WWW.PEARSON-STUDIUM.DE
CWS
COMPANION WEBSITE

Wilfried Hofmann

Elektrische Maschinen

Lehr- und Übungsbuch

ALWAYS LEARNING

PEARSON

Inhaltsübersicht

Vorwort		13
Kapitel 1	Grundlagen der elektromagnetischen Energiewandlung	15
Kapitel 2	Transformatoren	85
Kapitel 3	Stromwendermaschinen	145
Kapitel 4	Grundlagen der Drehfeldmaschinen	197
Kapitel 5	Induktionsmaschinen	223
Kapitel 6	Synchronmaschinen	295
Kapitel 7	Kleinmaschinen	371
Kapitel 8	Linearmaschinen	415
Kapitel 9	Sekundärfunktionen	435
Anhang A	Formelzeichenverzeichnis	449
Register		455

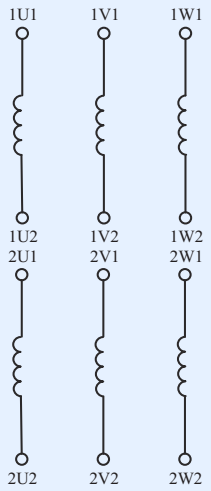

Abbildung 2.58 Zweiwicklungs-Drehstromtransformator

5 Bestimmung der Ersatzschaltbildparameter aus den Leistungsschildangaben

Für einen Drehstromtransformator, der primär- und sekundärseitig in Stern geschaltet ist und die Nennwerte S_N=100 kVA, U_{1N}/U_{2N}=20 kV/0,4 kV besitzt, sind nach IEC-Norm festgelegt:

– das Verhältnis von Leerlaufstrom zu Nennstrom mit 2,5 %,
– die Leerlaufverluste von 0,32 kW,
– die Kurzschlussverluste von 1,75 kW,
– die Kurzschlussspannung von 0,8 kV.

Bestimmen Sie die Parameter des Ersatzschaltbildes unter der zulässigen Näherung, dass gilt:

$$R_1 : R_2' : X_{1\sigma} : X_{2\sigma}' : X_h : R_{Fe} = 1:1:2:2:1000:10000$$

6 Bestimmung der Ersatzschaltbildparameter aus Prüffeldmessungen

Gegeben ist ein Drehstromtransformator mit der Nennleistung von P_N=100 kVA. Primär- und Sekundärwicklung sind in Stern geschaltet. Aus Leerlauf- und Kurzschlussmessungen sind bekannt:

– Leerlaufwirkleistung: P_0=0,32 kW
– Leerlaufprimärspannung: U_{10}=20 kV
– Leerlaufsekundärspannung: U_{20}=0,4 kV
– Leerlaufstrom: I_0=0,0723 A
– Kurzschlusswirkleistung: P_k=1,75 kW
– Kurzschlussspannung: U_k=0,8 kW
– Kurzschlussstrom: I_k=2,89 A

Ermitteln Sie die Parameter des einpoligen vollständigen Ersatzschaltbildes.

Wie groß ist die sekundäre Klemmenspannung bei Nennstrom und einem Leistungsfaktor cosφ=0,8 (ind.) nach dem vereinfachten Ersatzschaltbild?

7 Kurzschluss eines Drehstromtransformators

Von einem Drehstromtransformator in Sternschaltung sind bekannt:

– Nennwirkleistung: $P_{1N}=500$ kW
– Nennleistungsfaktor: $\cos\varphi=1$
– Nennspannung: $U_{1N}=20$ kV
– Wirkungsgrad: $\eta=0{,}983$
– Nennverlustverhältnis: $P_{VFeN}/P_{VCuN}=0{,}15$
– Kurzschlussleistungsfaktor: $\cos\varphi_k=0{,}246$

Berechnen Sie die relative Kurzschlussspannung und den primären Dauerkurzschlussstrom.

8 Ermitteln Sie die günstigste Verlustaufteilung im Transformator, bei dem der Wirkungsgrad sein Maximum erreicht, und stellen sie diesen in bezogener Form in Abhängigkeit des Belastungszustands dar.

