

# Teubner Studienbücher

## Elektrotechnik/Maschinenbau

- Eckhardt: **Grundzüge der elektrischen Maschinen.** DM 34,—  
 Elsner: **Nachrichtentheorie**  
 Band 1: Grundlagen. DM 18,80  
 Band 2: Der Übertragungskanal. DM 18,80  
 Heinlein: **Grundlagen der faseroptischen Übertragungstechnik.** DM 29,80  
 Heumann: **Grundlagen der Leistungselektronik.** 3. Aufl. DM 36,—  
 Klein: **Finite Systemtheorie.** DM 26,80  
 Lautz: **Elektromagnetische Felder.** 3. Aufl. DM 29,80  
 Leonhard: **Regelung in der elektrischen Antriebstechnik.** DM 32,—  
 Leonhard: **Regelung in der elektrischen Energieversorgung.** DM 32,—  
 Leonhard: **Statistische Analyse linearer Regelsysteme.** DM 29,80  
 Matthies: **Einführung in die Ölhydraulik.** DM 34,—  
 Michel: **Zweit-Ordnung mit Leistungswellen.** DM 28,80  
 Profos: **Einführung in die Systemdynamik.** DM 32,—  
 Profos: **Meßfehler.** DM 28,80  
 Schaufelberger: **Echtzeit-Programmierung bei Automatisierungssystemen.** DM 29,80  
 Stölting/Beisse: **Elektrische Kleinmaschinen.** DM 38,—

## Physik/Chemie

- Becher/Böhm/Joos: **Eichtheorien der starken und elektroschwachen Wechselwirkung.**  
 2. Aufl. DM 38,—  
 Bourne/Kendall: **Vektoranalysis.** DM 24,80  
 Daniel: **Beschleuniger.** DM 26,80  
 Eischenbroich/Salzer: **Organometalchemie.** DM 42,—  
 Engelke: **Aufbau der Moleküle.** DM 38,—  
 Goetzberger/Wittwer: **Sonnenenergie.** DM 24,80  
 Gross/Runge: **Vielteilchentheorie.** DM 38,—  
 Großer: **Einführung in die Teilchenoptik.** DM 23,80  
 Großmann: **Mathematischer Einführungskurs für die Physik.** 4. Aufl. DM 32,—  
 Heil/Kitzka: **Grundkurs Theoretische Mechanik.** DM 39,—  
 Heinloth: **Energie.** DM 39,80  
 Kamke/Krämer: **Physikalische Grundlagen der Maßeinheiten.** DM 21,80  
 Kleinknecht: **Detektoren für Teilchenstrahlung.** 2. Aufl. DM 28,80  
 Kneubühl: **Repetitorium der Physik.** 2. Aufl. DM 44,—  
 Kopitzki: **Einführung in die Festkörperphysik.** DM 34,—  
 Kunze: **Physikalische Meßmethoden.** DM 24,80

Fortsetzung auf der letzten Textseite

# **Elektrische Kleinmaschinen**

**Eine Einführung**

**Von Dr.-Ing. Hans-Dieter Stölting  
Professor an der Universität Hannover**

**und Dr.-Ing. Achim Beisse  
Akad. Rat an der Universität Stuttgart**

**Mit 233 Bildern**



**B. G. Teubner Stuttgart 1987**

**Prof. Dr.-Ing. Hans-Dieter Stölting**

1938 in Oldenburg i. O. geboren. 1959 bis 1966 Studium der Elektrotechnik an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und an der Universität Stuttgart. 1966 Wissenschaftlicher Angestellter bzw. Assistent am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der Universität Stuttgart. 1974 Fa. Siemens AG, Würzburg, Entwicklung von Kleinmaschinen. 1977 Oberingenieur an der Universität Stuttgart. Seit 1980 Professor am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der Universität Hannover, Lehrgebiet Elektrische Kleinmaschinen.

**Dr.-Ing. Achim Beisse**

1945 in Göppingen geboren. 1965 bis 1970 Studium der Elektrotechnik an der Universität Stuttgart. 1970 Wissenschaftlicher Assistent an der Universität Stuttgart. 1977 Fa. Bauknecht, Stuttgart, Leiter der Berechnungsabteilung. Seit 1980 Akademischer Rat an der Universität Stuttgart.

