

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 Differenzengleichung	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“	37
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 . .	149
4.2.1	Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine .	149
4.3	Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine	153
4.3.1	Ankerstromregelung	154
4.3.2	Drehzahlregelung	158
4.3.3	Großsignalverhalten	161
4.3.4	Prädiktive Stromregelung	166
4.3.5	Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen	168
4.4	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder – Drehstromantriebe . .	174
4.4.1	Direktumrichter	174
4.4.2	Stromrichtermotor	174
4.4.3	I-Umrichter	175
4.5	DC-DC-Wandler Gleichstrommaschine	176

4.5.1	Tiefsetzsteller (buck converter)	176
4.5.2	Hochsetzsteller (boost converter)	180
4.6	Steuerverfahren bei DC-DC-Wandlern	181
4.6.1	Pulsweitensteuerung PWM	181
4.6.2	Pulsfolgesteuerung	182
4.6.3	Hysteres-Regelung	183
4.7	Gleichstromsteller – Gleichstrommaschine	185
4.7.1	Tiefsetzsteller (buck converter) – Gleichstrommaschine	185
4.7.2	Ein-Quadrant-Bremsbetrieb (boost converter) – Gleichstrommaschine	186
4.7.3	Zwei-Quadrant-Steller mit Ankerstromumkehr – Gleichstrommaschine	186
4.7.4	Zwei-Quadranten-Stellglied mit Ankerspannungsumkehr – Gleichstrommaschine	187
4.7.5	Vier-Quadranten-Stellglied – Gleichstrommaschine	191
4.8	Regelungen Gleichstromsteller – Gleichstrommaschine	194
4.9	Querverweise DC-DC-Wandler	197
5	Asynchronmaschinen	198
5.1	Einführung	198
5.2	Funktionsweise von Asynchronmaschinen	199
5.2.1	Erzeugung eines Drehfeldes im Luftspalt durch den Stator	200
5.2.2	Spannungsinduktion im Rotor	211
5.2.3	Stromaufbau im Rotor	216
5.2.4	Entstehung des Drehmoments, stationäre Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie	218
5.2.5	Höhere Polpaarzahlen	220
5.3	Raumzeiger-Darstellung	222
5.3.1	Definition eines Raumzeigers	223
5.3.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	226
5.3.3	Koordinatensysteme	227
5.3.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	229
5.4	Schleifringläufermaschine	230
5.5	Asynchronmaschine: Signalflußplan mit Verzögerungsgliedern	244
5.6	Asynchronmaschine im stationären Betrieb	246
5.6.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine	247
5.6.2	Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb	254
5.6.2.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	254
5.6.2.2	Stromortskurve des Statorstroms	255
5.7	Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb	259
5.7.1	Steuerverfahren bei Statorflußorientierung	260
5.7.2	Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung	271
5.7.3	Asynchronmaschine am Umrichter mit eingepprägtem Statorstrom	280
5.8	Linearmaschinen	280

6	Synchronmaschine	284
6.1	Funktionsweise von Synchronmaschinen	284
6.2	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	289
6.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	289
6.2.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung	294
6.2.3	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Spannungseinprägung	298
6.2.4	Signalflußplan Synchron-Schenkelpolmaschine – Stromeinprägung	302
6.2.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	304
6.3	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	306
6.4	Synchron-Vollpolmaschine	310
6.4.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußpläne	310
6.4.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	316
6.4.3	Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämp- ferwicklung	318
6.5	Permanentmagneterregte Maschinen	325
6.5.1	Regelung mit Nebenbedingungen	329
6.6	Transversalflussmaschinen	330
7	Geschaltete Reluktanzmaschinen	335
	Prof. Dr. H. Bausch, Universität d. Bundeswehr München	
7.1	Einleitung	335
7.2	Aufbau	338
7.3	Betriebsverhalten	340
7.4	Energieumwandlung	349
7.5	Stromrichterschaltungen	352
7.6	Steuerung und Regelung	358
8	Lagerlose Permanentmagnetmotoren	365
	Prof. Dr. W. Amrhein; Dr. S. Silber ACCM/ Johannes Kepler Universität Linz	
8.1	Einleitung	365
8.2	Kraft- und Drehmomentberechnung	370
8.2.1	Magnetische Koenergie	370
8.2.2	Maxwellscher Spannungstensor	371
8.2.2.1	Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen	374
8.2.2.2	Drehmomentberechnung	376
8.2.2.3	Kraftberechnung	377
8.2.2.4	Interpretation der Ergebnisse	378
8.3	Ausführungsbeispiele zu lagerlosen Permanentmagnetmotoren	379
8.4	Regelung und elektronische Ansteuerung	384
8.5	Applikationen lagerloser Scheibenläufermotoren	387

