Elektrotechnik & Informationstechnik (2011) 128/3: 60–67. DOI 10.1007/s00502-011-0808-8

Permanentmagneterregte Generatoren und Motoren für den Einsatz in Traktionsantrieben

M. Neubauer, H. Neudorfer OVE, VDE

Die im Traktionsbereich immer häufiger eingesetzten Generatoren und Motoren mit Permanentmagneterregung unterliegen besonderen Rahmenbedingungen hinsichtlich ihres Drehzahl- und Leistungsbereiches sowie anderen traktionsspezifischen Anforderungen wie gesteigerter Momentendichte und hohen Stoßbeschleunigungen. Die nicht vernachlässigbare Temperaturabhängigkeit der Magnete und in Folge die Änderung der induzierten Spannung bzw. des Drehmoments sind ebenso zu beachten wie die zusätzlichen Verluste durch die Permanentmagnete und durch den Betrieb am Stromrichter. Des Weiteren werden die Nutzung des Reluktanzmoments, die Anwendung der Feldschwächung und die parasitären Effekte bei Permanentmagnet-Traktionsmaschinen in diesem Aufsatz behandelt.

Schlüsselwörter: Permanentmagnet; Traktionsmaschine; Längs- und Querinduktivität; Reluktanzmoment; Feldschwächung

Permanent magnet excited alternators and motors for traction drives.

Generators and motors with permanent magnet excitation are increasingly used as traction machines. In this application certain determining factors regarding speed and power and other traction-specific conditions like high shock accelerations and higher torque density apply. The remarkable temperature dependence of the magnets and therefore the variation of induced voltage and torque as well as the additional losses caused by the permanent magnets or by the inverter have to be regarded. This article also discusses the usage of reluctance torque, the implementation of field weakening and certain parasitic effects which appear with permanent magnet traction machines.

Keywords: permanent magnet; traction machine; direct and quadrature inductance; reluctance torque; field weakening

Eingegangen am 11. Jänner 2011, angenommen am 3. Februar 2011
© Springer-Verlag 2011

1. Einleitung

Im Vergleich zu Standard-Industriemaschinen werden an Traktionsmaschinen erhöhte Anforderungen gestellt. So wird eine Lebensdauer von 30 Jahren vorausgesetzt. Die Traktionsmaschine muss weiters hohen Stoßbeschleunigungen dauerhaft standhalten, welche bis zu 30 g betragen können. Der Temperaturbereich erstreckt sich von -40 °C bis +70 °C, der thermische Temperaturindex beträgt 200 oder neuerdings 220. Traktionsmaschinen werden für verschiedene Leistungen zwischen 30 kW und 3 MW hergestellt.

Moderne Permanentmagnetmaschinen bieten gegenüber der Asynchronmaschine oder der elektrisch erregten Synchronmaschine eine Vielzahl von Vorteilen. Der bei elektrischen Maschinen dieser Leistungsklasse bereits sehr hohe Wirkungsgrad kann noch weiter gesteigert werden. Wirkungsgrade von über 97 % praktisch im gesamten Teil des Kennfeldes können mit modernen Permanentmagnet(PM)-Traktionsgeneratoren erreicht werden (*Neudorfer, 2008*). Auch bei Traktionsmotoren steht der hohe Wirkungsgrad in einem sehr großen Teil des Kennfeldes zur Verfügung, insbesondere auch bei niedrigen Drehzahlen und geringer Belastung.

Die höhere Leistungs- und Momentendichte erlaubt kleinere Abmessungen und eine geringere Masse der PM-Maschine. Beim Einsatz in Fahrzeugen, wo die gesamte Masse wiederholt beschleunigt und wieder abgebremst werden muss, ist dies von besonderer Bedeutung. Die geringere Masse der PM-Maschine reduziert gleichzeitig die Achslasten des Fahrzeugs. Die kleineren Abmessungen sind besonders beim Einbau von Motoren in Drehgestelle von Schienenfahrzeugen von Bedeutung, da hier die Platzverhältnisse meist sehr beschränkt sind.

Die geringeren Verluste der PM-Maschine, vor allem im Rotor, erlauben eine gekapselte Bauweise. Dadurch wird nicht nur der Innenraum vor Verschmutzung geschützt, es werden gleichzeitig auch die Geräuschemissionen deutlich herabgesetzt.

An Generatoren und Motoren werden jeweils unterschiedliche Anforderungen gestellt, weshalb diese in den folgenden Kapiteln getrennt behandelt werden. Viele der beschriebenen Eigenschaften und Phänomene gelten jedoch sinngemäß für beide Maschinenanwendungen.

2. PM-Maschinen als Traktionsgeneratoren

Generatoren für dieselelektrische Triebfahrzeuge werden im Normalfall direkt mit dem Dieselmotor verbunden und werden daher im Drehzahlbereich der Verbrennungskraftmaschine betrieben (*Neubauer, Neudorfer, 2009*). Dieselmotoren für Traktionsanwendungen weisen typischerweise eine Leerlaufdrehzahl zwischen 600 und 800 min^{-1} und eine Maximaldrehzahl zwischen 1800 und 2100 min^{-1} auf. Damit sind die Traktionsgeneratoren auch auf diesen Drehzahlbereich beschränkt, im Unterschied zu den

Neubauer, Markus, Dipl.-Ing., Neudorfer, Harald, Doz. Dr. phil. Dr. techn. habil., Traktionssysteme Austria GmbH, Brown Boveri-Straße 1, 2351 Wiener Neudorf, Österreich (E-Mail: harald.neudorfer@traktionssysteme.at)

Traktionsmotoren, welche meist für eine Maximaldrehzahl von 4000 bis 6000 min^{-1} ausgelegt sind.

Während die Drehzahl damit auf einen relativ engen Bereich festgelegt ist, werden Traktionsgeneratoren in unterschiedlichsten Leistungsklassen benötigt. Für Hybridbusanwendungen werden Leistungen ab etwa 150 kW gefordert, für dieselelektrische Lokomotiven Leistungen bis etwa 2500 kW. Während sich im unteren Leistungsbereich Generatoren mit PM-Technologie teilweise bereits etablieren konnten, stehen die PM-Traktionsgeneratoren mit Leistungen über 300 kW erst am Anfang des Serieneinsatzes. Für den oberen Leistungsbereich wurden erst vereinzelt PM-Generatoren entwickelt (*Amler et al., 2010*).

