

Klaus Fuest  
Peter Döring

**Elektrische Maschinen  
und Antriebe**

Klaus Fuest  
Peter Döring

# **Elektrische Maschinen und Antriebe**

**Lehr- und Arbeitsbuch**

Mit 258 Abbildungen, zahlreichen durchgerechneten Beispielen und Übungen sowie Fragen und Aufgaben zur Vertiefung des Lehrstoffes

4., überarbeitete und erweiterte Auflage



**Fuest, Klaus:**

Elektrische Maschinen und Antriebe: Lehr- und Arbeitsbuch/Klaus Fuest;  
Peter Döring. – 4., überarb. und erw. Aufl. – Braunschweig;  
Wiesbaden: Vieweg, 1999

1. Auflage 1983
- 2., durchgesehene Auflage 1985  
Nachdruck 1987
- 3., überarbeitete und erweiterte Auflage 1989
- 4., überarbeitete und erweiterte Auflage 1999

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1999

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH,  
Braunschweig/Wiesbaden, 1999



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

<http://www.vieweg.de>

Technische Redaktion: Hartmut Kühn von Burgsdorff  
Konzeption und Layout des Umschlags: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 978-3-528-34076-6 ISBN 978-3-663-01105-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-01105-7

---

## Vorwort

Das Buch vermittelt das Grundwissen über die Wirkungsweise elektrischer Maschinen und Antriebe, Rezepte für die Auslegung von Maschinen werden nicht gegeben, denn Berechnung und Konstruktion können nur durch praktische Erfahrung erlernt werden.

Der Stoffumfang ist abgestimmt auf das Niveau von Fach- und Fachhochschulen. Er soll dem Studierenden der Elektrotechnik oder des Maschinenbaus ein Wissen darüber vermitteln, was in den Maschinen vor sich geht und wie sie sich im Betrieb verhalten.

Aufgrund zahlreicher Leser Anregungen wurde das Kapitel 7 „Elektronische Antriebstechnik“ in das Buch neu aufgenommen. Mit zahlreichen Bildern und Diagrammen werden die Grundlagen der elektronischen Drehzahlsteuerung dargestellt.

Die hohen elektrischen Verluste, die sich bei der Drehzahlsteuerung ergeben, lassen sich erheblich mindern mit modernen Bauelementen der Leistungselektronik, wie z.B. Dioden, Thyristoren und Leistungstransistoren. Steuerbare Gleichrichter, aber auch Gleichstromsteller spielen hier eine wichtige Rolle.

Die elektronische Drehzahlsteuerung von Drehstromasynchronmaschinen bei konstantem Drehmoment mit Hilfe von Frequenzumformern ist ein wichtiger Teil des Kapitels. Der wachsenden Bedeutung dieses wartungsarmen Motors in der Automatisierungstechnik wird hier Rechnung getragen durch die Beschreibung und Darstellung von Anlaßmöglichkeiten, aber auch der Drehzahlsteuerung mit Hilfe der Frequenzumformer.

Die mathematischen Formulierungen werden bewußt auf einfache Zusammenhänge reduziert; Differential- und Integralrechnung wurden nicht verwendet.

Für eine Vertiefung des Stoffes stehen Verständnisfragen sowie ein umfangreiches Übungsangebot bereit.

Für die zur Verfügung stehende Zeit ist die Stofffülle bereits groß, sodaß eine ernsthafte Beschäftigung mit zusätzlicher Literatur für den Studierenden kaum möglich ist. Deshalb wird auf Literaturhinweise verzichtet.