9	Kleinantriebe	395
9.1	Schrittmotoren	395
9.1.1	Einführung, Funktionsprinzip	395
9.1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	397
9.1.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	397
9.1.2.2	Permanentmagneterregter Schrittmotor	399
9.1.2.3	Hybrid-Schrittmotor	401
9.1.3	Gegenüberstellung Drehfeld-Schrittfeld	403
9.1.4	Betriebskennlinien, Betriebsverhalten	404
9.1.4.1	Statischer Drehmomentverlauf	404
9.1.4.2	Statisches Lastverhalten	406
9.1.4.3	Einzelschritt-Fortschaltung	407
9.1.4.4	Grenzkennlinien, Betriebsbereiche	409
9.1.5	Ansteuerung, Leistungselektronik	412
9.1.5.1	Ersatzschaltbild eines Motorstrangs	412
9.1.5.2	Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen	412
9.1.5.3	Leistungstreiber	413
9.1.5.4	Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb	415
9.1.5.5	Bestromungstabellen	418
9.1.6	Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler	419
9.1.7	Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen	421
9.1.7.1	Parametrische Anregung	423
9.1.7.2	Dämpfung	425
9.1.8	Modellbildung	425
9.1.9	Auslegung von Schrittmotorantrieben	428
9.1.9.1	Ermittlung der Startgrenzfrequenz	429
9.1.9.2	Berechnung von linearen Frequenzrampen	429
9.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine	433
10	Umrichterantriebe	434
10.1	Direktumrichter	436
10.2	Stromrichtermotor	443
10.2.1	Prinzipielle Funktion	444
10.2.2	Lastgeführte Kommutierung	446
10.2.3	Anfahrvorgang	450
10.2.4	Drehmomentpendelungen	451
10.2.5	Regelung des Stromrichtermotors	453
10.2.6	Einsatzgebiete Stromrichtermotor	455
10.3	Umrichter mit Phasenfolgelöschung und eingprägtem Strom (I-Umrichter)	455
10.3.1	Prinzipielles Systemverhalten	455
10.3.2	Modifizierter I-Umrichter	459
10.4	Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis	462

10.4.1	Grundfunktion	462
10.4.2	Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern	467
10.4.2.1	Zweipunktregelung (Prinzipdarstellung)	467
10.4.2.2	Pulsweitenmodulation (PWM)	468
10.4.2.3	Raumzeiger-Modulation	474
10.4.3	Optimierte Pulsmuster	476
10.5	Mehrpunkt-Wechselrichter	478
10.6	Hochleistungs-Wechselrichter	483
10.6.1	Serien-Zellen Wechselrichter	484
10.6.2	M2C-Wechselrichter	485
10.7	Leistungsfaktor-Korrektur (PFC)	490
11	Regelungen von Drehfeldmaschinen	494
11.1	Entkopplung – Asynchronmaschine	494
11.2	Feldorientierung – Asynchronmaschine	498
11.3	Entkopplung – Synchronmaschine	504
11.4	Feldorientierung – Synchronmaschinen	507
11.5	PM-Maschine mit Reluktanzeinflüssen	512
11.6	Weiterführende Informationen	512
11.6.1	Statorstrom-Regelungen	512
11.6.2	Überlagerte Regelverfahren [97]	519
11.6.3	Technologische Aufgabenstellungen	521
11.7	Optimierung Betrieb – Verlustminimierung	524
11.7.1	Direktantrieb gegen Getriebemotor	524
11.7.2	Betriebsoptimierung – Verlustminimierung	530
11.7.2.1	Einführung	530
11.7.2.2	Modelle	531
11.7.2.3	Kupferverluste	535
11.7.2.4	Eisenverluste	535
11.7.2.5	Oberschwingungen	540
11.7.2.6	Transienter Skin-Effekt	541
11.7.2.7	Permanentmagneterregte Synchronmaschine PM-SM	542
11.7.2.8	Asynchronmaschine	543
11.7.2.9	Fahrzeuge	545
11.7.2.10	Synchrone Reluktanzmaschine	546
11.7.2.11	Einphasen-Asynchronmaschine	546
11.7.2.12	Akustik	547
11.8	Modell Prädiktive Regelung MPC	547
11.8.1	Einführung	547
11.8.2	MPC – Theorie und Praxis	
	Dr. P. Stolze, TU München	552
11.8.2.1	ASM Grundgleichungen	552
11.8.3	Heuristik zur Reduktion des Rechenaufwands	558
11.8.3.1	Grundprinzip	558

