

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 Differenzgleichung	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	Verlustrarbeit 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	Signalflußplan der Gleichstrom-Nebenschlußmaschine	77
3.1.1	Ankerkreis	77
3.1.2	Feldkreis, Erregerkreis	83
3.1.3	Zusammenfassung von Ankerkreis und Erregerkreis	90
3.2	Signalflußpläne, Übergangsverhalten	96
3.2.1	Führungsverhalten und Führungs-Übertragungsfunktion	96
3.2.2	Lastverhalten und Stör-Übertragungsfunktion	99
3.2.3	Einfluß von ψ auf n (Feldschwächung)	100
3.2.4	Zusammengefaßter Plan (linearisiert, überlagert, vereinfacht) . .	102
3.3	Steuerung der Drehzahl	104

3.3.1	Drehzahlsteuerung durch die Ankerspannung	104
3.3.2	Steuerung durch den Fluß	106
3.3.3	Steuerung durch Ankerspannung und Feld	107
3.3.3.1	Stationäres Verhalten, Kennlinien	107
3.3.3.2	Zeitverhalten	109
3.3.4	Drehzahl-Steuerung durch Vorwiderstand im Ankerkreis	109
3.3.4.1	Drehzahlverstellung durch geschaltete Vorwiderstände	110
3.4	Zeitliches Verhalten bei Spannungs- und Stromsteuerung	114
3.4.1	Drehzahländerung durch Spannungsumschaltung	114
3.4.2	Drehzahländerung mit konstantem Strom	115
3.5	Arbeitsbereich-Grenzen der fremderregten Gleichstrommaschine	117
3.5.1	Bereich 1: Spannungsverstellung im Ankerkreis	117
3.5.2	Bereich 2: Feldverstellung	118
3.5.3	Bereich 3: Erhöhung der Drehzahl bei konstanter Spannung und konstantem Fluß	118
3.6	Gleichstrom-Hauptschlußmaschine	120
4	Stellglieder und Regelung für die Gleichstrommaschine	126
4.1	Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	126
4.1.1	Tiefsetzsteller	126
4.1.2	Analyse der Gleichstromsteller-Grundschialtung	130
4.1.3	Abwandlungen der Tröger-Schialtung	133
4.1.4	Weitere Abwandlungen der Gleichstromsteller-Schialtungen	136
4.1.5	Steuerverfahren für Gleichstromsteller	138
4.1.5.1	Pulsweitensteuerung (T konstant)	138
4.1.5.2	Pulsfolgesteuerung (T variabel)	140
4.1.5.3	Hysterese-Regelung des Gleichstromstellers	142
4.1.6	Gleichstromstellerschaltungen für Ein- und Mehr-Quadrant-Betrieb von Gleichstrommaschinen	143
4.1.6.1	Prinzip des Tiefsetzstellers (Buck-Wandler)	143
4.1.6.2	Prinzip des Hochsetzstellers (Boost-Wandler)	144
4.1.6.3	Motorischer Ein-Quadrant-Betrieb	146
4.1.6.4	Generatorischer Ein-Quadrant-Betrieb	148
4.1.6.5	Zwei-Quadrant-Betrieb	149
4.1.6.6	Vier-Quadrant-Betrieb	153
4.1.7	Antriebssystem Gleichstromsteller-Gleichstrommaschine	155
4.2	Netzgeführte Stromrichter-Stellglieder	159
4.2.1	Grundprinzip	159
4.2.2	Dreiphasen-Mittelpunktschialtung	161
4.2.3	Dreiphasen-Brückenschialtung (B6-Schialtung)	166
4.2.4	Netzstrom, Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ und Leistungsfaktor λ	169
4.2.5	Grenzen des Betriebsbereichs von Stromrichter und Maschine	173
4.2.6	Verfahren zur Drehmomentumkehr bei Stromrichtern	176
4.2.6.1	Drehmomentumkehr durch Wenden des Ankerstroms	177