9 Stellen Sie das Flächenprodukt aus Fenster- und Schenkelfläche eines Kerntransformators über der Scheinleistung und der Frequenz als Maß für die Baugröße dar, wenn eine Stromdichte von $J_{zul}=5$ A/mm^2 und eine Induktion von $B_{zul}=1{,}7$ T vorausgesetzt werden können.

10 Stellen Sie das Flächenprodukt aus Fenster- und Schenkelfläche eines Kerntransformators über der Scheinleistung und der Frequenz als Maß für die Baugröße dar, wenn eine Stromdichte von $J_{zul}=5$ A/mm^2 und eine Induktion von $B_{zul}=1{,}7$ T vorausgesetzt werden können.

11 Berechnung einer berührungslosen Energieübertragung für ein Batterieladegerät [2.8]

Für eine berührungslose Energieübertragung, die bei einer Resonanzfrequenz von 20 kHz betrieben wird, kann das Ersatzschaltbild eines Transformators verwendet werden. Von diesem sind die folgenden Parameter bekannt:

– Primärseitige Streuinduktivität: $L_{1\sigma}=520\ \mu$H
– Sekundärseitige Streuinduktivität. $L_{2\sigma}=495\ \mu$H
– Hauptinduktivität: $L_h=190\ \mu$H
– Sekundärseitiger Widerstand $R_2=100$ mΩ
– Primärwindungszahl: $w_1=30$
– Sekundärwindungszahl: $w_2=10$

Berechnen Sie die übertragbare Ausgangsleistung und den Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Lastwiderstands.

Nach welchen Gesichtspunkten könnte der Bemessungspunkt festgelegt werden? Geben Sie diesen an.

Wie wirkt sich eine Erhöhung der Resonanzfrequenz auf die Ausgangsleistung und den Wirkungsgrad aus?

12 Wirkungsgradmaximum einer berührungslosen Energieübertragung

Für das Beispiel in Abschnitt 2.4.6 soll der Lastwiderstand so gewählt werden, dass der Wirkungsgrad der Energieübertragung ein Maximum erreicht. Gegeben sind folgende Parameter des Übertragers:

– Primärseitige Streuinduktivität: $L_{1\sigma}$=0,052 μH
– Sekundärseitige Streuinduktivität. $L_{2\sigma}$=0,052 μH
– Hauptinduktivität: L_h=0,351 μH
– Primärseitiger Widerstand R_1=0,232 mΩ
– Sekundärseitiger Widerstand R_2=0,232 mΩ
– Primärwindungszahl: w_1=30
– Sekundärwindungszahl: w_2=10

WWW.PEARSON-STUDIUM.DE CWS COMPANION WEBSITE
Lösungen

Prüfungsfragen

1 Erklären Sie, warum ein Transformator in Mantelbauweise Vorteile beim Betriebsverhalten zeigt und eine günstigere Baugröße aufweist als ein vergleichbarer Kerntransformator.

2 Warum ist es zweckmäßig, die Ummagnetisierungsverluste durch einen Eisenverlustwiderstand im Querzweig des Transformator-Ersatzschaltbildes nachzubilden?

3 Warum sollten bei einer Parallelschaltung von zwei Transformatoren deren bezogene Kurzschlussspannungen gleich sein?

4 Erläutern Sie die Unterschiede der Spannungs- und Stromkurvenformen bei Stern- und Dreieckschaltung leerlaufender Drehstromtransformatoren.

5 Schätzen Sie die maximal übertragbare Leistung für ein induktiv wirkendes Batterieladegerät ab, wenn ein maximaler Luftspalt von 20 mm nicht überschritten werden soll.

6 Welches Magnetfeld ist beim Transformator Übertrager der Leistung?

7 Welche Leistung steht auf dem Leistungsschild eines Drehstromtransformators?

8 Wozu nimmt ein Transformator Blindleistung aus dem Netz auf?

9 Was sagt die bezogene Kurzschlussspannung auf dem Leistungsschild des Transformators aus?

10 Mit welcher Schaltung eines Drehstromtransformators kann man eine Symmetrierung bei unsymmetrischer Belastung vornehmen?

