

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Antriebsanordnungen: Grundlagen	9
1.1 Mechanische Grundgesetze	9
1.1.1 Analogien zwischen Translation und Rotation	9
1.1.2 Übertragungsstellen und Getriebe	13
1.1.3 Drehmomentbilanz im Antriebssystem	17
1.1.4 Normierung der Gleichungen und Differentialgleichungen	18
1.2 Zeitliches Verhalten des rotierenden mechanischen Systems	21
1.2.1 Analytische Behandlung	21
1.2.2 Graphische Behandlung von Bewegungsvorgängen	24
1.2.3 Numerische Lösung über Differenzgleichung	27
1.3 System Arbeitsmaschine–Antriebsmaschine	28
1.3.1 Stationäres Verhalten der Arbeitsmaschine	28
1.3.1.1 Widerstandsmoment $M_W = \text{const.}$	28
1.3.1.2 Widerstandsmoment $M_W = f(N, V)$	29
1.3.1.3 Widerstandsmoment $M_W = f(\varphi)$	30
1.3.1.4 Widerstandsmoment $M_W = f(r)$	30
1.3.1.5 Widerstandsmoment $M_W = f(t)$	31
1.3.2 Stationäres Verhalten der Antriebsmaschinen: $M_M = f(N, \varphi)$	31
1.3.2.1 Asynchrones bzw. Nebenschluß-Verhalten	32
1.3.2.2 Konstant-Moment-Verhalten	33
1.3.2.3 Synchrones Verhalten	33
1.3.2.4 Beispiel: Gleichstrom–Nebenschlußmaschine	34
1.3.3 Statische Stabilität im Arbeitspunkt	36
1.3.3.1 Graphische Methoden	36
1.3.3.2 Rechnerische Stabilitätsprüfung über die linearisierte Differentialgleichung im Arbeitspunkt	37
1.3.3.3 Stabilitätsprüfung über die Laplace-Transformation	38
1.3.4 Bemessung der Antriebsanordnung	40
1.3.4.1 Arbeitsmaschinen	40
1.3.4.2 Antriebsmaschinen	41

2	Verluste und Erwärmung im Antriebssystem	44
2.1	Verluste an der Übertragungsstelle	44
2.1.1	Leistungsbilanz	44
2.1.2	Verlustarbeit an der Übertragungsstelle „Motor“	47
2.1.3	Verluste beim Beschleunigen	49
2.2	Erwärmung elektrischer Maschinen	52
2.2.1	Verlustleistung und Temperatur	52
2.2.2	Rechengang: mathematische Grundlagen	56
2.2.3	Strombelastung und Verlustleistung	57
2.2.4	Normen und Betriebsarten	59
2.2.4.1	Betriebsarten und Bemessungsdaten	61
2.2.4.2	Dauerbetrieb (Betriebsart S1)	62
2.2.4.3	Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2)	62
2.2.4.4	Aussetzbetrieb (Betriebsart S3)	63
2.2.4.5	Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs (Betriebsart S4)	65
2.2.4.6	Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S5)	66
2.2.4.7	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung (Betriebsart S6)	66
2.2.4.8	Unterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S7)	66
2.2.4.9	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahl- änderungen (Betriebsart S8)	68
2.2.4.10	Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Dreh- zahländerung (Betriebsart S9)	68
2.2.4.11	Betrieb mit diskretem konstantem Belastungszustand (Betriebsart S10)	69
2.2.5	Mittelwertbetrieb bei periodischer Belastung	69
2.3	Maschinen mit mehreren Bemessungsbetrieben	72
2.4	Aufstellungshöhe, Temperatur und Kühlmittel	72
2.4.1	Belüftung und Kühlung	73
2.4.2	Elektrische Bedingungen	74
3	Gleichstrommaschine	80
3.1	Einführung	80
3.2	Theorie der Felder	81
3.2.1	Elektrostatistisches Feld, Coulomb-Kraft	82
3.2.2	Magnetfeld - Lorentzkraft	84
3.2.3	Magnetfeld - Induktionsspannung	87
3.2.3.1	Wechselwirkungen zwischen Ladungen - Lenz'sche Regel	90
3.2.4	Magnetische Feldstärke	90
3.2.5	Magnetische Flussdichte	94
3.2.5.1	Lorentzkraft	94