4.2.6.2	Drehrichtungsumkehr eines Gleichstromantriebes, der von einem kreisstromfreien Umkehrstromrichter gespeist wird	180
4.2.6.3	Drehmomentumkehr durch Wenden des Feldstroms	182
4.3	Strom- und Drehzahlregelung der Gleichstrommaschine	187
4.3.1	Ankerstromregelung	188
4.3.2	Drehzahlregelung	191
4.3.3	Führungs- und Störverhalten von Regelkreisen	194
5	Drehfeldmaschinen	200
5.1	Einführung	200
5.2	Raumzeiger-Darstellung	201
5.2.1	Definition eines Raumzeigers	201
5.2.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	205
5.2.3	Koordinatensysteme	206
5.2.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	208
5.3	Allgemeine Drehfeldmaschine	209
5.4	Asynchronmaschine: Signalfußplan mit Verzögerungsgliedern	221
5.5	Asynchronmaschine im stationären Betrieb	223
5.5.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie der Asynchronmaschine	224
5.5.2	Elektrische Verhältnisse im stationären Betrieb	230
5.5.2.1	Ersatzschaltbilder der Asynchronmaschine	230
5.5.2.2	Stromortskurve des Statorstroms	233
5.6	Asynchronmaschine bei Umrichterbetrieb	235
5.6.1	Steuerverfahren bei Statorflußorientierung	236
5.6.2	Steuerverfahren bei Rotorflußorientierung	247
5.6.3	Asynchronmaschine am Umrichter mit eingprägtem Statorstrom	255
6	Synchronmaschine	256
6.1	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	257
6.1.1	Beschreibendes Gleichungssystem	257
6.1.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung	262
6.1.3	Signalfußplan der Synchron-Schenkelpolmaschine bei Spannungseinprägung	265
6.1.4	Signalfußplan der Synchron-Schenkelpolmaschine bei Stromeinprägung	269
6.1.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	271
6.2	Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	273
6.3	Synchron-Vollpolmaschine	276
6.3.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalfußpläne	276
6.3.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	282
6.3.3	Steuerbedingungen der Synchron-Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	284
6.4	Permanentmagneterregte Maschinen	291

7	Transversalflußmaschine	295
	Prof. Herbert Weh	
7.1	Die neueren Entwicklungen in der Antriebstechnik	295
7.2	Magnetkreise bei Longitudinalfluß(LF)- und Transversalfluß(TF)- Anordnung	299
7.2.1	Longitudinalfluß-Anordnung (LF) mit Permanentmagneten . . .	299
7.2.2	Zahlenbeispiel	301
7.3	Magnetkreise der Transversalfluß-Familie (TF)	302
7.3.1	Übergang von der Flachmagnet- zur Sammleranordnung	304
7.3.2	Zu erwartende TFM-Ergebnisse	311
8	Geschaltete Reluktanzmaschinen	314
	Prof. Heinz Bausch	
8.1	Einleitung	314
8.2	Aufbau	317
8.3	Betriebsverhalten	319
8.4	Energieumwandlung	328
8.5	Stromrichterschaltungen	331
8.6	Steuerung und Regelung	337
9	Linearmotoren	344
	Prof. Gerhard Henneberger	
9.1	Einführung	344
9.2	Technik von Linearmotoren	344
9.3	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten	352
9.4	Hochgeschwindigkeits-Anwendungen	354
10	Lagerlose Permanentmagnetmotoren	357
	Prof. Wolfgang Amrhein, Siegfried Silber	
10.1	Einleitung	357
10.2	Kraft- und Drehmomentberechnung	361
10.2.1	Magnetische Koenergie	362
10.2.2	Maxwellscher Spannungstensor	363
10.2.2.1	Fourier-Reihendarstellung der Feldgrößen	366
10.2.2.2	Drehmomentberechnung	368
10.2.2.3	Kraftberechnung	370
10.2.2.4	Interpretation der Ergebnisse	371
10.3	Ausführungsbeispiele zu lagerlosen Permanentmagnetmotoren .	372
10.4	Regelung und elektronische Ansteuerung	376
10.5	Lagerlose Motoren mit drei passiv stabilisierten Freiheitsgraden	381