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

**Stölting, Hans-Dieter:**

Elektrische Kleinmaschinen : e. Einf. /  
von Hans-Dieter Stölting u. Achim Beisse. –  
Stuttgart : Teubner, 1987  
(Teubner-Studienbücher : Elektrotechnik)

NE: Beisse, Achim:

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

ISBN 978-3-519-06321-6      ISBN 978-3-663-01104-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-663-01104-0

© B. G. Teubner Stuttgart 1987

Satz: Elsner & Behrens GmbH, Oftersheim

Umschlaggestaltung: M. Koch, Reutlingen

## Vorwort

Während in den letzten Jahren zahlreiche Bücher über elektrische Maschinen mittlerer oder großer Leistung erschienen sind, wurden nur wenige Fachbücher, die sich mit elektrischen Kleinmaschinen befassen, herausgegeben. Dabei nimmt die wirtschaftliche Bedeutung der elektrischen Kleinmaschinen ständig zu. Ihre Einsatzmöglichkeiten in Industrie, Werkstatt und Haushalt sind in den letzten Jahren rasch gewachsen und werden auch in Zukunft weiter ansteigen. Die Entwicklung der Elektronik (billigere, kompaktere und flexiblere Schaltungen) und der Werkstoffe (z. B. hochwertigere Magnet- und Isolier-Werkstoffe) sowie neue Konstruktionsprinzipien machen es möglich, motorisch angetriebene Geräte zu entwickeln, die dem Menschen immer mehr Tätigkeiten erleichtern oder gar ganz abnehmen. Die Anforderungen, die dabei an die Motoren gestellt werden, sind mittlerweile so unterschiedlich, daß es heute eine fast unüberschaubare Vielfalt von Bauformen gibt.

Die anhaltende Suche nach dem optimalen Antrieb, die immer wieder neue Impulse durch die technische Entwicklung und die steigenden Ansprüche an die Möglichkeiten eines Gerätes erhält, hat zur Folge, daß die Antriebskonzepte einem steten Wandel unterworfen sind. Für den Hersteller wie für den Anwender elektrischer Kleinmaschinen ist es daher notwendig, nicht nur die Eigenschaften, wie zum Beispiel die Vor- und Nachteile einer Motorenart zu kennen, sondern auch deren physikalische Ursachen zu durchschauen, um sie gezielt nutzen bzw. mindern oder unterdrücken zu können.

Der Einblick in die prinzipielle Wirkungsweise der verschiedenen Kleinmaschinentypen ist oft schwieriger, ihre elektromagnetische Berechnung vielfach aufwendiger als bei großen Maschinen. Bei Kleinmaschinen werden zudem häufig physikalische und konstruktive Prinzipien angewendet, die im Großmaschinenbau nicht üblich sind. Ihr Aufbau ist oft unsymmetrisch, die Kompensation unerwünschter Erscheinungen aus technischen oder Kostengründen nicht möglich. Sonst übliche Näherungen bei der Berechnung sind wegen der geringen geometrischen Abmessungen nicht zulässig. Die Ausnutzung der Motoren infolge des geringen Einbauvolumens oder infolge von Gewichtsbeschränkungen wird immer höher getrieben. Hinzu kommt, daß bei elektronischer Speisung, die für immer mehr Motortypen angewendet wird, Wechselspannungen nicht mehr sinusförmig und Gleichspannungen nicht mehr zeitlich konstant sind. Herkömmliche Verfahren zur Ermittlung des Betriebsverhaltens sind dadurch häufig nicht mehr anwendbar oder durch den Einsatz von Rechenmaschinen überholt.

Das vorliegende Buch basiert auf einer langjährigen Lehrtätigkeit und auf Erfahrungen aus der Praxis. Es soll Studenten an Universitäten und Fachhochschulen als eine Einführung in das Gebiet der elektrischen Kleinmaschinen dienen und den in der Praxis tätigen Technikern und Ingenieuren bei der Bewältigung der geschilderten Probleme hilfreich sein. Vorausgesetzt werden allgemeine Grundkenntnisse der Wirkungsweise und des Betriebsverhaltens elektrischer Maschinen.