3.2.5.2	Materialabhängigkeit der Lorentzkraft bzw. magnetischen Flussdichte	95
3.2.5.3	Magnetische Flussdichte in nicht ferromagnetischen Materialien	100
3.2.5.4	Magnetische Flussdichte in ferromagnetischen Materialien (Hysteresekurve)	100
3.2.6	Wichtige Eigenschaften des magnetischen Feldes für das Verständ- nis elektrischer Maschinen	106
3.2.6.1	Magnetfeldbündelnde Wirkung ferromagnetischer Materialien	106
3.2.6.2	Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	107
3.2.6.3	Kraft auf bewegte Ladungen im Luftspalt zwischen ferromagne- tischen Materialien	108
3.2.6.4	Oberflächenströme	109
3.2.6.5	Wechselwirkung zwischen ferromagnetischen Werkstoffen	110
3.2.6.6	Magnetischer Kreis	114
3.2.6.7	Grenzflächenkräfte: magnetischer Querdruck und Längszug . . .	120
3.2.6.8	Brechungsgesetze für magnetische Feldlinien	126
3.2.7	Zusammenfassung	137
3.3	Physikalisches Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine	138
3.3.1	Prinzip der Momenterzeugung – Ableitung der Momenten-Grundgleichung	139
3.3.1.1	Betrachtung der Gleichstrommaschine als magnetischen Kreis .	139
3.3.1.2	Kommutator	143
3.3.1.3	Ableitung der Momenten-Grundgleichung	147
3.3.1.4	Rotor mit Nuten	148
3.3.2	Beschleunigung des Rotors – Ableitung der Mechanik-Grundgleichung	152
3.3.3	Entstehung einer Gegenspannung – Ableitung der Bewegungsinduktions-Grundgleichung	152
3.3.4	Eigeninduktivität des Rotors – Ableitung der Ankerkreis-Grundgleichung	155
3.4	Signalflußplan der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine	157
3.4.1	Ankerkreis	157
3.4.2	Feldkreis, Erregerkreis	163
3.4.3	Zusammenfassung von Ankerkreis und Erregerkreis	170
3.5	Signalflußpläne, Übergangsverhalten	176
3.5.1	Führungsverhalten und Führungs-Übertragungsfunktion	176
3.5.2	Lastverhalten und Stör-Übertragungsfunktion	179
3.5.3	Einfluß von ψ auf n (Feldschwächung)	179
3.5.4	Zusammengefaßter Plan (linearisiert, überlagert, vereinfacht) . .	182
3.6	Steuerung der Drehzahl	184
3.6.1	Drehzahlsteuerung durch die Ankerspannung	184
3.6.2	Steuerung durch den Fluß	186
3.6.3	Steuerung durch Ankerspannung und Feld	187

3.6.3.1	Stationäres Verhalten, Kennlinien	187
3.6.3.2	Zeitverhalten	189
3.6.4	Drehzahl-Steuerung durch Vorwiderstand im Ankerkreis	189
3.6.4.1	Drehzahlverstellung durch geschaltete Vorwiderstände	190
3.7	Zeitliches Verhalten bei Spannungs- und Stromsteuerung	194
3.7.1	Drehzahländerung durch Spannungsumschaltung	194
3.7.2	Drehzahländerung mit konstantem Strom	195
3.8	Arbeitsbereich-Grenzen der fremderregten Gleichstrommaschine	197
3.8.1	Bereich 1: Spannungsverstellung im Ankerkreis	197
3.8.2	Bereich 2: Feldverstellung	198
3.8.3	Bereich 3: Erhöhung der Drehzahl bei konstanter Spannung und konstantem Fluß	198
3.9	Gleichstrom-Hauptschlußmaschine	200
4	Stellglieder und Regelung für die Gleichstrommaschine	206
4.1	Einleitung Leistungselektronik	206
4.2	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	207
4.2.1	Tiefsetzsteller	208
4.2.2	Steuerverfahren für Gleichstromsteller	212
4.2.2.1	Pulsweitensteuerung (T konstant)	212
4.2.2.2	Pulsfolgesteuerung (T variabel)	212
4.2.2.3	Hystereseregulierung des Gleichstromstellers	214
4.2.3	Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb von Gleichstrommaschinen	217
4.2.3.1	Prinzip des Tiefsetzstellers (Buck-Wandler)	217
4.2.3.2	Prinzip des Hochsetzstellers (Boost-Wandler)	217
4.2.3.3	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb	219
4.2.3.4	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb	221
4.2.3.5	Zwei-Quadrant-Betrieb	222
4.2.3.6	Vier-Quadrant-Betrieb	226
4.2.4	Antriebssystem Gleichstromsteller-Gleichstrommaschine	229
4.3	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder	232
4.3.1	Grundprinzip	233
4.3.2	Dreiphasen-Mittelpunktschaltung	234
4.3.3	Dreiphasen-Brückenschaltung (B6-Schaltung)	240
4.3.4	Netzstrom, Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ und Leistungsfaktor λ	242
4.3.5	Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine	247
4.3.6	Verfahren zur Drehmomentumkehr bei Stromrichtern	250
4.3.6.1	Drehmomentumkehr durch Wenden des Ankerstroms	251
4.3.6.2	Drehrichtungsumkehr eines Gleichstromantriebes, der von einem kreisstromfreien Umkehrstromrichter gespeist wird	254
4.3.6.3	Drehmomentumkehr durch Wenden des Feldstroms	255
4.4	Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine	261
4.4.1	Ankerstromregelung	262