2.1 Betrieb des PM-Generators am Gleichrichter

PM-Generatoren werden in einem dieselelektrischen Fahrzeug über einen Gleichrichter an den Gleichspannungs-Zwischenkreis angebunden. Von dort versorgen Wechselrichter die Fahrmotoren und eventuell auch die Hilfsbetriebe und andere Einrichtungen. Die Gleichrichtung kann sowohl ungesteuert als auch gesteuert erfolgen (Abb. 1).

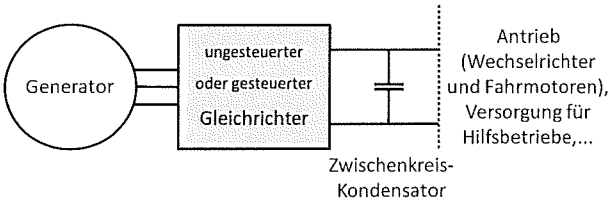


Abb. 1. Prinzipielle Anordnung der Komponenten im Antriebsstrang eines dieselelektrischen Triebfahrzeugs

Die Vorteile des ungesteuerten Gleichrichters mit einer B6-Diodenbrücke liegen im einfachen Aufbau desselben begründet. Die Diodenbrücke zeichnet sich durch einen niedrigen Anschaffungspreis und, verglichen mit gesteuerten Bauelementen, eine hohe Ausfallsicherheit aus. Dieser Vorteil spiegelt sich im Bahnbetrieb in besseren Life-Cycle-Costs (LCC) und Mean Time Between Failures (MTBF)-Werten wider. Bei der ungesteuerten Ausführung kann auch auf einen Rotorpositionsgeber sowie auf jegliche Software verzichtet werden. Allerdings kann bei dieser Variante der Betriebspunkt nicht mehr frei gewählt werden, er stellt sich durch die vorhandenen Impedanzen sowie die Last ein. Eine d-/q-Regelung des Stroms (siehe Kapitel 3) zum Erreichen des optimalen Betriebspunktes und Leistungsfaktors ist so nicht möglich. Der Generator für Diodenbetrieb muss daher bei gleichen Anforderungen größer dimensioniert werden.

Die gesteuerte Gleichrichtung erfordert eine Erfassung der Position des Rotors sowie eine Regelung, die sowohl auf die aktuelle Rotorlage als auch auf die stromabhängigen Induktivitäten der Maschine Bezug nimmt. Der Generator kann dann mit optimalem Leistungsfaktor, mit minimalen Verlusten oder nach anderen Regelungsstrategien betrieben werden. Meist wird jedoch der Dieselmotor hier wesentliche Vorgaben für den optimalen Betriebspunkt liefern. Aufgrund des sehr hohen Wirkungsgrades des PM-Generators von etwa 96 % bis 97,5 % im gesamten Drehzahl-/Drehmomentenverlauf (*Neubauer, 2009*) ist für den Gesamtwirkungsgrad der Anlage der Wirkungsgrad des Dieselmotors entscheidend. Im Betrieb werden durch die elektronische Regelung daher vor allem jene Betriebspunkte angefahren, wo der Dieselmotor optimale Werte aufweist. Bei gesteuerter Gleichrichtung kann der Generator in bestimmten Betriebsfällen auch im Feldschwächbetrieb (siehe Kapitel 3.3) betrieben werden. Damit steht ein weiterer Steuerparameter zur Verfügung, und die starre Abhängigkeit der Spannung von der Drehzahl ist aufgehoben.

Abhängig von der Topologie der Gleichrichtung inklusive Pulsmuster treten auch beim PM-Generator zusätzliche Verluste auf, welche durch die nicht-sinusförmigen Spannungen bzw. Ströme bedingt sind. Diese durch den Gleichrichter bedingten Zusatzverluste machen beim verlustarmen PM-Generator in einigen Punkten einen wesentlichen Teil der Gesamtverluste aus.

Durch den Betrieb des PM-Generators auf eine ungesteuerte B6-Brücke entstehen im Statorstrom zusätzliche Oberschwingungen, die sich auf die Temperatur der Permanentmagnete im Rotor auswirken. Diese höhere Temperatur der Permanentmagnete reduziert die induzierte Spannung, welches bei gleicher Wirkleistung zu einer Erhöhung des Statorstroms und der Stromwärmeverluste führt. Der Wirkungsgrad des PM-Generators wird dadurch um ca. 0,5-%-Punkte reduziert. Durchgeführte Vergleichsmessungen an einem Traktionsgenerator mit einer Leistung von 375 kW ergaben Gesamtverluste von 12,9 kW bei sinusförmigem Betrieb und 15,0 kW bei Betrieb an einer ungesteuerten B6-Diodenbrücke. Dies bedeutet eine Erhöhung der Verluste im Generator um etwa 16 % durch den Einsatz einer Diodenbrücke zur Gleichrichtung an den Generatorklemmen.

Wesentlich komplizierter liegen die Verhältnisse bei Betrieb an einem gesteuerten Gleichrichter. In dieser Ausführung wirken sich die Taktfrequenz und das Taktmuster wesentlich auf die Verluste aus. Messungen an dem oben angeführten Traktionsgenerator mit einer Leistung von 375 kW mit einer gesteuerten Gleichrichterbrücke zeigen merkbar höhere Verluste besonders im unteren Drehzahlbereich und bei Teillast. Selbst wenn sich der Generator bei niedriger Drehzahl fast im Leerlauf befindet, werden durch die Taktung des gesteuerten Gleichrichters Verluste im Generator hervorgerufen, die zu einer Erwärmung des Rotors und der Magnete führen.

Abbildung 2 zeigt den Temperaturanstieg in den Permanentmagneten innerhalb einer Zeitspanne von etwa 24 Minuten bei 44 % der Nenndrehzahl, 11 % der Nennleistung und Betrieb mit einem gesteuerten Gleichrichter (Kennlinie 1). Der Temperaturanstieg ist etwa um den Faktor 4 bis 5 höher als bei Leerlauf im Sinusbetrieb bei gleicher Drehzahl (Kennlinie 2). Aufgrund der Testbedingungen (Systemtest mit Dieselmotor) musste der Leerlaufbetrieb auf eine Zeitdauer beschränkt werden, innerhalb derer die Beharrungstemperatur nicht erreicht wurde.