Bremerhaven und Recklinghausen  
Im Oktober 1999

*Klaus Fuest  
Peter Döring*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b> .....	1
<b>1 Transformator</b> .....	4
1.1 Aufgaben des Transformators .....	4
1.2 Bauteile eines Transformators.....	4
1.2.1 Der Eisenkern .....	5
1.2.2.1 Kernbauart .....	5
1.2.1.2 Mantelbauart.....	6
1.2.2 Die Wicklungen .....	7
1.2.2.1 Die Scheibenwicklung .....	7
1.2.2.2 Zylinderwicklung.....	7
1.2.3 Die Kühlung.....	8
1.3 Das Betriebsverhalten des Einphasentransformators.....	8
1.3.1 Der Transformator bei Belastung.....	8
1.3.1.1 Ersatzschaltbild .....	9
1.3.1.2 Der Ersatzstromkreis.....	10
1.3.1.3 Das Zeigerdiagramm .....	13
1.3.1.4 Das Kappsche Diagramm .....	14
1.3.2 Der Transformator im Leerlaufbetrieb .....	15
1.3.2.1 Das Zeigerdiagramm im Leerlauf.....	16
1.3.2.2 Der Leerlaufversuch .....	16
1.3.3 Der Transformator bei Kurzschluß .....	18
1.3.3.1 Das Zeigerdiagramm bei Kurzschluß.....	18
1.3.3.2 Der Kurzschlußversuch .....	19
1.3.4 Der Wirkungsgrad des Transformators.....	21
1.3.5 Der Drehstromtransformator .....	22
1.3.5.1 Die Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren .....	23
1.3.5.2 Der Parallelbetrieb von Drehstromtransformatoren .....	24
1.4 Zusammenstellung der wichtigsten Formeln.....	25
1.5 Beispiele.....	26
<b>2 Gleichstrommaschinen</b> .....	32
2.1 Der Aufbau der Gleichstrommaschine .....	32
2.1.1 Der Ständer .....	32
2.1.2 Der Läufer.....	33

2.2	Die Wirkungsweise der Gleichstrommaschine .....	35
2.2.1	Grundlagen .....	35
2.2.2	Der Trommelanker.....	36
2.2.3	Der Motorbetrieb .....	37
2.2.4	Der Generatorbetrieb .....	39
2.2.5	Die Wendepol- und Kompensationswicklung .....	40
2.3	Die Grundgleichungen .....	42
2.3.1	Spannungen .....	42
2.3.2	Leistungen .....	42
2.3.3	Moment .....	42
2.3.4	Drehzahl.....	43
2.4	Das Betriebsverhalten .....	44
2.4.1	Schaltungsarten der Erregerwicklung .....	44
2.4.2	Die fremderregte Gleichstrommaschine .....	45
2.4.2.1	Der fremderregte Gleichstromgenerator .....	45
2.4.2.2	Der fremderregte Gleichstrommotor.....	46
2.4.3	Die Gleichstrom-Nebenschlußmaschine.....	54
2.4.3.1	Der Gleichstrom-Nebenschlußgenerator .....	54
2.4.3.2	Der Gleichstrom-Nebenschlußmotor .....	60
2.4.4	Die Gleichstrom-Reihenschlußmaschine .....	61
2.4.4.1	Der Gleichstrom-Reihenschlußgenerator.....	61
2.4.4.2	Der Gleichstrom-Reihenschlußmotor .....	62
2.4.5	Die Gleichstrom-Doppelschlußmaschine .....	67
2.4.5.1	Der Gleichstrom-Doppelschlußgenerator .....	68
2.4.5.2	Der Gleichstrom-Doppelschlußmotor.....	69
2.5	Zusammenstellung der wichtigsten Formeln.....	70
2.6	Beispiele.....	70
<b>3</b>	<b>Drehfeld.....</b>	<b>78</b>
<b>4</b>	<b>Drehstrom-Asynchronmaschine.....</b>	<b>80</b>
4.1	Aufbau der Asynchronmaschine .....	80
4.2	Wirkungsweise der Drehstromasynchronmaschine.....	81
4.3	Betriebsverhalten der DAsM.....	85
4.3.1	Die Leistungsbilanz .....	85
4.3.2	Das Drehmoment.....	86
4.3.3	Die Ortskurve des Ständerstromes .....	86
4.3.4	Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie.....	91
4.3.5	Das vereinfachte Kreisdiagramm .....	92
4.4	Der Schleifringläufer mit Vorwiderständen im Läuferkreis .....	94
4.5	Anlaßmethode für Kurzschlußläufer .....	95