11 Was drückt die Bezeichnung Dy11 beim Transformator aus?

12 Welche Leistung nimmt ein leerlaufender Transformator aus dem Netz auf?

13 Welche Transformatorparameter können aus den Messergebnissen des Leerlaufversuchs bestimmt werden?

14 Welche Transformatorparameter können aus den Messergebnissen des Kurzschlussversuchs bestimmt werden?

Zusammenfassung

Transformatoren sind ruhende Energiewandler, die zur Spannungs- bzw. Stromanpassung in Wechsel- und Drehstromnetzen dienen und dabei das magnetische Streufeld als energieübertragendes Medium benutzen. Sie werden meistens als Volltransformatoren mit induktiver Übertragung ausgeführt. Der Spartransformator kombiniert die induktive und galvanische Energieübertragung und spart an Baugröße.

Zur Leistungsübertragung in der Energieverteilung werden Drehstromtransformatoren in Zwei- bzw. Dreiwicklungsausführung eingesetzt, die sich zur Steigerung der Leistungsübertragung parallel schalten lassen. Der Wirkungsgrad von Leistungstransformatoren ist in der Regel größer 99%.

Die Parameter von Transformatoren können über den Leerlauf- und den Kurzschlussversuch experimentell ermittelt werden. Das Prinzip des Transformators findet neben der Energieübertragung Anwendung in der Messtechnik als Spannungswandler bzw. Stromwandler, die die potentialfreie Messung energietechnischer Größen gestatten.

Literatur

[2.1] Dietrich, W.: Transformatoren. VDE-Verlag, Offenbach 1998

[2.2] Vidmar, M.: Die Transformatoren. Birkhäuser Verlag, Basel (CH), 3. Auflage, 1956

[2.3] Abts, H. J.: Verteilungstransformatoren, Hüthig 2006

[2.4] Janns, R.: Nagel, H.: Transformatoren. VDE-Verlag 2005

[2.5] Baier, P.: Dreiphasen-Leistungstransformatoren: Magnetisierungserscheinungen, Harmonische, Betriebsvorgänge, Stell- und Stromrichtertransformatoren, VDE-Verlag 2009

[2.6] Seifert, G.: Stelltransformatoren. Hüthig 1982

[2.7] Schröder, D.: Leistungselektronische Schaltungen. 2. Auflage, Springer, 2008

[2.8] Schedler, D.: Kontaktlose Energieübertragung, Verlag Moderne Industrie SEW EURODRIVE, Landsberg 2009

[2.9] Rückl, L.: Energiefluss beim Transformator. ETZ Elektrotechnik und Automation, Band 117 (1996) H. 1-2, S. 28-32, VDE-Verlag, Offenbach

[2.10] Richter, R.: Elektrische Maschinen Band 3: Transformatoren, Birkhäuser, Basel 1963

[2.11] Küchler, R.: Die Transformatoren. Grundlage für ihre Berechnung und Konstruktion. Springer, 1966

[2.12] Bödelfeld, T.; Sequenz, H.: Elektrische Maschinen. 6. Auflage, Springer, 1962

[2.13] Schwab, A. J.: Elektroenergiesysteme. Springer, Berlin 2006

Stromwendermaschinen

3

3.1 Gleichstrommaschinen 147
3.1.1 Aufbau 147
3.1.2 Magnetfelderzeugung 153
3.1.3 Stromwendung 159
3.1.4 Induzierte Spannung 162
3.1.5 Drehmoment 166
3.1.6 Betriebsverhalten 168
3.1.7 Verluste und Wirkungsgrad 181

3.2 Universalmaschinen 182
3.2.1 Aufbau 182
3.2.2 Magnetfelder und Spannungsinduktion 183
3.2.3 Drehmoment 185

3.3 Einphasen-Wechselstrom-Bahnmotoren 189
3.3.1 Aufbau 190
3.3.2 Magnetfelder und Spannungsinduktion 191
3.3.3 Betriebsverhalten 191

3.4 Entwurf eines Gleichstrommotors 192
3.4.1 Ausnutzung 192
3.4.2 Hauptabmessungen 194

ÜBERBLICK

» Stromwendermaschinen sind Kommutator (Stromwender)-Maschinen, die durch einen mechanischen Kommutator in der Lage sind, selbstgeführt zu arbeiten. Sie werden heutzutage fast ausschließlich als Motoren ausgeführt. Man unterscheidet folgende Arten von Stromwendermaschinen:

