwendungen im Kraftfahrzeug — 174
 - 4.2.5 Drucker, Plotter, Scanner — 174
 - 4.2.6 Modellbau — 175
 - 4.3 Aufbau und Eigenschaften von Servoantrieben — 175
 - 4.3.1 Stellservoantrieb – Gleichstrommotor, Getriebe, 3-Punkt-Regler — 178
 - 4.3.2 Gleichstromservoantrieb – PM-Gleichstrommotor, Getriebe, Gleichstromsteller, Regler — 181
 - 4.3.3 Bürstenloser Gleichstromservoantrieb BLDC – bürstenloser Permanentmagnetmotor, Getriebe, Blockumrichter, Regler — 186
 - 4.3.4 Synchronmotor-Servoantrieb BLAC – Permanentmagnetmotor mit Sinuskommutierung, Getriebe, Pulsumrichter, Regler mit Vektorsteuerung — 191
 - 4.3.5 Servodirektantrieb – Permanentmagnet-Synchron-Direktantriebsmotor/BLAC, Pulsumrichter, Regler mit Vektorsteuerung — 200
 - 4.3.6 Synchronmotor-Servolinearantrieb – Permanentmagnet-Linearmotor, Pulsumrichter, Regler mit Vektorsteuerung — 204
 - 4.3.7 Asynchronmotor-Servoantrieb, Getriebe, Pulsumrichter, Regler mit feldorientierter Regelung — 207
 - 4.4 Stationäre und dynamische Kenngrößen für Servoantriebe — 215
 - 4.4.1 Abtastzeiten, Zykluszeiten und Bandbreiten der Regelung — 217
 - 4.4.2 Minimale Hochlaufzeit — 218
 - 4.4.3 Maximaltaktrate — 220
 - 4.4.4 Dynamischer Kennwert — 222
 - 4.4.5 Zusammenfassung der dynamischen Kenngrößen — 224

Carsten Fräger und Wolfgang Amrhein

- 5 Sensoren für elektrische Antriebe — 227**
 - 5.1 Temperatursensoren — 228
 - 5.1.1 Temperaturschalter — 229
 - 5.1.2 Kaltleiter PTC — 230

- 5.1.3 Heißleiter NTC — **232**
- 5.1.4 Widerstände und Halbleiterfühler mit etwa linearem
Temperaturverhalten — **233**
- 5.2 Drehzahlsensoren — **233**
- 5.2.1 Bürstenbehafte Gleichstromtachogeneratoren — **234**
- 5.2.2 Bürstenlose Wechselstromtachogeneratoren — **235**
- 5.3 Winkelsensoren, Wegsensoren — **235**
- 5.3.1 Potentiometer — **237**
- 5.3.2 Kapazitive Sensoren — **240**
- 5.3.3 Elektromagnetische Sensoren — **245**
- 5.3.4 Resolver — **250**
- 5.3.5 Permanentmagnetische Sensoren — **257**
- 5.3.6 Optische Sensoren — **262**

Wolfgang Amrhein, Wolfgang Gruber, Gerald Jungmayr, Edmund Marth und Siegfried Silber

- 6 Magnetlagertechnik — 269**
- 6.1 Einleitung — **269**
- 6.2 Ausführungsarten von Magnetlagern — **269**
- 6.2.1 Passive Stabilisierung — **270**
- 6.2.2 Aktive Stabilisierung — **272**
- 6.2.3 Aktive vs. passive Stabilisierung — **273**
- 6.3 Anwendungsgebiete — **273**
- 6.4 Passive Magnetlagersysteme — **274**
- 6.4.1 Der Magnet als Hochtemperatursupraleiter — **274**
- 6.4.2 Grundanordnungen permanentmagnetischer Ringlager — **275**
- 6.4.3 Eigenschaften permanentmagnetischer Ringlager — **277**
- 6.4.4 Stapelung, Skalierung und optimale Auslegung von
permanentmagnetischen Radiallagern — **279**
- 6.4.5 Dämpfung — **282**
- 6.4.6 Beispiel: Lüfter mit passiver Radial- und Kippstabilisierung — **283**
- 6.5 Aktive Magnetlagersysteme — **285**
- 6.5.1 Elektromagnetlager — **285**
- 6.5.2 Lagerlose Motoren — **293**

Werner Krause

- 7 Mechanische Übertragungselemente — 307**
- 7.1 Getriebe — **308**
- 7.1.1 Getriebearten — **309**
- 7.1.2 Zahnradgetriebe — **311**
- 7.1.3 Zugmittelgetriebe — **338**
- 7.1.4 Schraubengetriebe — **347**

7.1.5	Koppelgetriebe —	351
7.1.6	Kurvengetriebe —	354
7.1.7	Schrittgetriebe —	356
7.2	Kupplungen —	358
7.2.1	Feste Kupplungen —	359
7.2.2	Ausgleichskupplungen —	360
7.2.3	Schaltkupplungen —	364
7.2.4	Selbstschaltende Kupplungen —	366
7.3	Achsen und Wellen —	369
7.3.1	Entwurfsberechnung —	369
7.3.2	Nachrechnung —	371
7.4	Lager —	376
7.4.1	Gleitlager —	377
7.4.2	Wälzlager —	383
7.4.3	Vergleich von Gleitlagern und Wälzlagern —	387
7.5	Führungen —	388
7.5.1	Gleitführungen —	389
7.5.2	Wälzführungen —	392
7.6	Hinweise zu Werkstoffangaben —	395