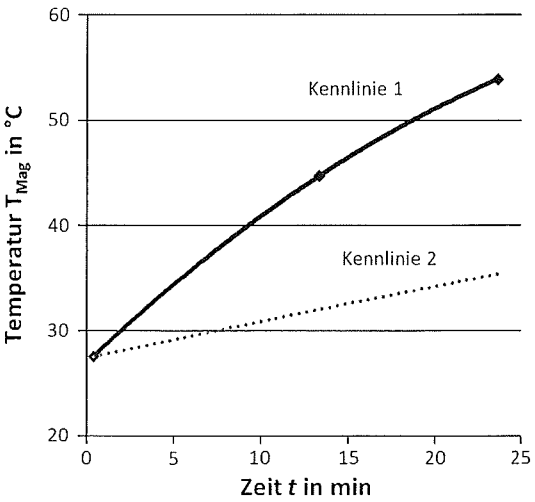


Abb. 2. Temperaturanstieg in den Permanentmagneten bei niedriger Drehzahl bei gesteuerter Gleichrichtung und geringer Last (Kennlinie 1) sowie im Sinusbetrieb bei Leerlauf (Kennlinie 2)

© Springer-Verlag

2.2 Temperaturabhängigkeit der Generatorspannung

Das für PM-Maschinen derzeit am häufigsten verwendete Magnetmaterial NdFeB zeigt eine deutliche Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B von der Materialtemperatur T. Diese Abhängigkeit wird mittels der Temperaturkoeffizienten $TK(B_r)$ für die Remanenzflussdichte B_r und $TK(H_{cJ})$ für die Koerzitivfeldstärke H_{cJ} in %/K angegeben (*Fa. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG, 2007*):

$$TK(B_r) = \frac{1}{B_r} \cdot \frac{dB_r}{dT} \cdot 100 \qquad (1)$$

bzw.

$$TK(H_{cJ}) = \frac{1}{H_{cJ}} \cdot \frac{dH_{cJ}}{dT} \cdot 100 \qquad (2)$$

Werkstoffsorten, welche eine hohe Remanenzflussdichte besitzen und gleichzeitig eine hohe Einsatztemperatur ermöglichen, weisen Temperaturkoeffizienten $TK(B_r)$ zwischen −0,08 %/K und −0,12 %/K bzw. $TK(H_{cJ})$ zwischen −0,45 %/K und −0,65 %/K auf.

Wegen

$$U_p = k \cdot \omega \cdot \Phi_{Mag,Luftspalt} = k \cdot \omega \cdot \int_A \vec{B}_{Mag,Luftspalt}\, d\vec{A} \qquad (3)$$

ist die Polradspannung U_p von der Kreisfrequenz ω und vom magnetischen Fluss $\Phi_{Mag,Luftspalt}$ im Luftspalt, welcher durch die Permanentmagnete hervorgerufen wird, abhängig. Der Wert der magnetischen Flussdichte $B_{Mag,Luftspalt}$ im Luftspalt, deren Integral über die Fläche des Luftspaltes den magnetischen Fluss $\Phi_{Mag,Luftspalt}$ ergibt, steht in engem Zusammenhang mit der Remanenzflussdichte B_r der Permanentmagnete. Durch die negativen Temperaturkoeffizienten wird daher die Polradspannung umso geringer, je höher die Magnettemperatur ist.

Während sich im Leerlauf die Magnettemperatur direkt auf die Klemmenspannung auswirkt, kommt unter Last noch der Einfluss des ohmschen und induktiven Spannungsabfalls auf die Klemmenspannung hinzu. Abhängig von der Art der Belastung (ohmsch, induktiv oder kapazitiv) ändert sich der Faktor zwischen dreiphasiger Klemmenspannung und dem Gleichrichtmittelwert (*Zach, 1979*). Auf der Gleichspannungsseite ergibt sich so ein erheblicher Abstand zwischen der Leerlaufspannung im kalten Zustand und der Spannung unter Volllast im warmen Zustand. Abbildung 3 und Tabelle 1 zeigen die Verhältnisse für einen PM-Generator mit einer elektrisch abgegebenen Wirkleistung von 550 kW, bei welchem die Spannung über eine ungesteuerte B6-Diodenbrücke gleichgerichtet wird. Die Kurven unter Last gelten jeweils für konstantes Drehmoment.

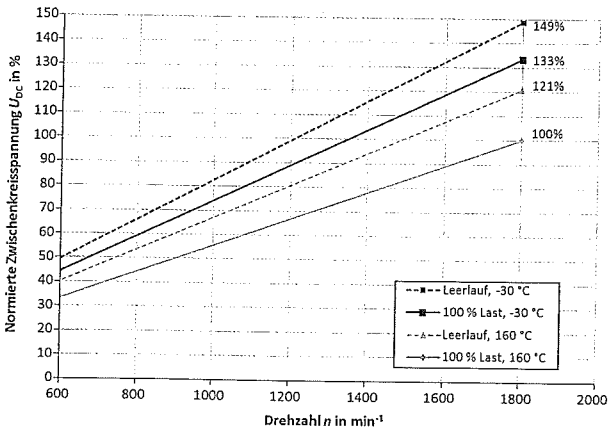


Abb. 3. Zwischenkreisspannung eines PM-Generators mit ungesteuerter B6-Diodenbrücke in Abhängigkeit von Drehzahl, Magnettemperatur und Belastung

Tabelle 1. Zwischenkreisspannung eines PM-Generators mit ungesteuerter B6-Diodenbrücke in Abhängigkeit von Magnettemperatur und Belastung

U_{DC} in %	bei T_{Mag} −30 °C	bei T_{Mag} +40 °C	bei T_{Mag} +160 °C
bei Leerlauf	149 %	138 %	121 %
bei 100 % Last	133 %	121 %	100 %

Der Generator ist auf den belastungsmäßig ungünstigsten Fall (maximal zulässige Betriebstemperatur der Permanentmagnete von 160 °C, 100 % Last) dimensioniert, in welchem die Maschine noch die vorgegebene minimale Spannung liefern muss. Die Dimensionierung der Gleichrichterbrücke ist jedoch auf die maximale Ausgangsspannung des Generators auszulegen, welche bei Leerlauf und minimaler Betriebstemperatur auftritt.

