

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Antriebsanordnungen: Grundlagen	7
1.1 Mechanische Grundgesetze	7
1.1.1 Analogien zwischen Translation und Rotation	7
1.1.2 Übertragungsstellen und Getriebe	11
1.1.3 Drehmomentbilanz im Antriebssystem	15
1.1.4 Normierung der Gleichungen und Differentialgleichungen	16
1.2 Zeitliches Verhalten des rotierenden mechanischen Systems	19
1.2.1 Analytische Behandlung	19
1.2.2 Graphische Behandlung von Bewegungsvorgängen	22
1.2.3 Numerische Lösung über Differenzengleichung	25
1.3 System Arbeitsmaschine–Antriebsmaschine	26
1.3.1 Stationäres Verhalten der Arbeitsmaschine	26
1.3.1.1 Widerstandsmoment $M_W = \text{const.}$	26
1.3.1.2 Widerstandsmoment $M_W = f(N, V)$	27
1.3.1.3 Widerstandsmoment $M_W = f(\varphi)$	28
1.3.1.4 Widerstandsmoment $M_W = f(r)$	28
1.3.1.5 Widerstandsmoment $M_W = f(t)$	29
1.3.2 Stationäres Verhalten der Antriebsmaschinen: $M_M = f(N, \varphi)$	29
1.3.2.1 Asynchrones bzw. Nebenschluß-Verhalten	30
1.3.2.2 Konstant-Moment-Verhalten	30
1.3.2.3 Synchrones Verhalten	31
1.3.2.4 Beispiel: Gleichstrom–Nebenschlußmaschine	31
1.3.3 Statische Stabilität im Arbeitspunkt	34
1.3.3.1 Graphische Methoden	34
1.3.3.2 Rechnerische Stabilitätsprüfung über die linearisierte Differentialgleichung im Arbeitspunkt	35
1.3.3.3 Stabilitätsprüfung über die Laplace-Transformation	36
1.3.4 Bemessung der Antriebsanordnung	38
1.3.4.1 Arbeitsmaschinen	38
1.3.4.2 Antriebsmaschinen	39

2	Verluste und Erwärmung im Antriebssystem	41
2.1	Verluste an der Übertragungsstelle	41
2.1.1	Leistungsbilanz	41
2.1.2	Verlustarbeit an der Übertragungsstelle „Motor“	44
2.1.3	Verluste beim Beschleunigen	46
2.2	Erwärmung elektrischer Maschinen	49
2.2.1	Verlustleistung und Temperatur	49
2.2.2	Rechengang: mathematische Grundlagen	53
2.2.3	Strombelastung und Verlustleistung	54
2.2.4	Normen und Betriebsarten	56
2.2.4.1	Betriebsarten und Bemessungsdaten	58
2.2.4.2	Dauerbetrieb (Betriebsart S1)	59
2.2.4.3	Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2)	59
2.2.4.4	Aussetzbetrieb (Betriebsart S3)	60
2.2.4.5	Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs (Betriebsart S4)	62
2.2.4.6	Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S5)	63
2.2.4.7	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung (Betriebsart S6)	63
2.2.4.8	Unterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S7)	63
2.2.4.9	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahl- änderungen (Betriebsart S8)	65
2.2.4.10	Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Dreh- zahländerung (Betriebsart S9)	65
2.2.4.11	Betrieb mit diskretem konstantem Belastungszustand (Betriebsart S10)	66
2.2.5	Mittelwertbetrieb bei periodischer Belastung	66
2.3	Maschinen mit mehreren Bemessungsbetrieben	69
2.4	Aufstellungshöhe, Temperatur und Kühlmittel	70
2.4.1	Belüftung und Kühlung	71
2.4.2	Elektrische Bedingungen	72
3	Gleichstrommaschine	77
3.1	Magnetische Feldtheorie	78
3.1.1	Wechselwirkungen zwischen Ladungen	78
3.1.1.1	Wechselwirkungen zwischen <i>statischen</i> Ladungen – das elektrische Feld	78
3.1.1.2	Wechselwirkungen zwischen <i>bewegten</i> Ladungen – das magneti- sche Feld	80
3.1.1.3	Wechselwirkungen zwischen <i>beschleunigten</i> Ladungen	83
3.1.1.4	Wechselwirkungen zwischen Ladungen – Lenz’sche Regel	85
3.1.1.5	Wechselwirkungen zwischen Ladungen – Beispiele	86
3.1.2	Magnetische Feldstärke	87