- Gleichstrommaschinen
- Universalmaschinen
- Wechselstrom-Kommutatormaschinen
- Drehstrom-Kommutatormaschinen

Während Drehstrom-Kommutatormaschinen heute keine Rolle mehr spielen und bei Wechselstrom-Kommutatormaschinen keine Neuentwicklungen mehr stattfinden, sind Gleichstrom- und Universalmaschinen noch in den Produktpaletten von Elektromaschinenherstellern zu finden. «

Lernziele

Nach Durcharbeiten dieses Kapitels werden Sie in der Lage sein,

- die wichtigsten Bauformen von Stromwendermaschinen, insbesondere von Gleichstrommaschinen, einzuordnen und die wesentlichen Bauteile in ihrer Funktionalität zu verstehen;
- die ruhenden Magnetfelder als Träger der gespeicherten magnetischen Energie durch Dichte- und Flussgrößen zu beschreiben und Besonderheiten ihrer räumlichen Verteilung zu erkennen und in ihrer Auswirkung auf das Betriebsverhalten nachzuvollziehen;
- Spannungs- und Drehmomentberechnungen aus den Maxwell'schen Gleichungen vorzunehmen;
- die diversen Methoden der Stromwendung in ihrer Wirkung auf die Maschinenfunktionen einzuordnen;
- die Betriebskennlinien der Maschinen nach Bauart und Schaltung zu entwickeln und grundsätzliche Möglichkeiten der Drehzahlsteuerung zu unterscheiden und zu bewerten;
- den Grobentwurf einer Gleichstrommaschine hinsichtlich der wichtigsten Abmessungen vornehmen und danach die Motorparameter berechnen zu können und die für eine Anwendung richtige Auswahl unter Stromwendermaschinen zu treffen.

3.1 Gleichstrommaschinen

Im Industriebereich werden Gleichstrommaschinen mit genormten Achshöhen bis ca. 500 kW bei Ankerspannungen von 420 V, 470 V, 520 V, 600 V sowie Erregerspannungen von 310 V und Drehzahlen bis 3000 min^{-1} eingesetzt. Ihre Anwendungen sind Werkzeugmaschinen, Hebezeuge, Fahrzeuge, Walzstraßen, Roboter, Unterhaltungselektronik und Papiermaschinen. Durch prinzipbedingte Einsatzgrenzen werden Motorleistungen von ca. 3 MW bei Spannungen von maximal bis zu 1,2 kV erreicht. Die Drehzahlen liegen unter 10.000 min^{-1}. Den Vorteilen einer einfachen Drehzahlverstellbarkeit und Eignung für Batteriebetrieb stehen ein höherer Wartungsaufwand, geringere Robustheit und Zuverlässigkeit gegenüber.

3.1.1 Aufbau

Grundbauform

Gleichstrommaschinen werden überwiegend als Außenpolmaschinen aufgebaut, ▶Abbildung 3.1 zeigt einen perspektivischen Schnitt durch eine im Industriebereich eingesetzte fremdbelüftete Maschine.

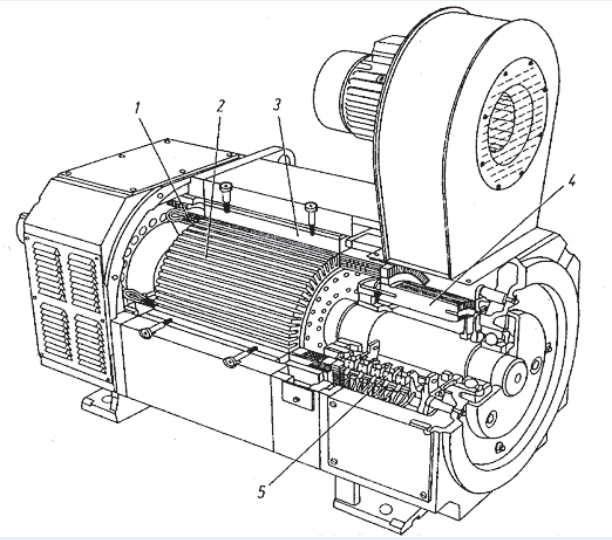

Abbildung 3.1 Aufbau einer Gleichstrommaschine (ABB)

Der Rotor trägt die Ankerwicklungen (1) (Kommutatorwicklungen), die mit ihren einzelnen Spulen mit dem ebenfalls auf dem Rotor (2) (Anker) angebrachten mechanischen Kommutator (4) verbunden sind. Auf dem Kommutator schleifen die Bürsten (5), über die die Verbindung mit den Motorklemmen im Klemmbrett der Maschine hergestellt wird. Das Erregerfeld wird auf dem Stator (3) erzeugt und kann elektrisch durch gleichstromgespeiste Erregerwicklungen oder Permanentmagneten aufgebaut werden.