Durch dieses Beispiel wird deutlich, dass das Temperaturverhalten der Permanentmagnete zu deutlich anderen Voraussetzungen für den Systemdesigner führt als bei konventionell erregten Synchronmaschinen bzw. Asynchronmaschinen. Folgende Maßnahmen können jedoch den Unterschied zwischen minimaler und maximaler Spannung verringern:

- Verwendung von anderen Magnetmaterialien mit geringerem Temperaturkoeffizienten, jedoch mit dem Nachteil höherer Kosten.
- Minimierung der ohmschen und induktiven Widerstände in der Maschine. Diese Maßnahme verschlechtert aber das Kurzschlussverhalten bzw. die Kurzschlussfestigkeit und erhöht das Volumen und die Masse des Generators.
- Intelligente Dieselmotorregelung, die erst im betriebswarmen Zustand des Generators die Höchstdrehzahl des Dieselmotors zulässt und außerdem bei Lastabwurf sehr schnell reagiert.

3. PM-Maschinen als Traktionsmotoren

Wie bereits bei den Generatoren erwähnt, unterliegen Traktionsmotoren anderen Rahmenbedingungen als Generatoren. Die Betriebsdrehzahl erstreckt sich meist über einen großen Bereich, wobei beim Anfahren ein hohes Drehmoment gefordert wird. Weiters unterliegen Traktionsmotoren oft besonderen Beschränkungen in ihren Abmessungen, da diese bei Bahnanwendungen meist direkt im Drehgestell eingebaut werden. PM-Maschinen können hier durch ihren höheren Wirkungsgrad in einem großen Teil des Betriebsbereichs und durch ihre höhere Leistungs- bzw. Momentendichte gegenüber Asynchronmaschinen überzeugen.

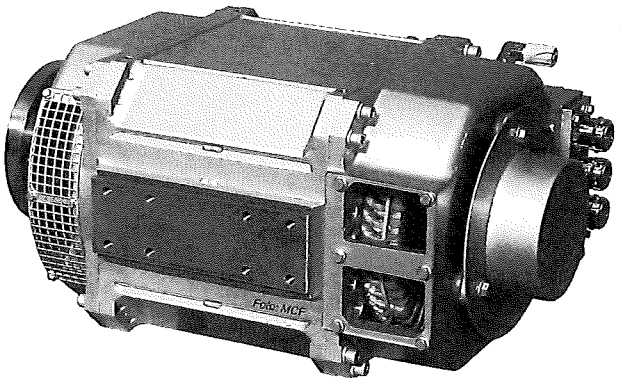


Abb. 4. PM-Traktionsmotor mit einer Leistung von 230 kW der Firma Traktionssysteme Austria GmbH

Abbildung 4 zeigt einen PM-Traktionsmotor, mit welchem am Prüfstand eine Dauerleistung (S1) von 230 kW bei einer Drehzahl von 1925 min^{-1} erreicht werden konnte. Diese Maschine wurde aus einer Asynchronmaschine mit gleichen Abmessungen und einer Leistung von 120 kW weiterentwickelt. Bei einer Masse von 342 kg weist der PM-Motor nun eine spezifische Leistung, bezogen auf die Gesamtmasse, von 0,67 kW/kg auf.

Auf einige Besonderheiten der PM-Maschine im Betriebsverhalten wird im Folgenden näher eingegangen. Die PM-Maschine benötigt für den Betrieb als Motor einen abhängig von der Rotorposition eingestellten Stromraumzeiger. Daher ist für jeden Motor ein eigener Wechselrichter notwendig, im Gegensatz zur Asynchron- Traktionsmaschine, wo oft für zwei Maschinen ein gemeinsamer Wechselrichter verwendet wird.

Für die Regelung der Maschine ist die Kenntnis der strom- und richtungsabhängigen Induktivitäten wesentlich. Diese können sowohl durch Messung als auch durch Berechnung ermittelt werden, wobei für die Messung eine bereits fertiggestellte Maschine als Messobjekt notwendig ist. Für die Berechnung wird wegen der komplizierten Geometrien ein Finite-Elemente-Programm mit entsprechenden Auswertemöglichkeiten benötigt. Die besonderen Induktivitätsverhältnisse bei der PM-Maschine mit richtungsabhängigen Induktivitäten können gezielt ausgenützt werden. Für eine detaillierte Darstellung der Eigenschaften, insbesondere die Drehmoment-Trajektorien, siehe (*Schmidt, 2008*).

3.1 Berechnung und messtechnische Ermittlung der Längs- und Querinduktivitäten

Abbildung 5 zeigt die Skizze eines achtpoligen PM-Rotors mit vergrabenen Magneten. Die Permanentmagnete besitzen eine relative Permeabilität in der Größenordnung von Luft ($\mu_r \approx 1$), während die relative Permeabilität der Eisenstege zwischen den Magneten je nach Sättigungszustand um etwa 3 Zehnerpotenzen höher liegt ($\mu_r \approx 1000$). Bei Anordnungen wie in Abb. 5 und nicht zu hohen Sättigungsverhältnissen in q-Richtung ist daher auch die Induktivität in Richtung der Permanentmagnete, also in d-Richtung, niedriger als jene in q-Richtung.

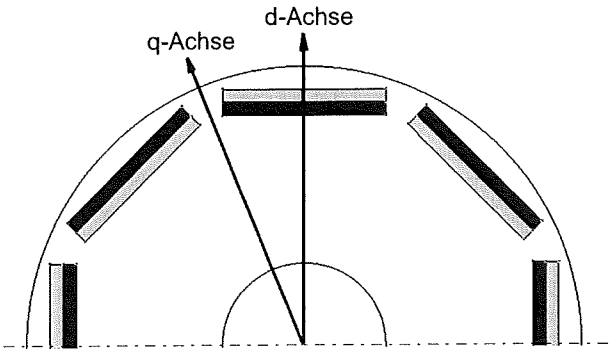


Abb. 5. Prinzipskizze eines PM-Rotors mit vergrabenen Magneten

Je nach Anordnung können die Stege zwischen den Magneten stark sättigen, wodurch in diesen Bereichen niedrigere Werte für die Permeabilität auftreten. Weiters sind die Induktivitäten aufgrund der Magnetisierungskennlinie stromabhängig und nichtlinear, und zwar jeweils sowohl von d- und q-Strom in unterschiedlicher Art. Da die Induktivitätswerte für alle Betriebspunkte von der Regelung benötigt werden, ist die Kenntnis der Werte in Abhängigkeit von d- und q-Strom von großer Bedeutung.