3.1.3	Magnetische Flussdichte	90
3.1.3.1	Lorentzkraft	90
3.1.3.2	Materialabhängigkeit der Lorentzkraft bzw. magnetischen Flussdichte	92
3.1.3.3	Magnetische Flussdichte in nicht ferromagnetischen Materialien	96
3.1.3.4	Magnetische Flussdichte in ferromagnetischen Materialien (Hysteresekurve)	97
3.1.4	Wichtige Eigenschaften des magnetischen Feldes für das Verständnis elektrischer Maschinen	102
3.1.4.1	Magnetfeldbündelnde Wirkung ferromagnetischer Materialien	102
3.1.4.2	Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	104
3.1.4.3	Kraft auf bewegte Ladungen im Luftspalt zwischen ferromagne- tischen Materialien	104
3.1.4.4	Oberflächenströme	106
3.1.4.5	Wechselwirkung zwischen ferromagnetischen Werkstoffen	107
3.1.4.6	Magnetischer Kreis	110
3.1.4.7	Grenzflächenkräfte: magnetischer Querdruck und Längszug . . .	116
3.1.4.8	Brechungsgesetze für magnetische Feldlinien	122
3.1.5	Zusammenfassung	133
3.2	Physikalisches Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine	134
3.2.1	Prinzip der Momenterzeugung – Ableitung der Momenten-Grundgleichung	135
3.2.1.1	Betrachtung der Gleichstrommaschine als magnetischen Kreis .	135
3.2.1.2	Kommutator	139
3.2.1.3	Ableitung der Momenten-Grundgleichung	142
3.2.1.4	Rotor mit Nuten	143
3.2.2	Beschleunigung des Rotors – Ableitung der Mechanik-Grundgleichung	147
3.2.3	Entstehung einer Gegenspannung – Ableitung der Bewegungsinduktions-Grundgleichung	148
3.2.4	Eigeninduktivität des Rotors – Ableitung der Ankerkreis-Grundgleichung	151
3.3	Signalfußplan der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine	153
3.3.1	Ankerkreis	153
3.3.2	Feldkreis, Erregerkreis	159
3.3.3	Zusammenfassung von Ankerkreis und Erregerkreis	166
3.4	Signalfußpläne, Übergangsverhalten	172
3.4.1	Führungsverhalten und Führungs-Übertragungsfunktion	172
3.4.2	Lastverhalten und Stör-Übertragungsfunktion	175
3.4.3	Einfluß von ψ auf n (Feldschwächung)	176
3.4.4	Zusammengefaßter Plan (linearisiert, überlagert, vereinfacht) . .	178
3.5	Steuerung der Drehzahl	180
3.5.1	Drehzahlsteuerung durch die Ankerspannung	180

3.5.2	Steuerung durch den Fluß	182
3.5.3	Steuerung durch Ankerspannung und Feld	183
3.5.3.1	Stationäres Verhalten, Kennlinien	183
3.5.3.2	Zeitverhalten	185
3.5.4	Drehzahl-Steuerung durch Vorwiderstand im Ankerkreis	185
3.5.4.1	Drehzahlverstellung durch geschaltete Vorwiderstände	186
3.6	Zeitliches Verhalten bei Spannungs- und Stromsteuerung	190
3.6.1	Drehzahländerung durch Spannungsumschaltung	190
3.6.2	Drehzahländerung mit konstantem Strom	191
3.7	Arbeitsbereich-Grenzen der fremderregten Gleichstrommaschine	193
3.7.1	Bereich 1: Spannungsverstellung im Ankerkreis	193
3.7.2	Bereich 2: Feldverstellung	194
3.7.3	Bereich 3: Erhöhung der Drehzahl bei konstanter Spannung und konstantem Fluß	194
3.8	Gleichstrom-Hauptschlußmaschine	196
4	Stellglieder und Regelung für die Gleichstrommaschine	202
4.1	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	202
4.1.1	Tiefsetzsteller	202
4.1.2	Steuerverfahren für Gleichstromsteller	206
4.1.2.1	Pulsweitensteuerung (T konstant)	206
4.1.2.2	Pulsfolgesteuerung (T variabel)	207
4.1.2.3	Hysteres-Regelung des Gleichstromstellers	208
4.1.3	Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb von Gleichstrommaschinen	211
4.1.3.1	Prinzip des Tiefsetzstellers (Buck-Wandler)	211
4.1.3.2	Prinzip des Hochsetzstellers (Boost-Wandler)	212
4.1.3.3	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb	213
4.1.3.4	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb	216
4.1.3.5	Zwei-Quadrant-Betrieb	216
4.1.3.6	Vier-Quadrant-Betrieb	220
4.1.4	Antriebssystem Gleichstromsteller-Gleichstrommaschine	223
4.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder	226
4.2.1	Grundprinzip	227
4.2.2	Dreiphasen-Mittelpunktschaltung	229
4.2.3	Dreiphasen-Brückenschaltung (B6-Schaltung)	234
4.2.4	Netzstrom, Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ und Leistungsfaktor λ	236
4.2.5	Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine	241
4.2.6	Verfahren zur Drehmomentumkehr bei Stromrichtern	244
4.2.6.1	Drehmomentumkehr durch Wenden des Ankerstroms	245
4.2.6.2	Drehrichtungsumkehr eines Gleichstromantriebes, der von einem kreisstromfreien Umkehrstromrichter gespeist wird	248
4.2.6.3	Drehmomentumkehr durch Wenden des Feldstroms	250
4.3	Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine	255

