Inhaltsverzeichnis

1	Antriebsanordnungen: Grundlagen	1
1.1	Mechanische Grundgesetze	1
1.1.1	Analogien zwischen Translation und Rotation	1
1.1.2	Übertragungsstellen und Getriebe	5
1.1.3	Drehmomentbilanz im Antriebssystem	9
1.1.4	Normierung der Gleichungen und Differentialgleichungen	10
1.2	Zeitliches Verhalten des rotierenden mechanischen Systems	13
1.2.1	Analytische Behandlung	13
1.2.2	Graphische Behandlung von Bewegungsvorgängen	16
1.2.3	Numerische Lösung über Differenzgleichung	19
1.3	System Arbeitsmaschine–Antriebsmaschine	20
1.3.1	Stationäres Verhalten der Arbeitsmaschine	20
1.3.1.1	Widerstandsmoment $M_W = \text{const.}$	20
1.3.1.2	Widerstandsmoment $M_W = f(N, V)$	21
1.3.1.3	Widerstandsmoment $M_W = f(\varphi)$	22
1.3.1.4	Widerstandsmoment $M_W = f(r)$	22
1.3.1.5	Widerstandsmoment $M_W = f(t)$	23
1.3.2	Stationäres Verhalten der Antriebsmaschinen: $M_M = f(N, \varphi)$	23
1.3.2.1	Asynchrones bzw. Nebenschluß-Verhalten	24
1.3.2.2	Konstant-Moment-Verhalten	25
1.3.2.3	Synchrones Verhalten	25
1.3.2.4	Beispiel: Gleichstrom–Nebenschlußmaschine	26
1.3.3	Statische Stabilität im Arbeitspunkt	28
1.3.3.1	Graphische Methoden	28
1.3.3.2	Rechnerische Stabilitätsprüfung über die linearisierte Differentialgleichung im Arbeitspunkt	29
1.3.3.3	Stabilitätsprüfung über die Laplace-Transformation	30
1.3.4	Bemessung der Antriebsanordnung	32
1.3.4.1	Arbeitsmaschinen	32
1.3.4.2	Antriebsmaschinen	33

2	Verluste und Erwärmung im Antriebssystem	36
2.1	Verluste an der Übertragungsstelle	36
2.1.1	Leistungsbilanz	36
2.1.2	Verlustarbeit an der Übertragungsstelle „Motor“	38
2.1.3	Verluste beim Beschleunigen	40
2.2	Erwärmung elektrischer Maschinen	43
2.2.1	Verlustleistung und Temperatur	43
2.2.2	Rechengang: mathematische Grundlagen	47
2.2.3	Strombelastung und Verlustleistung	48
2.2.4	Normen und Betriebsarten	50
2.2.4.1	Betriebsarten und Bemessungsdaten	52
2.2.4.2	Dauerbetrieb (Betriebsart S1)	53
2.2.4.3	Kurzzeitbetrieb (Betriebsart S2)	53
2.2.4.4	Aussetzbetrieb (Betriebsart S3)	54
2.2.4.5	Aussetzbetrieb mit Einfluß des Anlaufvorgangs (Betriebsart S4)	56
2.2.4.6	Aussetzbetrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S5) . . .	57
2.2.4.7	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Aussetzbelastung (Betriebsart S6)	57
2.2.4.8	Unterbrochener periodischer Betrieb mit elektrischer Bremsung (Betriebsart S7)	57
2.2.4.9	Ununterbrochener periodischer Betrieb mit Last- und Drehzahl- änderungen (Betriebsart S8)	59
2.2.4.10	Ununterbrochener Betrieb mit nichtperiodischer Last- und Dreh- zahländerung (Betriebsart S9)	59
2.2.4.11	Betrieb mit diskretem konstantem Belastungszustand (Betriebsart S10)	60
2.2.5	Mittelwertbetrieb bei periodischer Belastung	60
2.3	Maschinen mit mehreren Bemessungsbetrieben	63
2.4	Aufstellungshöhe, Temperatur und Kühlmittel	63
2.4.1	Belüftung und Kühlung	64
2.4.2	Elektrische Bedingungen	65
3	Gleichstrommaschine	71
3.1	Einführung	71
3.2	Regelungstechnische Modellbildung der Gleichstrommaschine .	71
3.3	Signalflußplan der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine	78
3.3.1	Ankerkreis	78
3.3.2	Feldkreis, Erregerkreis	84
3.3.3	Zusammenfassung von Ankerkreis und Erregerkreis	90
3.4	Signalflußpläne, Übergangsverhalten	96
3.4.1	Führungsverhalten und Führungs-Übertragungsfunktion	96
3.4.2	Lastverhalten und Stör-Übertragungsfunktion	99
3.4.3	Einfluß von ψ auf n (Feldschwächung)	99