Dieses Buch soll helfen, eine Lücke zu schließen, denn in der deutschsprachigen Fachliteratur gibt es zur Zeit kein Buch, das in einheitlicher Darstellung in die Wirkungsweise und das Betriebsverhalten elektrischer Kleinmaschinen einführt. Ältere Bücher sind ver-

griffen oder entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik. Neuere Bücher befassen sich fast ausschließlich mit dem Betriebsverhalten, ohne näher auf die physikalischen Hintergründe einzugehen. Ausnahmen sind wenige Einzeldarstellungen bestimmter Kleinmaschinen-Typen.

Es wird das ganze Gebiet der Kleinmaschinen behandelt, wobei allerdings Motoren, die sehr selten oder wieder vom Markt verschwunden sind, nicht berücksichtigt wurden. Der Aufbau der einzelnen Motorarten, ihre Vor- und Nachteile und ihre Haupteinsatzgebiete werden dargestellt. Die Herleitung der Grundgleichungen, die zur Untersuchung des Betriebsverhaltens dienen, und die Beschreibung des prinzipiellen Vorgehens bei der Berechnung der Maschinen bilden den inhaltlichen Schwerpunkt des Buches. Auf alle Einzelheiten kann dabei nicht eingegangen werden, weil das den Rahmen des Buches sprengen würde. Mit Hilfe der vermittelten Kenntnisse ist es aber möglich, sich selbständig in die weiterführende Fachliteratur einzuarbeiten und das fehlende Wissen anzueignen, um z. B. magnetische Kreise, Widerstände oder Induktivitäten berechnen zu können.

Wir möchten nicht unerwähnt lassen, daß wir aus Vorlesungen unseres Lehrers, Herrn Prof. Büssing, einige Anregungen übernommen haben. Herrn Dipl.-Ing. Georg Möller danken wir für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und für seine Verbesserungsvorschläge, insbesondere zum Abschnitt über den Wechselstrom-Synchronmotor, Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Lebsanft für seine Diskussionsbereitschaft und für seine Ratschläge. Dem Teubner-Verlag danken wir für die Mühe und Sorgfalt bei der Erstellung dieses Buches.

Hannover, Stuttgart, im Dezember 1986

Hans-Dieter Stölting, Achim Beisse

# Inhaltsverzeichnis

## 1 Einleitung

1.1 Allgemeines . . . . .	9
1.2 Geschichte . . . . .	10
1.3 Wirtschaftliche Bedeutung . . . . .	11

## 2 Wechselstrom-Asynchronmotor

2.0 Einleitung . . . . .	12
2.1 Aufbau . . . . .	12
2.2 Ausführungsarten . . . . .	14
2.2.1 Allgemeines . . . . .	14
2.2.2 Einsträngiger Motor . . . . .	15
2.2.3 Zweisträngige Motoren . . . . .	18
2.2.3.1 Kondensator-Motor. 2.2.3.2 Widerstandshilfsstrang-Motor. 2.2.3.3 Motor mit induktivem Reihenwiderstand. 2.2.3.4 Motor mit kurzgeschlossenem Hilfsstrang	
2.2.4 Dreisträngige Motoren . . . . .	20
2.2.5 Wicklungsausführungen . . . . .	20
2.2.5.1 Symmetrische Wicklungen. 2.2.5.2 Quasisymmetrische Wicklungen. 2.2.5.3 Unsymmetrische Wicklungen	
2.3 Drehfelder in Wechselstrom-Asynchronmaschinen . . . . .	22
2.3.1 Allgemeines . . . . .	22
2.3.2 Elliptische Drehfelder . . . . .	24
2.3.3 Symmetrischer Betrieb . . . . .	26
2.3.3.1 Zweisträngiger Motor. 2.3.3.2 Dreisträngiger Motor. 2.3.3.3 Zusammenfassung	
2.4 Grundgleichungen für Ströme und Spannungen . . . . .	36
2.4.1 Dreisträngiger Motor . . . . .	36
2.4.2 Zweisträngiger Motor . . . . .	43
2.5 Motor mit verteilter Ständerwicklung . . . . .	45
2.5.1 Grundwellenverhalten . . . . .	45
2.5.1.1 Leitwertortskurve. 2.5.1.2 Zweisträngiger Motor mit symmetrischer oder quasisymmetrischer Wicklung. 2.5.1.3 Zweisträngiger Motor mit unsymmetrischer Wicklung. 2.5.1.4 Dreisträngiger Motor mit symmetrischer Wicklung	
2.5.2 Asynchrone Oberfeldmomente . . . . .	64
2.5.3 Anpassung an Antriebsforderungen . . . . .	70
2.5.3.1 Hochlauf. 2.5.3.2 Drehrichtungsumkehr. 2.5.3.3 Drehzahlstellung. 2.5.3.4 Drehzahlregelung. 2.5.3.5 Spannungsumschaltung	