11	Kleinantriebe	385
11.1	Schrittmotoren	385
11.1.1	Einführung, Funktionsprinzip	385
11.1.2	Grundtypen von Schrittmotoren	387
11.1.2.1	Reluktanz-Schrittmotor	387
11.1.2.2	Permanentmagnet-erregter Schrittmotor	389
11.1.2.3	Hybrid-Schrittmotor	391
11.1.3	Gegenüberstellung Drehfeld-Schrittfeld	393
11.1.4	Betriebskennlinien, Betriebsverhalten	394
11.1.4.1	Statischer Drehmomentverlauf	394
11.1.4.2	Statisches Lastverhalten	396
11.1.4.3	Einzelschritt-Fortschaltung	397
11.1.4.4	Grenzkennlinien, Betriebsbereiche	399
11.1.5	Ansteuerung, Leistungselektronik	402
11.1.5.1	Ersatzschaltbild eines Motorstrangs	402
11.1.5.2	Unipolare und bipolare Speisung der Strangwicklungen	402
11.1.5.3	Leistungstreiber	403
11.1.5.4	Betriebsarten: Voll-, Halb- und Mikroschrittbetrieb	405
11.1.5.5	Bestromungstabellen	408
11.1.6	Positioniergenauigkeit, Schrittwinkelfehler	409
11.1.7	Drehzahlverhalten, Resonanzfrequenzen	411
11.1.7.1	Parametrische Anregung	413
11.1.7.2	Dämpfung	415
11.1.8	Modellbildung	415
11.1.9	Auslegung von Schrittmotorantrieben	417
11.1.9.1	Ermittlung der Startgrenzfrequenz	419
11.1.9.2	Berechnung von linearen Frequenzrampen	420
11.2	Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschine	422
12	Umrichterantriebe	424
12.1	Direktumrichter	425
12.2	Untersynchrone Stromrichter-kaskade (USK)	430
12.3	Stromrichtermotor	435
12.3.1	Prinzipielle Funktion	436
12.3.2	Lastgeführte Kommutierung	439
12.3.3	Anfahrvorgang	442
12.3.4	Drehmomentpendelungen	444
12.3.5	Regelung des Stromrichtermotors	446
12.4	Selbstgeführter Stromrichter mit Phasenfolgelöschung und eingepprägtem Strom	447
12.4.1	Prinzipielles Systemverhalten	447
12.4.2	Kommutierung des selbstgeführten Stromrichters	449
12.4.3	Steuer- und Regelverfahren	458

Inhaltsverzeichnis	XIII
12.4.4 Weiterentwicklungen der selbstgeführten I-Umrichter	461
12.5 Selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis . .	462
12.5.1 Umrichter mit variabler Zwischenkreisspannung	463
12.5.2 Umrichter mit konstanter Zwischenkreisspannung (Pulsumrichter)	470
12.5.3 Modulationsverfahren bei Pulsumrichtern	473
12.5.4 Mehrpunkt-Wechselrichter	482
12.5.5 Leistungsfaktor-Korrektur (PFC)	487
13 Grundsätzliche Überlegungen zur Regelung von Drehfeld-	
maschinen	489
13.1 Entkopplung	490
13.2 Feldorientierung	492
Übungsaufgaben	496
Prüfungsaufgaben	537
Variablenübersicht	564
Literaturverzeichnis	579
Antriebstechnik und benachbarte Gebiete (Bücher)	579
Elektroantrieb allgemein	582
Leistungshalbleiter	582
Leistungselektronik: Ansteuerung, Beschaltung, Kühlung	585
Gleichstromsteller, DC-DC-Wandler	587
Netzgeführte Stromrichter: Schaltungstechnik und Auslegung	588
Netzgeführte Stromrichter: Regelung	590
Direktumrichter	595
Untersynchrone Kaskade (USK)	597
Stromrichteromotor	599
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)	602
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)	604
Asynchronmaschine: Regelung	606
Synchronmaschine	610
Reluktanzmaschine	611
Geberlose Reluktanzmaschine	618
Linearmotoren	619
Lagerlose Permanentmagnetmotoren	621
Kleinantriebe	623
Stichwortverzeichnis	625