Die Einzelheiten lassen sich noch besser in einer Schnittdarstellung in radialer Richtung nach ▶Abbildung 3.2 erkennen. Der Stator mit seinen Bauteilen wird zum Aufbau des Erregerfeldes genutzt, der durch das Joch (1) einen magnetischen Rückschluss besitzt. Der Jochring ist aus Walzstahl gefertigt oder besteht bei kleinen Motoren aus einer Schweißkonstruktion. Am Joch befinden sich die Hauptpole (2), die aus gestanztem Blech (2 mm) geschichtet werden, um bei stromrichtergespeisten Motoren die Wirbelströme wirkungsvoll zu begrenzen. Für einfache Anwendungen können auch Gusskörper mit Schraubverbindungen zum Joch eingesetzt werden. Die Haupt- bzw. Erregerpole, bestehend aus Polschuh und Polkern, tragen die Erregerwicklung (4), die einlagig hochkantig gewickelte Spulen oder flachkantig gewickelte Cu-Bandspulen sein können. Versetzt um eine halbe Polteilung zu den Hauptpolen befinden sich die Wendepole (3) mit den Wendepolwicklungen (5). Da diese zur Reduktion der Ankerrückwirkung eingesetzt werden, muss die Wicklung nahe der Ankeroberfläche angebracht sein. In den Polschuhen der Hauptpole befinden sich bei größeren Maschinen noch die Kompensationswicklungen, die einer Verzerrung des Hauptfeldes entgegenwirken.

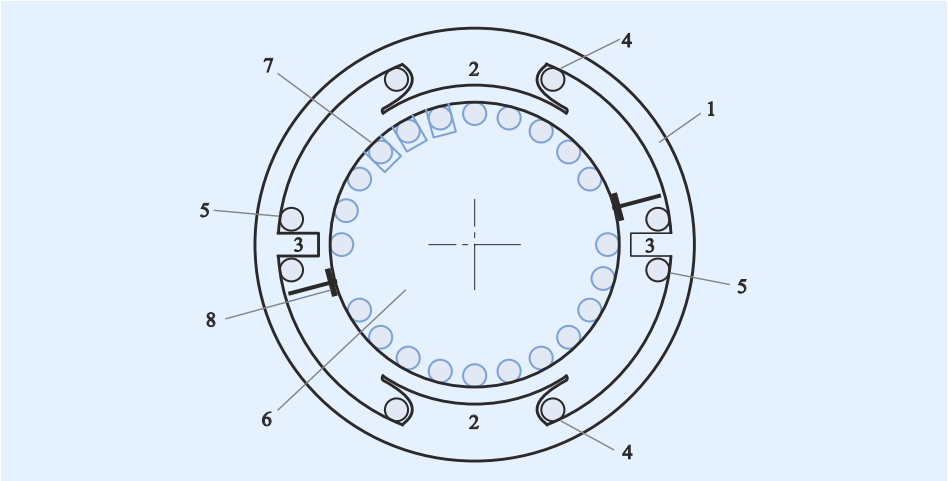

Abbildung 3.2 Querschnitt einer Gleichstrommaschine

Der Anker (6) einer Gleichstrommaschine besteht aus einem auf einer Welle aufgebrachten Blechpaket aus isolierten Dynamoblechen (0,5 mm), welches in axialen Nuten die Ankerwicklung (7) trägt. Die Ankerwicklung als Ort der Spannungsinduktion ist als Trommelwicklung (vgl. ▶Abbildung 3.3) ausgeführt, die praktisch als 2-Schichtwicklung eine zweiseitige Spannungsinduktion in beiden Spulenseiten erlaubt.