## 6 Inhaltsverzeichnis

2.6 Motor mit konzentrierter Ständerwicklung . . . . .	75
2.6.1 Motor mit zweisträngiger Ständerwicklung . . . . .	75
2.6.2 Spaltpolmotor . . . . .	76
2.6.2.1 Ausführungsarten. 2.6.2.2 Wirkungsweise. 2.6.2.3 Betriebsverhalten. 2.6.2.4 Anpassung an Antriebsforderungen	
2.6.3 Motor mit einsträngiger Ständerwicklung . . . . .	83

## 3 Wechselstrom-Synchronmotor

3.0 Einleitung . . . . .	84
3.1 Reluktanzmotor . . . . .	84
3.1.1 Wirkungsweise . . . . .	84
3.1.2 Ausführungsarten . . . . .	85
3.1.2.1 Läufer mit ausgefrästen Polen. 3.1.2.2 Läufer mit Flußsperrern	
3.1.3 Stationäres Betriebsverhalten . . . . .	86
3.1.3.1 Synchronbetrieb. 3.1.3.2 Asynchroner Hochlauf	
3.2 Hysteresemotor . . . . .	90
3.2.1 Ausführungsarten . . . . .	90
3.2.2 Wirkungsweise und Betriebsverhalten . . . . .	91
3.3 Magnetläufermotor . . . . .	95
3.3.1 Ausführungsarten . . . . .	95
3.3.2 Stationäres Betriebsverhalten . . . . .	96
3.3.2.1 Synchronbetrieb. 3.3.2.2 Asynchroner Hochlauf	

## 4 Universalmotor

4.0 Einleitung . . . . .	106
4.1 Aufbau . . . . .	106
4.2 Wirkungsweise . . . . .	111
4.3 Induzierte Spannungen . . . . .	113
4.3.1 Überblick . . . . .	113
4.3.2 Rotatorisch und transformatorisch induzierte Ankerspannung . . . . .	114
4.3.2.1 Rotatorisch induzierte Ankerspannung. 4.3.2.2 Transformatorisch induzierte Ankerspannung. 4.3.2.3 Induzierte Spannungen bei Verschiebung der Bürsten aus der neutralen Achse	
4.4 Kommutierung . . . . .	120
4.4.1 Stromwendespannung . . . . .	123
4.4.2 In der kurzgeschlossenen Spule rotatorisch induzierte Spannung . . . . .	124
4.4.3 In der kurzgeschlossenen Spule transformatorisch induzierte Spannung . . . . .	126
4.4.4 Zusammenwirken der drei in der kurzgeschlossenen Spule induzierten Spannungen . . . . .	128