Die Statorspannungsgleichung für die PM-Maschine (siehe auch (*Kleinrath, 1980*), rotorfestes Koordinatensystem) lautet

$$\underline{U}_S = \underline{I}_S \cdot R_S + \frac{d\underline{\Psi}_S}{dt} + j\omega \cdot \underline{\Psi}_S \tag{4}$$

mit

$$\underline{\Psi}_S = L_S \cdot \underline{I}_S + \underline{\Psi}_{Mag}. \tag{5}$$

Im stationären Zustand und unter Vernachlässigung des ohmschen Spannungsabfalls vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\underline{U}_S = j\omega \cdot L_S \cdot \underline{I}_S + j\omega \cdot \underline{\Psi}_{Mag}. \tag{6}$$

Aufspalten in die Komponenten des rotorfesten d-/q-Koordinatensystems führt zu

$$U_d = \omega_{el} \cdot L_q \cdot I_q \tag{7}$$

und

$$U_q = \omega_{el} \cdot L_d \cdot I_d + \omega_{el} \cdot \Psi_{Mag}. \tag{8}$$

Der Term $\omega_{el} \cdot \Psi_{Mag}$ wird in Anlehnung an konventionelle Synchronmaschinen oft mit der Polradspannung U_p identifiziert. Da die Polradspannung in einem messtechnischen Ansatz oft mit der (messbaren) Leerlaufspannung U_{LL} gleichgesetzt wird, erhält man in diesem Fall für die Längsinduktivität den Ausdruck

$$L_d = \frac{U_q - U_{LL}}{\omega_{el} \cdot I_d}. \tag{9}$$

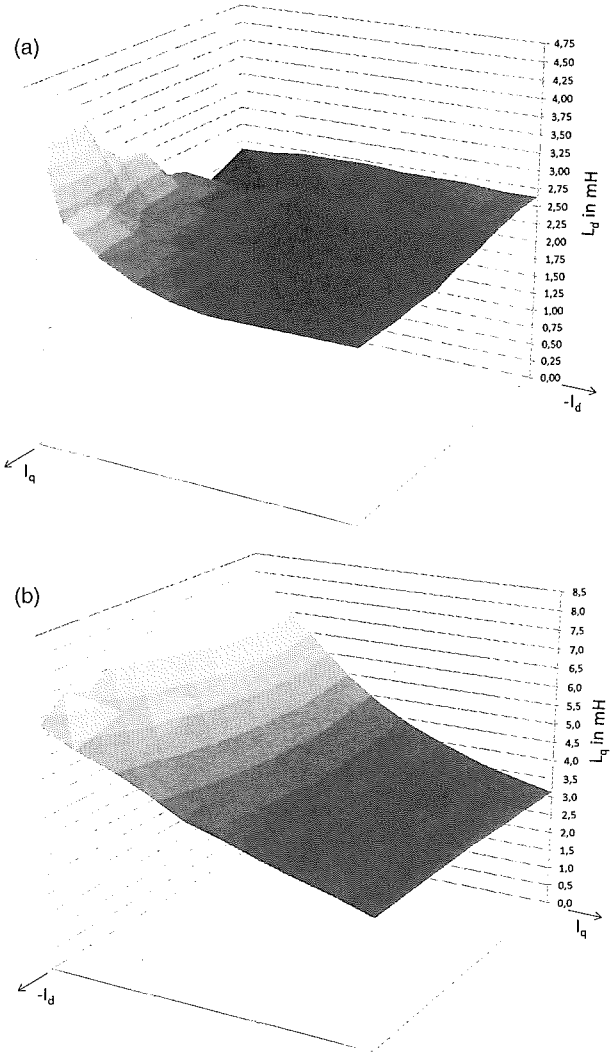


Abb. 6. Gemessene Werte für die Längs- (a) und Querinduktivität (b) eines PM-Motors mit vergrabenen Magneten

© Springer-Verlag

Die Leerlaufspannung U_{LL} stellt jedoch für eine bestimmte Drehzahl und Temperatur eine Konstante dar und ist nicht von den Strömen abhängig. Die Abbildungen 6a und b zeigen die über Messungen ermittelten Werte für L_d und L_q für einen Traktionsmotor mit einer Leistung von 120 kW mit vergrabenen Magneten.

In Finite-Elemente(FE)-Programmen wird andererseits oft direkt mit dem magnetischen Fluss im Luftspalt gerechnet. Dadurch gelangt man zu der Darstellung

$$L_d = \frac{U_q - U_p}{\omega_{el} \cdot I_d} \tag{10}$$

mit

$$U_p = \omega_{el} \cdot \Psi_{Mag}, \tag{11}$$

wobei der durch die Permanentmagnete hervorgerufene Fluss in FE-Programmen eine betriebspunktabhängige Größe ist, womit auch die Polradspannung U_p betriebspunktabhängig wird. Die betriebspunktabhängige (speziell: stromabhängige) Änderung des Flusses kann somit direkt in der Berechnung der Längsinduktivität berücksichtigt werden. Durch diese unterschiedlichen Ansätze gelangt man zu verschiedenen Darstellungen von L_d, wobei die Werte teils erheblich voneinander abweichen.

Bei der Querinduktivität

$$L_q = \frac{U_d}{\omega_{el} \cdot I_q} \tag{12}$$

tritt das Problem der unterschiedlichen Definitionen nicht auf, da die Formel keine Komponente des durch die Permanentmagnete hervorgerufenen Flusses enthält. Die Abbildungen 7a und b zeigen die für den gleichen 120 kW-PM-Motor durch ein FE-Programm ausgegebenen Werte für die Längs- und Querinduktivität.

Während bei der Querinduktivität L_q Messwerte und Rechenwerte sehr gut übereinstimmen, treten bei der Längsinduktivität L_d die erwähnten Unterschiede auf. Bei Kenntnis von U_{LL} der Messung bzw. Ψ_{Mag} der FE-Rechnung lassen sich die beiden Ergebnisse jedoch ineinander umrechnen und zeigen dann ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung.