4.3.1	Ankerstromregelung	256
4.3.2	Drehzahlregelung	259
4.3.3	Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen	262
5	Drehfeldmaschinen	269
5.1	Einführung	269
5.2	Funktionsweise von Asynchronmaschinen	270
5.2.1	Erzeugung eines Drehfeldes im Luftspalt durch den Stator . . .	271
5.2.2	Spannungsinduktion im Rotor	282
5.2.3	Stromaufbau im Rotor	287
5.2.4	Entstehung des Drehmoments, stationäre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie	289
5.2.5	Höhere Polpaarzahlen	291
5.3	Raumzeiger-Darstellung	293
5.3.1	Definition eines Raumzeigers	294
5.3.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	297
5.3.3	Koordinatensysteme	298
5.3.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	300
5.4	Allgemeine Drehfeldmaschine	302
5.5	Asynchronmaschine: Signalflußplan mit Verzögerungsgliedern .	313
5.6	Asynchronmaschine im stationären Betrieb	314
5.6.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine . . .	317
5.6.2	Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb	324
5.6.2.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	324
5.6.2.2	Stromortskurve des Statorstroms	327
5.7	Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb	329
5.7.1	Steuerverfahren bei Statorflußorientierung	330
5.7.2	Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung	341
5.7.3	Asynchronmaschine am Umrichter mit eingprägtem Statorstrom	349
6	Synchronmaschine	350
6.1	Funktionsweise von Synchronmaschinen	350
6.2	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	355
6.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	355
6.2.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung . . .	360
6.2.3	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Spannungseinprägung	364
6.2.4	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Stromeinprägung	368
6.2.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	370
6.3	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	372
6.4	Synchron-Vollpolmaschine	376
6.4.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußpläne	376
6.4.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	382

XIV	Inhaltsverzeichnis	
6.4.3	Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	384
6.5	Permanentmagnetenerregte Maschinen	391
7	Transversalflußmaschine	396
	Prof. Dr. H. Weh, Universität Karlsruhe	
7.1	Die neueren Entwicklungen in der Antriebstechnik	396
7.2	Magnetkreise bei Longitudinalfluß(LF)- und Transversalfluß(TF)-Anordnung	400
7.2.1	Longitudinalfluß-Anordnung (LF) mit Permanentmagneten . .	400
7.2.2	Zahlenbeispiel	402
7.3	Magnetkreise der Transversalfluß-Familie (TF)	403
7.3.1	Übergang von der Flachmagnet- zur Sammleranordnung	405
7.3.2	Zu erwartende TFM-Ergebnisse	412
8	Geschaltete Reluktanzmaschinen	415
	Prof. Dr. H. Bausch, Universität d. Bundeswehr München	
8.1	Einleitung	415
8.2	Aufbau	418
8.3	Betriebsverhalten	420
8.4	Energieumwandlung	429
8.5	Stromrichterschaltungen	432
8.6	Steuerung und Regelung	438
9	Linearmotoren	445
	Prof. Dr. G. Henneberger, RWTH Aachen	
9.1	Einführung	445
9.2	Technik von Linearmotoren	445
9.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten	453
9.4	Hochgeschwindigkeits-Anwendungen	455
10	Lagerlose Permanentmagnetmotoren	458
	Prof. Dr. W. Amrhein, Universität Linz; Dr. S. Silber, LCM-Linz	
10.1	Einleitung	458
10.2	Kraft- und Drehmomentberechnung	462
10.2.1	Magnetische Koenergie	463
10.2.2	Maxwellscher Spannungstensor	463
10.2.2.1	Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen	467
10.2.2.2	Drehmomentberechnung	469
10.2.2.3	Kraftberechnung	471
10.2.2.4	Interpretation der Ergebnisse	472
10.3	Ausführungsbeispiele zu lagerlosen Permanentmagnetmotoren .	473