3.4.4	Zusammengefaßter Plan (linearisiert, überlagert, vereinfacht) . . .	102
3.5	Steuerung der Drehzahl	104
3.5.1	Drehzahlsteuerung durch die Ankerspannung	104
3.5.2	Steuerung durch den Fluß	106
3.5.3	Steuerung durch Ankerspannung und Feld	107
3.5.3.1	Stationäres Verhalten, Kennlinien	107
3.5.3.2	Zeitverhalten	109
3.5.4	Drehzahl-Steuerung durch Vorwiderstand im Ankerkreis	109
3.5.4.1	Drehzahlverstellung durch geschaltete Vorwiderstände	110
3.6	Zeitliches Verhalten bei Spannungs- und Stromsteuerung	114
3.6.1	Drehzahländerung durch Spannungsumschaltung	114
3.6.2	Drehzahländerung mit konstantem Strom	115
3.7	Arbeitsbereich-Grenzen der fremderregten Gleichstrommaschine	117
3.7.1	Bereich 1: Spannungsverstellung im Ankerkreis	117
3.7.2	Bereich 2: Feldverstellung	118
3.7.3	Bereich 3: Erhöhung der Drehzahl bei konstanter Spannung und konstantem Fluß	118
4	Leistungselektronische Schaltungen	121
4.1	Leistungselektronische Schaltungen für Antriebe – Einführung .	121
4.1.1	Leistungselektronische Bauelemente – Einführung	121
4.1.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder – Einführung	130
4.1.2.1	Grundprinzipien netzgeführter Stellglieder	130
4.1.2.2	Dreiphasen Brückenschaltung (B6-Schaltung)	133
4.1.2.3	Kommutierung – Überlappung	135
4.1.2.4	Wechselrichterbetrieb – Wechselrichterkippen	139
4.1.2.5	Verschiebungsfaktor, Leistungsfaktor	140
4.1.2.6	Umkehrstromrichter	143
4.1.2.7	Umkehrstromrichter Ablauf Befehlsfolge	144
4.1.3	DC-DC-Wandler Einführung	147
4.1.4	U-Umrichter Einführung	147
4.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder Gleichstromantriebe . . .	148
4.2.1	Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine .	149
4.3	Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine	153
4.3.1	Ankerstromregelung	155
4.3.2	Drehzahlregelung	157
4.3.3	Großsignalverhalten	162
4.3.4	Prädiktive Stromregelung	167
4.3.5	Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen	169
4.4	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder – Drehstromantriebe . .	175
4.4.1	Direktumrichter	175
4.4.2	Stromrichtermotor	175
4.4.3	I-Umrichter	176
4.5	DC-DC-Wandler Gleichstrommaschine	177

4.5.1	Tiefsetzsteller (buck converter)	177
4.5.2	Hochsetzsteller (boost converter)	181
4.6	Steuerverfahren bei DC-DC-Wandlern	182
4.6.1	Pulsweitensteuerung PWM	182
4.6.2	Pulsfolgesteuerung	183
4.6.3	Hysterese-Regelung	184
4.7	Gleichstromsteller – Gleichstrommaschine	186
4.7.1	Tiefsetzsteller (buck converter) – Gleichstrommaschine	186
4.7.2	Ein-Quadrant-Bremsbetrieb (boost converter) – Gleichstrommaschine	187
4.7.3	Zwei-Quadrant-Steller mit Ankerstromumkehr – Gleichstrommaschine	187
4.7.4	Zwei-Quadranten-Stellglied mit Ankerspannungsumkehr – Gleichstrommaschine	188
4.7.5	Vier-Quadranten-Stellglied – Gleichstrommaschine	192
4.8	Regelungen Gleichstromsteller – Gleichstrommaschine	195
4.9	Querverweise DC-DC-Wandler	198
5	Asynchronmaschinen	199
5.1	Einführung	199
5.2	Funktionsweise von Asynchronmaschinen	200
5.2.1	Erzeugung eines Drehfeldes im Luftspalt durch den Stator	201
5.2.2	Spannungsinduktion im Rotor	212
5.2.3	Stromaufbau im Rotor	217
5.2.4	Entstehung des Drehmoments, stationäre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie	219
5.2.5	Höhere Polpaarzahlen	221
5.3	Raumzeiger-Darstellung	223
5.3.1	Definition eines Raumzeigers	224
5.3.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	228
5.3.3	Koordinatensysteme	228
5.3.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	231
5.4	Schleifringläufermaschine	231
5.5	Asynchronmaschine: Signalflußplan mit Verzögerungsgliedern	245
5.6	Asynchronmaschine im stationären Betrieb	247
5.6.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine	248
5.6.2	Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb	255
5.6.2.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	255
5.6.2.2	Stromortskurve des Statorstroms	256
5.7	Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb	260
5.7.1	Steuerverfahren bei Statorflußorientierung	261
5.7.2	Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung	272
5.7.3	Asynchronmaschine am Umrichter mit eingepprägtem Statorstrom	281
5.8	Linearmaschinen	281