3.2 Nutzung des Reluktanzmoments

Wie aus den Werten in den Abbildungen 6 und 7 ersichtlich ist, weisen Maschinen mit vergrabenen Magneten je nach Ausführung einen stark ausgeprägten Unterschied zwischen Längs- und Querinduktivität auf. Diese Differenz kann zur Generierung eines zusätzlichen Drehmoments genützt werden.

Für das Drehmoment gilt:

$$M = \frac{3p}{2} \cdot \left(\hat{\Psi}_p \hat{I}_q + (L_d - L_q)\hat{I}_d \hat{I}_q\right). \tag{13}$$

Wegen

$$L_d < L_q \tag{14}$$

kann nun durch Einprägen eines negativen Stromes $I_d < 0$ ein zusätzliches Drehmoment erzeugt werden. Für konstanten Klemmenstrom kann nun eine Aufteilung in I_d und I_q gefunden werden, bei welcher das abgegebene Drehmoment maximal ist. Der Winkel β^* gibt den Winkel an, welchen der Statorstrom I_s zur q-Achse einschließt. Für $\beta^* = 0°$ ist $I_d = 0$, und es wird kein Reluktanzmoment generiert. Je höher der Anteil des negativen I_d nun am Gesamtstrom wird, desto höher wird der Anteil des Reluktanzmoments. Gleichzeitig muss aber I_q zurückgenommen werden, um den maximal zulässigen Gesamtstatorstrom nicht zu überschreiten. Dadurch verringert sich auch der Anteil von $\hat{\Psi}_p \hat{I}_q$ am gesamten Drehmoment. Abbildung 8 zeigt das gesamte Drehmoment sowie das Reluktanzmoment in Abhängigkeit des Winkels β^* für einen Betriebspunkt ($n = 1933\,\text{min}^{-1}$, $I_s = 202$ A) einer ausgeführten Traktionsmaschine mit einer Leistung von 160 kW mit vergrabenen Magneten. Das maximale Drehmoment wird zwischen $\beta^* = 30°$ und $\beta^* = 35°$ erzeugt und liegt etwa 26 %

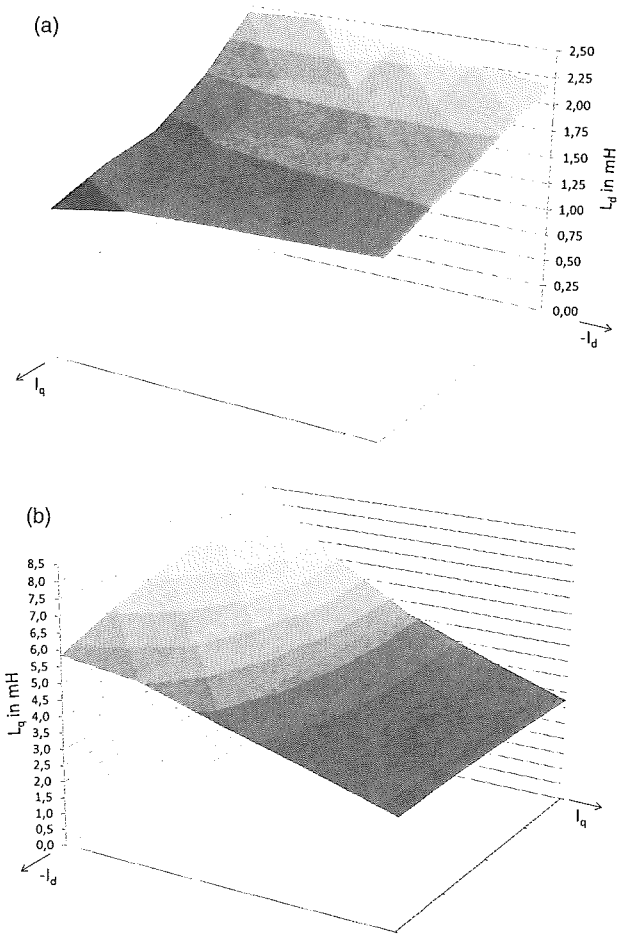


Abb. 7. Durch ein FE-Programm berechnete Werte für die Längs- (a) und Querinduktivität (b) eines PM-Motors mit vergrabenen Magneten

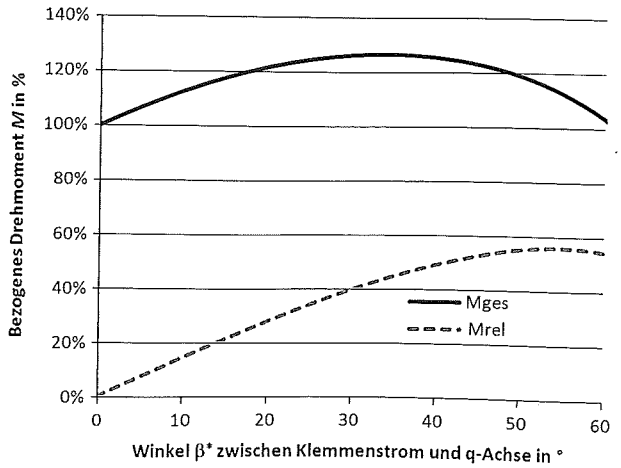


Abb. 8. Reluktanzmoment und gesamtes Drehmoment in Abhängigkeit des Winkels β^* (Winkel zwischen Statorstrom und q-Achse)

© Springer Verlag

über dem Drehmoment bei $\beta^* = 0°$. Der Anteil des Reluktanzmoments beträgt in diesem Betriebspunkt über 30 % vom Gesamtdrehmoment.

3.3 Feldschwächung bei PM-Maschinen

Neben der Nutzung des Reluktanzmoments kommt dem negativen d-Strom bei der PM-Maschine auch noch eine andere wichtige Bedeutung zu. Üblicherweise werden Traktionsmaschinen bei höheren Drehzahlen in der Feldschwächung betrieben. Dafür wird der magnetische Fluss abgesenkt, um die maximal zulässige Klemmenspannung nicht zu überschreiten. Bei der PM-Maschine ist die Erregung jedoch prinzipbedingt nicht beeinflussbar. Daher muss der Magnetfluss durch einen strombedingten, entgegengerichteten Fluss vom Luftspalt in den Rotor zurückgedrängt werden. Durch einen negativen Strom in d-Richtung kann somit eine Feldschwächung erzielt werden.