Thomas Roschke, Marcus Herrmann und Carsten Fräger

8	Auslegung und Projektierung von Antriebssystemen —	397
8.1	Anforderungen an Antriebe und Auslegungskriterien —	397
8.1.1	Funktion unter Normalbedingungen —	398
8.1.2	Funktion über der Lebenszeit —	399
8.1.3	Sichere Funktion unter Überlast und absehbaren Fehlbedingungen —	400
8.1.4	Gewährleistung der Funktion durch Anforderungen aus Richtlinien, Montage und übergeordneten Applikationseinheiten —	401
8.1.5	Lastenheft und Pflichtenheft —	403
8.2	Lösungsweg für Antriebsaufgaben —	404
8.3	Systematik typischer Antriebsaufgaben —	405
8.3.1	Systematik nach der Bewegung —	405
8.3.2	Systematik nach der Betriebsweise —	407
8.4	Aspekte der Antriebsauswahl —	411
8.4.1	Übersicht möglicher Antriebe —	411
8.4.2	Thermische Randbedingungen —	411
8.4.3	Ansteuerelektronik —	414
8.4.4	Geräusch und Akustik —	415
8.5	Vergleich lage geregelter Gleichstrom- und Schrittantriebe als Servoantriebe —	417

8.6	Leistungsauslegung von Antrieben – thermische Auslegung, Anlauf, Überlast, Lastkollektive — 417
8.6.1	Ermittlung von Lastdrehmoment, Leistung, Massenträgheit und Beschleunigungsdrehmoment — 420
8.6.2	Betriebsarten – Übersicht zu genormten Betriebsarten — 423
8.6.3	Betriebsart S1 – Dauerbetrieb mit konstanter Belastung — 426
8.6.4	Betriebsart S2 – Kurzzeitbetrieb — 428
8.6.5	Betriebsart S3 – periodischer Aussetzbetrieb — 430
8.6.6	Betriebsarten S4 und S5 – periodischer Aussetzbetrieb mit Einfluss des Anlaufvorgangs und der elektrischen Bremsung — 432
8.6.7	Betriebsart S6 – ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung — 435
8.6.8	Betriebsart S8 – ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahländerungen — 437
8.6.9	Einfluss der Umgebungstemperatur bzw. Kühlmitteltemperatur — 443
8.6.10	Einfluss der Aufstellungshöhe über Meereshöhe — 445
8.7	Auslegung für den Betrieb mit fester Drehzahl – Betrieb an fester Spannung und Frequenz – Betriebsarten S1, S2, S3, S6 für einzelne Betriebspunkte — 446
8.7.1	Einfluss von Spannung und Frequenz auf die Betriebsdaten — 447
8.7.2	Antriebswahl nach der Leistung — 450
8.7.3	Wahl der Übersetzung zwischen Antrieb und Arbeitsmaschine — 451
8.7.4	Auslegung für den Anlauf — 451
8.7.5	Auslegung für Überlast — 453
8.8	Antriebe mit Drehzahländerung – Einfluss der Spannung auf die Betriebsdaten — 453
8.9	Antriebsauslegung für die Betriebsarten S1, S2, S3, S6 — 456
8.9.1	Antriebswahl nach der Leistung — 456
8.9.2	Wahl der Übersetzung zwischen Antrieb und Arbeitsmaschine — 457
8.9.3	Auslegung für den Anlauf — 457
8.9.4	Auslegung für Überlast — 458
8.10	Antriebsauslegung für den periodischen Betrieb mit variabler Drehzahl und Belastung S8 — 458
8.10.1	Antriebswahl nach der Leistung — 459
8.10.2	Wahl der Übersetzung zwischen Antrieb und Arbeitsmaschine — 460
8.10.3	Thermische Überprüfung des Antriebs — 460
8.11	Antriebsauslegung für den dynamischen periodischen Betrieb mit variabler Drehzahl und Belastung S8 — 463
8.11.1	Antriebsauswahl mit dem dynamischen Kennwert — 463
8.12	Beispiele für Antriebsaufgaben — 469
8.12.1	Pumpenantrieb mit Asynchronmotor in den Betriebsarten S1, S2 und S3 — 469

- 8.12.2 Rollenheber mit Permanentmagnetmotor — 476
- 8.12.3 Dynamische Auslegung eines rotativen Querschneiders in Betriebsart S8 — 486
- 8.12.4 Energiearmer Antrieb für ein autarkes Gasventil — 501
- 8.12.5 Schnell schaltendes Auslösemodul für eine Sicherheitsvorrichtung — 507
- 8.12.6 Dosiermodul für eine Insulinpumpe — 517
- 8.12.7 Miniaturantriebe für ein Lungenbiopsiegerät — 520
- 8.12.8 Direktantrieb eines Festplattenlaufwerks — 523
- 8.12.9 Antrieb einer Schlauchpumpe — 529
- 8.12.10 Antrieb einer Trommel — 534

Formelzeichen und Formelschreibweise — 545

Abbildungsverzeichnis — 549

Tabellenverzeichnis — 569

Die Autoren — 573

Literatur — 579

Stichwortverzeichnis — 601