4.6	Drehzahlsteuerung und elektrische Bremsung .....	98
4.7	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen .....	99
4.8	Beispiele.....	101
<b>5</b>	<b>Drehstrom-Synchronmaschine .....</b>	<b>106</b>
5.1	Die Bauarten der Synchronmaschine .....	106
5.2	Der Aufbau der Innenpolmaschine.....	107
5.3	Die Wirkungsweise der Synchronmaschine .....	108
5.3.1	Der Synchrongenerator .....	109
5.3.2	Der Synchronmotor .....	112
5.4	Das Betriebsverhalten der Synchronmaschine.....	113
5.4.1	Die Ortskurve des Ständerstromes .....	113
5.4.2	Das Drehmoment.....	118
5.4.3	Anlauf von Synchronmotoren.....	119
5.4.4	Der Synchronisierungsvorgang.....	119
5.5	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen .....	120
5.6	Beispiele.....	121
<b>6</b>	<b>Wechselstrommaschinen.....</b>	<b>126</b>
6.1	Die Einphasen-Reihenschlußmaschine.....	126
6.2	Die Einphasen-Asynchronmaschine .....	127
6.3	Die Einphasen-Synchronmaschine.....	128
<b>7</b>	<b>Elektronische Antriebstechnik .....</b>	<b>130</b>
7.1	Einführung.....	130
7.2	Bauelemente der Leistungselektronik .....	131
7.2.1	Dioden .....	131
7.2.2	Thyristoren.....	133
7.2.3	Schutz der Dioden und Thyristoren .....	134
7.2.4	SIPMOS-Transistoren.....	135
7.2.5	IGBT.....	136
7.3	Betrachtungen der Leistungselektronik .....	138
7.3.1	Gleichrichterschaltungen .....	138
7.3.2	Ungesteuerte Gleichrichter .....	139
7.3.2.1	Einpulsleichrichter .....	139
7.3.2.2	Zweipulsleichrichter (M2, B2).....	140
7.3.2.3	Dreipulsmittpunktschaltung (M3).....	141
7.3.2.4	Drehstrombrückenschaltung (B6).....	143
7.3.3	Gesteuerte Gleichrichter .....	144
7.3.3.1	Thyristor im Halbwellenbereich .....	144

7.3.3.2	Gesteuerter Einweggleichrichter bei ohmsch-induktiver Last .....	145
7.3.3.3	Gesteuerter Brückengleichrichter bei induktiv-ohmscher Last .....	146
7.3.3.4	Gesteuerte Dreipulsmittelpunktschaltung bei induktiv-ohmscher Last .....	149
7.3.3.5	Gesteuerte Drehstrombrückenschaltung bei induktiv-ohmscher Last .....	152
7.4	Übersicht Elektronische Antriebstechnik.....	153
7.5	Elektronische Steuerung von GS-Maschinen.....	156
7.5.1	GS-Maschinen am AC-Netz .....	158
7.5.1.1	Anlassen von Gleichstrom-Motoren über Stromrichter .....	158
7.5.1.2	Drehzahlsteuerung von Gleichstrommaschinen.....	160
7.5.2	GS-Maschinen am DC-Netz .....	165
7.5.3	Beispielaufgaben .....	170
7.6	Elektronische Steuerung von Drehstrom-Asynchron-Motoren.....	172
7.6.1	Allgemeines.....	172
7.6.2	Steuerung der Ständerspannung.....	173
7.6.3	Beeinflussung der Läufergrößen.....	175
7.6.4	Drehzahlsteuerung mit elektronischer Frequenzverstellung.....	178
7.6.4.1	Zwischenkreis-Umrichter .....	180
7.6.4.1.1	Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)....	181
7.6.4.1.2	Spannungszwischenkreisumrichter .....	183
7.6.4.2	Direktumrichter.....	187
7.6.5	Beispielaufgaben .....	188
<b>8</b>	<b>Ansteuerungen.....</b>	<b>191</b>
<b>9</b>	<b>Repetitorium.....</b>	<b>197</b>
9.1	Verständnisfragen .....	197
9.2	Übungsaufgaben.....	205
<b>Anhang A</b>	<b>Lösungen zu den Aufgaben.....</b>	<b>210</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Kennzeichnung der Anschlüsse elektrischer Betriebsmittel.....</b>	<b>213</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>214</b>