In Abb. 9 sind die Strom- und Spannungsverhältnisse für einen ausgeführten PM-Motor mit einer Leistung von 160 kW dargestellt.

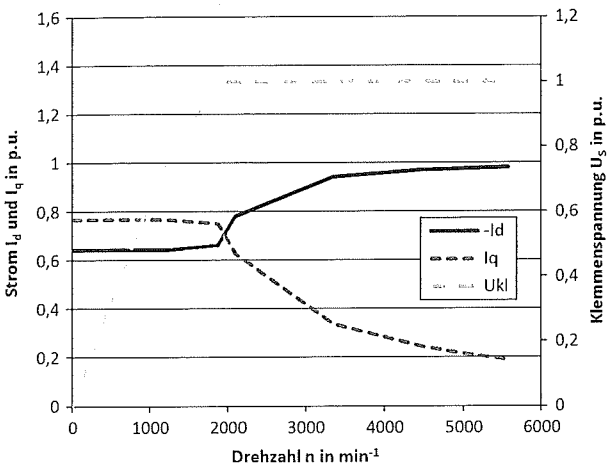


Abb. 9. Komponenten des Statorstroms in Längs- und Querrichtung sowie Klemmenspannung eines PM-Motors mit vergrabenen Magneten in Abhängigkeit der Drehzahl

Bei einer Drehzahl von etwa 1900 min^{-1} wird die maximal zulässige Klemmenspannung erreicht. Bei höheren Drehzahlen wird der negative d-Strom erhöht, um die Spannung auf dem Maximalwert zu halten. Gleichzeitig muss der q-Strom zurückgenommen werden, damit auch der maximal zulässige Strom nicht überschritten wird. Die geometrische Summe der rechtwinklig aufeinander stehenden Stromkomponenten ergibt den Gesamtstrom:

$$I_S = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}. \qquad (15)$$

Der negative d-Strom unterhalb einer Drehzahl von 1900 min^{-1} dient nicht der Feldschwächung, sondern zur Generierung des Reluktanzmoments.

In den Abbildungen 10 und 11 sind die Zeigerdiagramme der PM-Maschine mit einer Leistung von 160 kW mit vergrabenen Magneten dargestellt. Abbildung 10 zeigt den Zustand beim Anfahren mit 1,6-fachem Nennstrom bei 27 % der Nenndrehzahl. Der Winkel β^* zwischen Strom und Polradspannung beträgt in diesem Fall 33°. Der negative d-Strom dient hier der Generierung des Reluktanzmoments. Bei gleichem Strombetrag kann so verglichen mit $\beta^* = 0°$ ein um 30 % höheres Drehmoment gewonnen werden. Zusätzlich zeigt sich, dass der Winkel zwischen Klemmenspannung und Klemmenstrom kleiner wird, der cos φ wird also besser.

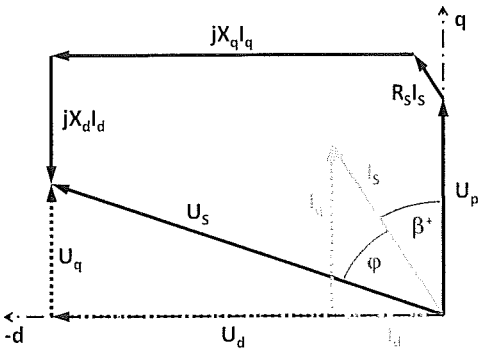


Abb. 10. Raumzeigerdiagramm für einen PM-Motor mit vergrabenen Magneten beim Anfahren

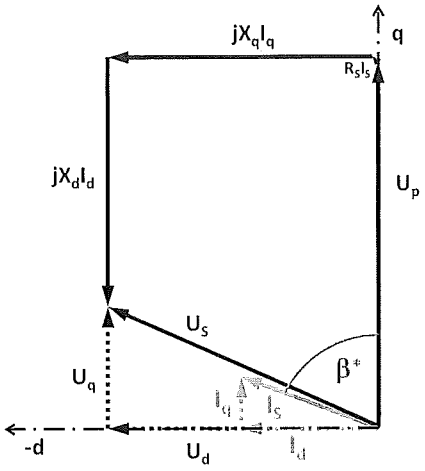


Abb. 11. Raumzeigerdiagramm für einen PM-Motor mit vergrabenen Magneten im Feldschwächbetrieb

In Abb. 11 sieht man die Verhältnisse in der Maschine bei 174 % der Nenndrehzahl. Da die Klemmenspannung die maximal zulässige Spannung überschreiten würde, muss der Winkel β^* vergrößert werden, um mit dem negativen d-Strom das Feld zu schwächen (der Zeiger jI_dX_d ist der Polradspannung U_p entgegengerichtet). Der direkt drehmomentbildende q-Strom ist bereits deutlich kleiner als der feldschwächende d-Strom. Bei der Maximaldrehzahl wird U_p noch größer, womit fast der gesamte verfügbare Strom zur Feldschwächung benötigt wird.

3.4 Parasitäre Effekte bei PM-Traktionsmotoren

Das vorangegangene Kapitel hat bereits gezeigt, dass neben den Vorteilen bei der PM-Maschine auch mit gewissen technologiebedingten Nachteilen zu rechnen ist. Die wegen der Magnete permanent vorhandene Erregung erschwert nicht nur die Feldschwächung bei hohen Drehzahlen. Aufgrund der gleichen Ursache sind auch, sobald sich die Maschine dreht, Verluste vorhanden. Die Schleppverluste der Maschine sind bei der PM-Maschine zu einem großen Teil von den Ummagnetisierungsverlusten bestimmt, welche wegen der Permanentmagnete bei drehender Maschine immer vorhanden sind. In den bei Schienenfahrzeugen sehr häufigen und oft länger andauernden Rollphasen sind daher insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten immer nennenswerte Verluste in der Maschine zu erwarten.