10.4	Regelung und elektronische Ansteuerung	478
10.5	Lagerlose Motoren mit drei passiv stabilisierten Freiheitsgraden	483
11	Kleinantriebe	486
11.1	Schrittmotoren	486
11.1.1	Einführung, Funktionsprinzip	486
11.1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	488
11.1.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	488
11.1.2.2	Permanentmagnetenerregter Schrittmotor	490
11.1.2.3	Hybrid-Schrittmotor	492
11.1.3	Gegenüberstellung Drehfeld-Schrittfeld	494
11.1.4	Betriebskennlinien, Betriebsverhalten	495
11.1.4.1	Statischer Drehmomentverlauf	495
11.1.4.2	Statisches Lastverhalten	497
11.1.4.3	Einzelschritt-Fortschaltung	498
11.1.4.4	Grenzkennlinien, Betriebsbereiche	500
11.1.5	Ansteuerung, Leistungselektronik	503
11.1.5.1	Ersatzschaltbild eines Motorstrangs	503
11.1.5.2	Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen	503
11.1.5.3	Leistungstreiber	504
11.1.5.4	Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb	506
11.1.5.5	Bestromungstabellen	509
11.1.6	Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler	510
11.1.7	Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen	512
11.1.7.1	Parametrische Anregung	514
11.1.7.2	Dämpfung	516
11.1.8	Modellbildung	516
11.1.9	Auslegung von Schrittmotorantrieben	518
11.1.9.1	Ermittlung der Startgrenzfrequenz	520
11.1.9.2	Berechnung von linearen Frequenzrampen	521
11.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine	523
12	Umrichterantriebe	525
12.1	Direktumrichter	526
12.2	Untersynchrone Stromrichter-kaskade (USK)	531
12.3	Stromrichtermotor	536
12.3.1	Prinzipielle Funktion	537
12.3.2	Lastgeführte Kommutierung	540
12.3.3	Anfahrvorgang	544
12.3.4	Drehmomentpendelungen	545
12.3.5	Regelung des Stromrichtermotors	547
12.4	Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenfolgelöschung und eingepprägtem Strom	549

12.4.1	Prinzipielles Systemverhalten	549
12.4.2	Kommutierung des selbstgeführten Stromrichters	551
12.4.3	Steuer- und Regelverfahren	560
12.4.4	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter	562
12.5	Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis . .	563
12.5.1	Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung	564
12.5.2	Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung (Pulsumrichter)	569
12.5.3	Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern	571
12.5.4	Mehrpunkt-Wechselrichter	581
12.5.5	Leistungsfaktor-Korrektur (PFC)	586
13	Grundsätzliche Überlegungen zur Regelung von Drehfeld- maschinen	588
13.1	Entkopplung	589
13.2	Feldorientierung	591
	Übungsaufgaben	596
	Prüfungsaufgaben	637
	Variablenübersicht	664
	Literaturverzeichnis	679
	Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher)	679
	Elektroantrieb allgemein	683
	Leistungshalbleiter	684
	Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung	687
	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	688
	Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung	690
	Netzgeführte Stromrichter: Regelung	692
	Direktumrichter	697
	Untersynchrone Kaskade (USK)	699
	Stromrichtertermotor	701
	Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)	703
	Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)	705
	Asynchronmaschine: Regelung	707
	Synchronmaschine	712
	Reluktanzmaschine	713
	Geberlose Reluktanzmaschine	720
	Linearmotoren	720
	Lagerlose Permanentmagnetmotoren	722

Kleinantriebe 724

Stichwortverzeichnis 726