4.4.2	Drehzahlregelung	265
4.4.3	Querverweise Gleichstrommaschine - Regelung	268
4.4.4	Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen	271
5	Drehfeldmaschinen	277
5.1	Einführung	277
5.2	Funktionsweise von Asynchronmaschinen	278
5.2.1	Erzeugung eines Drehfeldes im Luftspalt durch den Stator . . .	279
5.2.2	Spannungsinduktion im Rotor	290
5.2.3	Stromaufbau im Rotor	295
5.2.4	Entstehung des Drehmoments, stationäre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie	297
5.2.5	Höhere Polpaarzahlen	299
5.3	Raumzeiger-Darstellung	301
5.3.1	Definition eines Raumzeigers	302
5.3.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	305
5.3.3	Koordinatensysteme	306
5.3.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	308
5.4	Allgemeine Drehfeldmaschine	309
5.5	Asynchronmaschine: Signalflußplan mit Verzögerungsgliedern .	323
5.6	Asynchronmaschine im stationären Betrieb	325
5.6.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine	326
5.6.2	Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb	333
5.6.2.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	333
5.6.2.2	Stromortskurve des Statorstroms	334
5.7	Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb	338
5.7.1	Steuerverfahren bei Statorflußorientierung	339
5.7.2	Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung	350
5.7.3	Asynchronmaschine am Umrichter mit eingepprägtem Statorstrom	359
6	Synchronmaschine	360
6.1	Funktionsweise von Synchronmaschinen	360
6.2	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	365
6.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	365
6.2.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung	370
6.2.3	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Spannungseinprägung	374
6.2.4	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Stromeinprägung	378
6.2.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	380
6.3	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	382
6.4	Synchron-Vollpolmaschine	386
6.4.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußpläne	386
6.4.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	392

6.4.3	Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	394
6.5	Permanentmagneterregte Maschinen	401
7	Transversalflußmaschine Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. H. Weh	406
7.1	Die neueren Entwicklungen in der Antriebstechnik	406
7.2	Magnetkreise bei Longitudinalfluß(LF)- und Transversalfluß(TF)-Anordnung	410
7.2.1	Longitudinalfluß-Anordnung (LF) mit Permanentmagneten	410
7.2.2	Zahlenbeispiel	412
7.3	Magnetkreise der Transversalfluß-Familie (TF)	413
7.3.1	Übergang von der Flachmagnet- zur Sammleranordnung	415
7.3.2	Zu erwartende TFM-Ergebnisse	422
8	Geschaltete Reluktanzmaschinen Prof. Dr. H. Bausch, Universität d. Bundeswehr München	425
8.1	Einleitung	425
8.2	Aufbau	428
8.3	Betriebsverhalten	430
8.4	Energieumwandlung	439
8.5	Stromrichterschaltungen	442
8.6	Steuerung und Regelung	448
9	Linearmotoren Prof. Dr. G. Henneberger, RWTH Aachen	455
9.1	Einführung	455
9.2	Technik von Linearmotoren	455
9.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten	463
9.4	Hochgeschwindigkeits-Anwendungen	466
10	Lagerlose Permanentmagnetmotoren Prof. Dr. W. Amrhein; Dr. S. Silber ACCM/ Johannes Kepler Universität Linz	469
10.1	Einleitung	469
10.2	Kraft- und Drehmomentberechnung	473
10.2.1	Magnetische Koenergie	474
10.2.2	Maxwellscher Spannungstensor	474
10.2.2.1	Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen	478
10.2.2.2	Drehmomentberechnung	480
10.2.2.3	Kraftberechnung	481
10.2.2.4	Interpretation der Ergebnisse	482