6	Synchronmaschine	285
6.1	Funktionsweise von Synchronmaschinen	285
6.2	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	290
6.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	290
6.2.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung	295
6.2.3	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Spannungseinprägung	299
6.2.4	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Stromeinprägung	303
6.2.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	305
6.3	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	307
6.4	Synchron-Vollpolmaschine	311
6.4.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußpläne	311
6.4.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	317
6.4.3	Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	319
6.5	Permanentmagneterregte Maschinen	326
6.5.1	Regelung mit Nebenbedingungen	330
6.6	Transversalflussmaschinen	331
7	Reluktanz-Synchronmaschine	336
7.1	Einleitung	336
7.2	Aufbau	338
7.3	Drehmomentbildung / Energieumwandlung D. Tritschler, SEW EURODRIVE	340
7.3.1	Zusammenhang zwischen Flussverkettung und Stromzeiger	340
7.3.2	allgemeine Drehmomentgleichung	341
7.3.3	Vereinfachungen	346
7.4	Betriebsverhalten Dr.-Ing. J. Bonifacio, ZF Friedrichshafen AG	351
7.4.1	Grunddrehzahlbereich	352
7.4.2	Feldschwächbereich	355
7.4.3	Tiefer Feldschwächbereich	357
7.4.4	Weiterführende Literatur	361
7.5	Auswirkung der Sättigung auf Steuerung und Regelung Dr.-Ing. J. Bonifacio	363
7.5.1	Berücksichtigung der Sättigung bei der Entkopplung	363
7.5.2	Dynamik des Stromaufbaus	365
7.5.3	Stromregelkreis mit Sättigungseffekten	366
7.6	Mischformen der Synchronmaschine D. Tritschler, SEW EURODRIVE	369

8	Geschaltete Reluktanzmaschinen	372
	Prof. Dr. H. Bausch, Universität d. Bundeswehr München	
8.1	Einleitung	372
8.2	Aufbau	375
8.3	Betriebsverhalten	377
8.4	Energieumwandlung	386
8.5	Stromrichterschaltungen	389
8.6	Steuerung und Regelung	395
9	Lagerlose Permanentmagnetmotoren	402
	Prof. Dr. W. Amrhein; Dr. S. Silber	
	ACCM/ Johannes Kepler Universität Linz	
9.1	Einleitung	402
9.2	Kraft- und Drehmomentberechnung	407
9.2.1	Magnetische Koenergie	407
9.2.2	Maxwellscher Spannungstensor	408
9.2.2.1	Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen	411
9.2.2.2	Drehmomentberechnung	413
9.2.2.3	Kraftberechnung	414
9.2.2.4	Interpretation der Ergebnisse	415
9.3	Ausführungsbeispiele zu lagerlosen Permanentmagnetmotoren	416
9.4	Regelung und elektronische Ansteuerung	421
9.5	Applikationen lagerloser Scheibenläufermotoren	424
10	Kleinantriebe	432
10.1	Schrittmotoren	432
10.1.1	Einführung, Funktionsprinzip	432
10.1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	434
10.1.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	434
10.1.2.2	Permanentmagneterregter Schrittmotor	436
10.1.2.3	Hybrid-Schrittmotor	438
10.1.3	Gegenüberstellung Drehfeld-Schrittfeld	440
10.1.4	Betriebskennlinien, Betriebsverhalten	441
10.1.4.1	Statischer Drehmomentverlauf	441
10.1.4.2	Statisches Lastverhalten	443
10.1.4.3	Einzel-schritt-Fortschaltung	444
10.1.4.4	Grenzkennlinien, Betriebsbereiche	446
10.1.5	Ansteuerung, Leistungselektronik	449
10.1.5.1	Ersatzschaltbild eines Motorstrangs	449
10.1.5.2	Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen	449
10.1.5.3	Leistungstreiber	450
10.1.5.4	Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb	452
10.1.5.5	Bestromungstabellen	455