Auch im Kurzschlussfall kann bei PM-Maschinen die Erregung nicht abgeschalten werden. Bei drehender Maschine tritt so unmittelbar bei Eintreten des Fehlers ein transienter Kurzschlussstrom auf,

© Springer-Verlag

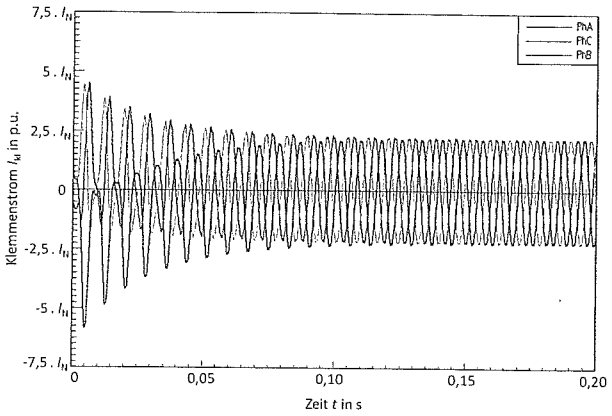


Abb. 12. Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms eines PM-Motors beim dreiphasigen Klemmenkurzschluss

der die Magnete entmagnetisieren oder andere Elemente im Stromkreis zerstören kann. Der daraufhin vorhandene Dauerkurzschlussstrom kann die Maschine thermisch zerstören. Für das Abschleppen des Fahrzeugs im Kurzschlussfall müssen besondere Maßnahmen getroffen werden. Abbildung 12 zeigt den Kurzschlussstrom eines PM-Motors mit einer Leistung von 160 kW beim dreiphasigen Kurzschluss.

4. Zusammenfassung

Moderne Traktionsmaschinen mit Permanentmagnettechnologie besitzen wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Maschinen. Geringe Verluste, vor allem im Rotor, ermöglichen eine gekapselte Bauweise und führen zu einem außerordentlich hohen Wirkungsgrad in einem großen Teil des Betriebsbereiches. PM-Maschinen bieten außerdem eine sehr hohe Leistungs- und Momentendichte, bezogen auf die Masse und das Volumen der Maschine.

Technologiebedingt ist jedoch auch auf einige Besonderheiten Rücksicht zu nehmen. Hier wären der zusätzlich notwendige Strom zur Feldschwächung sowie die dadurch hervorgerufenen zusätzlichen Verluste zu nennen. Trotzdem bietet die PM-Maschine selbst im hohen Feldschwächbereich meist noch einen zumindest gleich guten Wirkungsgrad wie die Asynchronmaschine. Die ständig vorhandene Erregung führt außerdem zu Schleppverlusten sowie zu einem besonderen Verhalten im Kurzschlussfall. Weiters muss die Temperaturabhängigkeit der Permanentmagnete berücksichtigt werden. Für die Anwendung als Motor muss jede Maschine schließlich mit einem eigenen Polradlagegeber und einem eigenen Stromrichter ausgestattet werden.

Wegen der überwiegenden Vorteile kommen im Traktionsbereich zunehmend PM-Maschinen zum Einsatz.

Formelzeichen

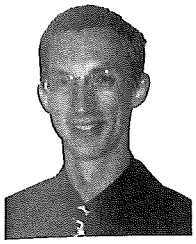
U_S	Statorspannung
I_S	Statorstrom
R_S	(ohmscher) Statorwiderstand
Ψ_S	Stator-Flussverkettung
ω	Kreisfrequenz
L_S	Statorinduktivität
Ψ_{Mag}	Flussverkettung, hervorgerufen durch die Permanentmagnete
ω_{el}	Elektrische Kreisfrequenz
Ψ_p	PM-Grundwellenflussverkettung je Pol
p	Polpaarzahl
n	Drehzahl
φ	Phasenwinkel
j	Imaginäre Einheit
β^*	Winkel zwischen Statorstrom und q-Achse

Literatur

Amler, G. et al. (2010): Diesel electric propulsion system with PM generator and new combined rectifier and braking chopper topology. SPEEDAM 2010, pp. 724–729.
Fa. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (2007): Selten-Erd-Dauermagnete Vacodym, Vacomax. Hanau: Produktkatalog.
Kleinrath, H. (1980): Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen. Wien, New York: Springer.
Neubauer, M. (2009): Simulation eines dieselelektrischen Triebfahrzeugs. TU Wien: Diplomarbeit.
Neubauer, M., Neudorfer, H. (2009): Simulation des Einsatzes neuer Technologien im Antriebsstrang eines dieselelektrischen Triebfahrzeuges. e&i, 127 (4): a19–a26.
Neudorfer, H. (2008): Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten Traktions-Synchrongenerators in Permanentmagnet-Technologie. ZEVrail Tagungsband „Moderne Schienenfahrzeuge Graz 2008", 132. Jg., Nov. 2008. Berlin: Georg Siemens Verlag: pp. 30–39.
Schmidt, E. (2008): Comparison of different designs of normal and permanent magnet excited reluctance machines. Proc. of the 9th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Electrical Machines, Converters and Systems, ELECTRIMACS, Quebec City, Canada.
Zach, F. (1979): Leistungselektronik. Wien, New York: Springer.

© Springer-Verlag

Autoren



Markus Neubauer
geboren 1980 in Mödling bei Wien. 1997 bis 2002 Studium der Instrumentalpädagogik, Hauptfach Klavier, an der Universität für Musik und darstellende Kunst Wien; Abschluss mit Auszeichnung. 2002 bis 2009 Studium der Elektrotechnik, Studienzweig Energietechnik, an der TU Wien; Abschluss mit Auszeichnung. Seit 2009 elektrische Berechnung von Traktionsmaschinen bei Traktionssysteme Austria GmbH, Wiener Neudorf.

Harald Neudorfer
Studium der elektrischen Energietechnik an der Technischen Universität Wien, 1998 Promotion mit Auszeichnung am Gebiet der elektrischen Maschinen. Studium der Pädagogik an der Universität Klagenfurt, 2002 Promotion auf dem Gebiet der Ingenieurspädagogik. 2009 Habilitation an der Technischen Universität Darmstadt, Thema: Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge, Habilitationsfach: Elektrische Maschinen und Antriebe.

Berufliche Positionen: 1982–2001 BBC, ABB, Adtranz Wiener Neudorf, 2001–2006 Daimler AG Stuttgart, Leitung Abteilung E-Drive Powertrain. Seit 2006 Traktionssysteme Austria GmbH, Wiener Neudorf, Leitung Engineering, Prokurist. Seit 2000 Lehrbeauftragter bzw. Dozent an der TU Wien und TU Darmstadt, seit 1999 Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierter Sachverständiger, seit 2001 Staatlich befugter und beeideter Ziviltechniker mit ruhender Befugnis.

© Springer-Verlag