Der Kommutator oder Kollektor (8) dient zur Stromwendung in den Ankerwicklungen und besteht aus einem Ring hufförmiger Kupfersegmente (Lamellen), die voneinander durch eine 0,5-1 mm dicke Isolierschicht getrennt sind (▶Abbildung 3.4).

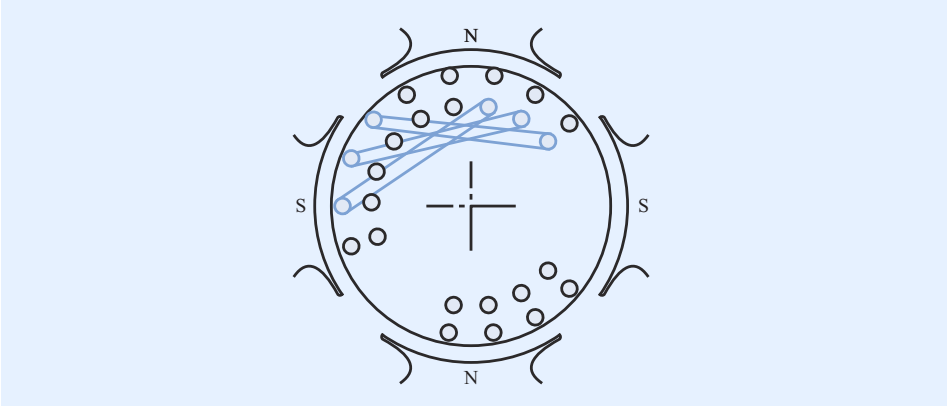

Abbildung 3.3 Trommel-Ankerwicklung

Jede Lamelle ist mit einer Spulengruppe verbunden. Die geringe zulässige Segmentspannung zwischen 2 Kommutatorsegmenten (25-50 V) ist der Grund dafür, dass die erreichbaren Grenzleistungen von Gleichstrommaschinen kleiner als bei Drehstrommaschinen sind.

Der Kommutator, der fest auf der Welle montiert ist, läuft zweimal pro Umdrehung an den Bürsten vorbei, die jeweils zwei benachbarte Lamellen und damit zwei Spulengruppen kurzschließen. Zur Sicherung eines guten Kontaktes wird die in der Halterung verankerte Bürste per Federdruck auf den Kommutator gedrückt. Das Bürstenmaterial besteht aus Grafit, Elektrografit, Hartkohle oder Metallgrafit. Häufig treten Kontaktprobleme zwischen Bürste und Kommutator auf, die zu einem erhöhten Verschleiß und einer Abnahme der Kommutierungsfähigkeit führen.

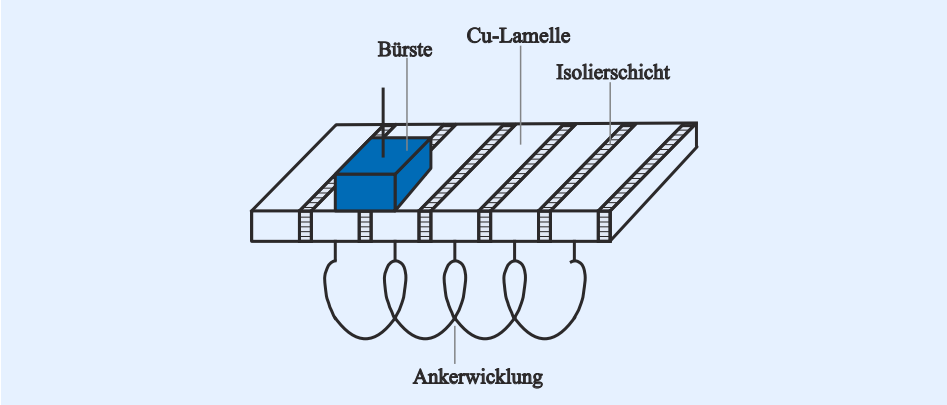

Abbildung 3.4 Kommutator (Beispiel Schleifenwicklung)

Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als **persönliche Einzelplatz-Lizenz** zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschließlich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs und
- der Veröffentlichung

bedarf der **schriftlichen Genehmigung** des Verlags. Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!
Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: info@pearson.de

Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. **Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.**

Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website herunterladen:

http://ebooks.pearson.de