10.1.6	Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler	456
10.1.7	Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen	458
10.1.7.1	Parametrische Anregung	460
10.1.7.2	Dämpfung	462
10.1.8	Modellbildung	462
10.1.9	Auslegung von Schrittmotorantrieben	465
10.1.9.1	Ermittlung der Startgrenzfrequenz	466
10.1.9.2	Berechnung von linearen Frequenzrampen	466
10.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine	470
11	Umrichterantriebe	471
11.1	Direktumrichter	473
11.2	Stromrichter motor	480
11.2.1	Prinzipielle Funktion	481
11.2.2	Lastgeführte Kommutierung	483
11.2.3	Anfahrvorgang	487
11.2.4	Drehmomentpendelungen	489
11.2.5	Regelung des Stromrichtermotors	490
11.2.6	Einsatzgebiete Stromrichtermotor	492
11.3	Umrichter mit Phasenfolgelöschung und eingprägtem Strom (I-Umrichter)	493
11.3.1	Prinzipielles Systemverhalten	493
11.3.2	Modifizierter I-Umrichter	495
11.4	Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis	500
11.4.1	Grundfunktion	500
11.4.2	Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern	502
11.4.2.1	Zweipunktregelung (Prinzipdarstellung)	502
11.4.2.2	Pulsweitenmodulation (PWM)	505
11.4.2.3	Raumzeiger-Modulation	511
11.4.3	Optimierte Pulsmuster	513
11.5	Mehrpunkt-Wechselrichter	516
11.6	Hochleistungs-Wechselrichter	520
11.6.1	Serien-Zellen Wechselrichter	521
11.6.2	M2C-Wechselrichter	521
11.7	Leistungsfaktor-Korrektur (PFC)	526
12	Regelungen von Drehfeldmaschinen	531
12.1	Entkopplung – Asynchronmaschine	531
12.2	Feldorientierung – Asynchronmaschine	538
12.3	Entkopplung – Synchronmaschine	542
12.4	Feldorientierung – Synchronmaschinen	546
12.5	PM-Maschine mit Reluktanzeinflüssen	549
12.6	Geberlose Regelung von elektrischen Antrieben	550

12.7	Weiterführende Informationen	559
12.7.1	Statorstrom-Regelungen	559
12.7.2	Dynamisches Verhalten des Stellglieds und zugehörige Signalverarbeitung bei selbstgeführten Stellgliedern	559
12.7.3	Überlagerte Regelverfahren [97]	567
12.7.4	Technologische Aufgabenstellungen	569
12.8	Optimierung Betrieb – Verlustminimierung	572
12.8.1	Direktantrieb gegen Getriebemotor	572
12.8.2	Betriebsoptimierung – Verlustminimierung	578
12.8.2.1	Einführung	578
12.8.2.2	Modelle	579
12.8.2.3	Kupferverluste	583
12.8.2.4	Eisenverluste	583
12.8.2.5	Oberschwingungen	587
12.8.2.6	Transienter Skin-Effekt	589
12.8.2.7	Permanentmagneterregte Synchronmaschine PM-SM	589
12.8.2.8	Asynchronmaschine	591
12.8.2.9	Fahrzeuge	592
12.8.2.10	Synchrone Reluktanzmaschine	594
12.8.2.11	Einphasen-Asynchronmaschine	594
12.8.2.12	Akustik	594
12.9	Modell Prädiktive Regelung MPC	595
12.9.1	Einführung	595
12.9.2	MPC – Theorie und Praxis Dr.-Ing. P. Stolze, Technische Universität München	599
12.9.2.1	ASM Grundgleichungen	599
12.9.3	Heuristik zur Reduktion des Rechenaufwands	604
12.9.3.1	Grundprinzip	605
12.9.3.2	Validierung der heuristischen Vorselektion	607
12.9.3.3	Bestimmung des wertkontinuierlichen Optimums	609
12.9.3.4	Systembeschreibung für das wertkontinuierliche Optimierungsproblem	611
12.9.3.5	Binärer Suchbaum	612
12.9.3.6	Bestimmung des Sektors	614
12.9.3.7	Experimentelle Ergebnisse für Zweilevel-Umrichter	614
12.9.3.8	Experimentelle Ergebnisse für Dreilevel-Flying-Capacitor-Umrichter	615
12.9.4	Variabler Schaltzeitpunkt	616
12.9.4.1	Grundprinzip	616
12.9.4.2	Berechnung des variablen Schaltzeitpunktes	617
12.9.4.3	Regelalgorithmus	619
12.9.4.4	Experimentelle Ergebnisse für Zweilevel-Umrichter	619
12.9.5	Kombination von Heuristik und variablem Schaltzeitpunkt	622
12.9.5.1	Regelalgorithmus	622