11.8.3.2	Validierung der heuristischen Vorselektion	560
11.8.3.3	Bestimmung des wertkontinuierlichen Optimums	562
11.8.3.4	Systembeschreibung für das wertkontinuierliche Optimierungs- problem	564
11.8.3.5	Binärer Suchbaum	565
11.8.3.6	Bestimmung des Sektors	566
11.8.3.7	Experimentelle Ergebnisse für Zweilevel-Umrichter	567
11.8.3.8	Experimentelle Ergebnisse für Dreilevel-Flying-Capacitor- Umrichter	568
11.8.4	Variabler Schaltzeitpunkt	568
11.8.4.1	Grundprinzip	568
11.8.4.2	Berechnung des variablen Schaltzeitpunktes	570
11.8.4.3	Regelalgorithmus	572
11.8.4.4	Experimentelle Ergebnisse für Zweilevel-Umrichter	572
11.8.5	Kombination von Heuristik und variablem Schaltzeitpunkt . . .	574
11.8.5.1	Regelalgorithmus	575
11.8.5.2	Experimentelle Ergebnisse für Zweilevel-Umrichter	575
11.8.5.3	Experimentelle Ergebnisse für Dreilevel-Flying-Capacitor- Umrichter	575
11.8.6	Zusammenfassung und Ausblick	579
12	Physikalische Modellbildung der Gleichstrommaschine	582
12.1	Einführung	582
12.2	Theorie der Felder	582
12.2.1	Elektrostatisches Feld, Coulomb-Kraft	583
12.2.2	Magnetfeld - Lorentzkraft	586
12.2.3	Magnetfeld - Induktionsspannung	589
12.2.3.1	Wechselwirkungen zwischen Ladungen – Lenz'sche Regel	592
12.2.4	Magnetische Feldstärke	592
12.2.5	Magnetische Flussdichte	596
12.2.5.1	Lorentzkraft	596
12.2.5.2	Materialabhängigkeit der Lorentzkraft bzw. magnetischen Flussdichte	597
12.2.5.3	Magnetische Flussdichte in nicht ferromagnetischen Materialien	602
12.2.5.4	Magnetische Flussdichte in ferromagnetischen Materialien (Hysteresekurve)	602
12.2.6	Wichtige Eigenschaften des magnetischen Feldes für das Verständ- nis elektrischer Maschinen	608
12.2.6.1	Magnetfeldbündelnde Wirkung ferromagnetischer Materialien	608
12.2.6.2	Quellenfreiheit des magnetischen Feldes	609
12.2.6.3	Kraft auf bewegte Ladungen im Luftspalt zwischen ferromagne- tischen Materialien	610
12.2.6.4	Oberflächenströme	611

12.2.6.5	Wechselwirkung zwischen ferromagnetischen Werkstoffen	612
12.2.6.6	Magnetischer Kreis	616
12.2.6.7	Grenzflächenkräfte: magnetischer Querdruck und Längszug . . .	622
12.2.6.8	Brechungsgesetze für magnetische Feldlinien	628
12.2.7	Zusammenfassung	640
12.3	Physikalisches Funktionsprinzip der Gleichstrommaschine	641
12.3.1	Prinzip der Momenterzeugung – Ableitung der Momenten-Grundgleichung	641
12.3.1.1	Betrachtung der Gleichstrommaschine als magnetischen Kreis .	641
12.3.1.2	Kommutator	645
12.3.1.3	Ableitung der Momenten-Grundgleichung	649
12.3.1.4	Rotor mit Nuten	650
12.3.2	Beschleunigung des Rotors – Ableitung der Mechanik-Grundgleichung	654
12.3.3	Entstehung einer Gegenspannung – Ableitung der Bewegungsinduktions-Grundgleichung	655
12.3.4	Eigeninduktivität des Rotors – Ableitung der Ankerkreis-Grundgleichung	658
Übungsaufgaben		659
Prüfungsaufgaben		700
Variablenübersicht		727
Literaturverzeichnis		743
Ausgewählte Arbeiten des Lehrstuhls		743
Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher)		746
Elektroantrieb allgemein		751
Leistungshalbleiter		752
Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung		755
Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler		757
Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung		758
Netzgeführte Stromrichter: Regelung		761
Direktumrichter		766
Untersynchrone Kaskade (USK)		768
Stromrichtermotor		770
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)		772
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)		774
Asynchronmaschine: Regelung		776
Synchronmaschine		782
Reluktanzmaschine		783

Geberlose Reluktanzmaschine	790
Linearmotoren	790
Lagerlose Permanentmagnetmotoren	792
Kleinantriebe	797
Betriebsoptimierung	799
Prädiktive Regelung – MPC	805
Stichwortverzeichnis	809