10.3	Ausführungsbeispiele zu lagerlosen Permanentmagnetmotoren	484
10.4	Regelung und elektronische Ansteuerung	488
10.5	Applikationen lagerloser Scheibenläufermotoren	491
11	Kleinantriebe	499
11.1	Schrittmotoren	499
11.1.1	Einführung, Funktionsprinzip	499
11.1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	501
11.1.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	501
11.1.2.2	Permanentmagneterregter Schrittmotor	503
11.1.2.3	Hybrid-Schrittmotor	505
11.1.3	Gegenüberstellung Drehfeld-Schrittfeld	507
11.1.4	Betriebskennlinien, Betriebsverhalten	508
11.1.4.1	Statischer Drehmomentverlauf	508
11.1.4.2	Statisches Lastverhalten	510
11.1.4.3	Einzelschritt-Fortschaltung	511
11.1.4.4	Grenzkennlinien, Betriebsbereiche	513
11.1.5	Ansteuerung, Leistungselektronik	516
11.1.5.1	Ersatzschaltbild eines Motorstrangs	516
11.1.5.2	Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen	516
11.1.5.3	Leistungstreiber	517
11.1.5.4	Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb	519
11.1.5.5	Bestromungstabellen	522
11.1.6	Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler	523
11.1.7	Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen	525
11.1.7.1	Parametrische Anregung	527
11.1.7.2	Dämpfung	529
11.1.8	Modellbildung	529
11.1.9	Auslegung von Schrittmotorantrieben	532
11.1.9.1	Ermittlung der Startgrenzfrequenz	533
11.1.9.2	Berechnung von linearen Frequenzrampen	533
11.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine	537
12	Umrichterantriebe	538
12.1	Direktumrichter	539
12.1.1	Matrix-Umrichter	543
12.2	Untersynchrone Stromrichteraskade (USK)	545
12.2.1	Querverweise untersynchrone Stromrichteraskade, USK	550
12.3	Stromrichtermotor	551
12.3.1	Prinzipielle Funktion	552
12.3.2	Lastgeführte Kommutierung	554
12.3.3	Anfahrvorgang	558
12.3.4	Drehmomentpendelungen	559

12.3.5	Regelung des Stromrichter-motors	561
12.3.6	Querverweise Stromrichter-motor	563
12.4	Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenfolgelöschung und eingepprägtem Strom	564
12.4.1	Prinzipielles Systemverhalten	564
12.4.2	Kommutierung des selbstgeführten Stromrichters	566
12.4.3	Steuer- und Regelverfahren	575
12.4.4	Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter	577
12.4.5	Querverweise I-Umrichter	578
12.5	Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis	580
12.5.1	Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung	581
12.5.2	Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung (Pulsumrichter)	585
12.5.3	Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern	588
12.5.3.1	Zweipunktregelung (Prinzipdarstellung)	588
12.5.3.2	Pulsweitenmodulation (PWM)	589
12.5.3.3	Raumzeiger-Darstellung	595
12.5.4	Bewertung „U-Umrichter - I-Umrichter“	597
12.5.5	Mehrpunkt-Wechselrichter	600
12.5.6	Leistungsfaktor-Korrektur (PFC)	606
13	Grundsätzliche Überlegungen zur Regelung von Drehfeldmaschinen	607
13.1	Entkopplung	608
13.1.1	Querverweise Entkopplung	611
13.2	Feldorientierung	612
13.2.1	Querverweise Feldorientierung	616
	Übungsaufgaben	618
	Prüfungsaufgaben	659
	Variablenübersicht	686
	Literaturverzeichnis	702
	Kompendium	702
	Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher)	705
	Elektroantrieb allgemein	710
	Leistungshalbleiter	711
	Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung	714
	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	715
	Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung	717

Netzgeführte Stromrichter: Regelung	719
Direktumrichter	724
Untersynchrone Kaskade (USK)	726
Stromrichtermotor	728
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)	730
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)	732
Asynchronmaschine: Regelung	734
Synchronmaschine	739
Reluktanzmaschine	740
Geberlose Reluktanzmaschine	746
Linearmotoren	747
Lagerlose Permanentmagnetmotoren	749
Kleinantriebe	754
Stichwortverzeichnis	758