4.5	Betriebsverhalten . . . . .	130
4.5.1	Ersatzschaltbild . . . . .	131
4.5.2	Zeigerdiagramm . . . . .	131
4.5.3	Leistungsbilanz . . . . .	132
4.6	Drehzahlstellung und Drehzahlregelung . . . . .	134
4.6.1	Gleichstromzusatzwicklung . . . . .	134
4.6.2	Wicklungsanzapfung . . . . .	135
4.6.3	Vorwiderstand . . . . .	135
4.6.4	Transformator . . . . .	135
4.6.5	Parallelwiderstand . . . . .	136
4.6.6	Barkhausenschaltung . . . . .	136
4.6.7	Phasenanschnittsteuerung . . . . .	136
4.6.8	Drehzahlregelung . . . . .	138

## 5 Permanentmagnetmotor

5.0	Einleitung . . . . .	139
5.1	Ausführungsarten . . . . .	139
5.2	Magnete . . . . .	141
5.2.1	Werkstoffe . . . . .	141
5.2.2	Magnetisierungskennlinie . . . . .	142
5.3	Magnetischer Kreis eines Permanentmagnetmotors . . . . .	143
5.3.1	Grundgleichungen . . . . .	143
5.3.2	Einfluß der Sättigung . . . . .	147
5.3.3	Ersatzschaltung des dauermagnetischen Kreises . . . . .	149
5.3.4	Ankerquerfeld . . . . .	150
5.3.5	Polfluß . . . . .	155
5.3.6	Streuung des Dauermagneten . . . . .	156
5.3.7	Stabilität des Dauermagneten . . . . .	157
5.4	Betriebsverhalten . . . . .	158
5.4.1	Auslegung des magnetischen Kreises . . . . .	158
5.4.2	Ersatzschaltbild, Kennlinien und Leistungsbilanz . . . . .	159
5.5	Permanentmagnetmotor an einem Pulssteller . . . . .	161
5.6	Permanentmagnetmotor am Wechselspannungsnetz . . . . .	163
5.6.1	Ungeglätteter Motorstrom . . . . .	165
5.6.2	Vollständig geglätteter Motorstrom . . . . .	166
5.7	Dreibürstenmotor . . . . .	167
5.8	Gleichstrommotoren mit eisenlosem Läufer . . . . .	169
5.8.1	Scheibenläufermotor . . . . .	169
5.8.2	Glockenläufermotor . . . . .	171

## 6 Elektronikmotor

6.0	Einleitung . . . . .	172
6.1	Grundsätzliche Wirkungsweise . . . . .	172



**8 Inhaltsverzeichnis**

6.2 Ausführungsarten . . . . . 173  
6.2.1 Einsträngiger, einpulsiger Motor . . . . . 174  
6.2.2 Zweisträngiger, zweipulsiger Motor . . . . . 175  
6.2.3 Dreisträngiger, dreipulsiger Motor . . . . . 176  
6.2.4 Viersträngiger, vierpulsiger Motor . . . . . 177  
6.2.4.1 90°-Schaltung. 6.2.4.2 180°-Schaltung  
6.2.5 Sonderausführungen . . . . . 186  
6.3 Betriebsverhalten . . . . . 187  
6.4 Drehzahlregelung . . . . . 188

**7 Schrittmotoren**

7.0 Einleitung . . . . . 189  
7.1 Ausführungsarten . . . . . 190  
7.1.1 Allgemeines . . . . . 190  
7.1.2 Wechsepol-Typ . . . . . 194  
7.1.3 Gleichpol-Typ . . . . . 195  
7.1.4 Sonstige Ausführungen . . . . . 197  
7.2 Ansteuerung . . . . . 199  
7.3 Dämpfung . . . . . 202  
7.4 Kenndaten, Kennlinien . . . . . 202  
7.4.1 Statische Momentenkennlinie . . . . . 203  
7.4.2 Dynamische Momentenkennlinie . . . . . 204  
7.4.3 Schrittwinkelfehler . . . . . 206  
7.5 Betriebsverhalten . . . . . 207  
7.5.1 Spannungsgleichung . . . . . 209  
7.5.2 Momentengleichung . . . . . 211  
7.5.3 Dynamisches Verhalten . . . . . 212  
7.5.4 Statisches Verhalten . . . . . 213

**Formelzeichen** . . . . . 214

**Literatur** . . . . . 218

**Sachverzeichnis** . . . . . 224