12.9.5.2	Experimentelle Ergebnisse für Zweilevel-Umrichter	622
12.9.5.3	Experimentelle Ergebnisse für Dreilevel-Flying-Capacitor-Umrichter	623
12.9.6	Zusammenfassung und Ausblick	626
13	Physikalische Modellbildung der Gleichstrommaschine	629
13.1	Einführung	629
13.2	Theorie der Felder	629
13.2.1	Elektrostatisches Feld, Coulomb-Kraft	630
13.2.2	Magnetfeld - Lorentzkraft	634
13.2.3	Magnetfeld - Induktionsspannung	642
13.2.3.1	Wechselwirkungen zwischen Ladungen – Lenz'sche Regel	645
13.2.4	Magnetische Feldstärke	645
13.2.5	Magnetische Flussdichte	648
13.2.5.1	Lorentzkraft	648
13.2.5.2	Materialabhängigkeit der Lorentzkraft bzw. der magnetischen Flussdichte	650
13.2.5.3	Magnetische Flussdichte in nicht ferromagnetischen Materialien	655
13.2.5.4	Magnetische Flussdichte in ferromagnetischen Materialien (Hysteresekurve)	656
13.2.6	Wichtige Eigenschaften des magnetischen Feldes für das Verständnis elektrischer Maschinen	661
13.2.6.1	Magnetfeldbündelnde Wirkung ferromagnetischer Materialien	661
13.2.6.2	Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	662
13.2.6.3	Kraft auf bewegte Ladungen im Luftspalt zwischen ferromagnetischen Materialien	663
13.2.6.4	Oberflächenströme	665
13.2.6.5	Wechselwirkung zwischen ferromagnetischen Werkstoffen	666
13.2.6.6	Magnetischer Kreis	670
13.2.6.7	Grenzflächenkräfte: magnetischer Querdruck und Längszug	675
13.2.6.8	Brechungsgesetze für magnetische Feldlinien	682
13.2.7	Zusammenfassung	693
13.3	Physikalisches Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine	694
13.3.1	Prinzip der Momenterzeugung – Ableitung der Momenten-Grundgleichung	695
13.3.1.1	Betrachtung der Gleichstrommaschine als magnetischen Kreis	695
13.3.1.2	Kommutator	699
13.3.1.3	Ableitung der Momenten-Grundgleichung	703
13.3.1.4	Rotor mit Nuten	704
13.3.2	Beschleunigung des Rotors – Ableitung der Mechanik-Grundgleichung	708
13.3.3	Entstehung einer Gegenspannung – Ableitung der Bewegungsinduktions-Grundgleichung	708

13.3.4	Eigeninduktivität des Rotors – Ableitung der Ankerkreis-Grundgleichung	712
	Übungsaufgaben	713
	Prüfungsaufgaben	754
	Variablenübersicht	781
	Literaturverzeichnis	797
	Ausgewählte Arbeiten des Lehrstuhls	797
	Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher)	800
	Elektroantrieb allgemein	805
	Leistungshalbleiter	806
	Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung	809
	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	811
	Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung	812
	Netzgeführte Stromrichter: Regelung	814
	Direktumrichter	819
	Untersynchrone Kaskade (USK)	821
	Stromrichtermotor	823
	Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)	825
	Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)	827
	Asynchronmaschine: Regelung	829
	Synchronmaschine	834
	Reluktanz-Synchronmaschine	836
	Reluktanzmaschine	838
	Geberlose Reluktanzmaschine	844
	Gebersysteme für elektrische Antriebe	845
	Geberlose Regelung von Synchronmaschinen mit Permanentmagneterregung	846
	EMK Beobachter	846
	Synchronmaschinen mit Permanentmagneterregung mit Rotor Anisotropy (Saliency)	847
	Hochfrequenzinjektion mit rotierendem Träger	847
	Hochfrequenzinjektion mit alternierendem Träger	847
	Kombination of EMK- und anisotropiebasierten Beobachtern	848
	Arbitrary Injection	849
	nicht-ideale Anisotropien	849
	Umrichter-Nichtlinearitäten	850
	Parameter Identifikation	850
	Asynchronmaschinen	851
	Patente zum Thema Geberlose Regelung	851

Linearmotoren	852
Lagerlose Permanentmagnetmotoren	853
Kleinantriebe	859
Betriebsoptimierung	860
Prädiktive Regelung – MPC	867
Stichwortverzeichnis	871