Elektrische Maschinen

9

Kay Hameyer, Daniel Butterweck, Niklas Driendl, Marius Franck, Benedikt Groschup, Kevin Jansen, Nora Leuning, Sebastian Mönninghoff, Martin Nell und Michael Schröder

Die elektrische Maschine repräsentiert physikalisch einen Energiewandler. Dabei wird zwischen nicht rotierenden elektrischen Maschinen und rotierenden elektrischen Maschinen mit bewegenden Hauptelementen unterschieden. Allen elektrischen Maschinen ist gemeinsam, dass sie in ihrem Aufbau über einen magnetischen Kreis verfügen, der für die Funktionsweise wesentlich ist.[1]

Zu der Gruppe der nicht rotierenden elektrischen Maschinen zählen die Transformatoren. Bei ihnen spielt die magnetische Kraftwirkung eine untergeordnete beziehungsweise unerwünschte Rolle, die in Fehlerfällen relevant werden kann.

[1] Vgl. Fischer 2009.

K. Hameyer (✉)
Universitätsprofessor, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: kay.hameyer@iem.rwth-aachen.de

D. Butterweck
Oberingenieur, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: daniel.butterweck@iem.rwth-aachen.de

M. Franck · K. Jansen · S. Mönninghoff
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: marius.franck@iem.rwth-aachen.de; kevin.jansen@iem.rwth-aachen.de; sebastian.moenninghoff@iem.rwth-aachen.de

N. Leuning
Juniorprofessorin, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: nora.leuning@iem.rwth-aachen.de

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,
https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_9

Bei dem wesentlich größeren und im Folgenden ausschließlich dargestellten Gebiet der elektrischen Maschinen mit bewegenden Hauptelementen sind die magnetischen Kraftwirkungen von zentraler Bedeutung. Bewegungen können dabei translatorisch oder rotierend erfolgen. Rotierende elektrische Maschinen sind durch eine Vielzahl verschiedener Bauformen und Einsatzbereiche geprägt. Sie dienen der Umsetzung elektrischer Energie in mechanische Energie oder umgekehrt. Wird elektrische Energie in mechanische Energie umgesetzt, wird von einem „Elektromotor“ gesprochen. Bei der Energiewandlung in Gegenrichtung – von mechanischer Energie in elektrische Energie – ist von einem „elektrischen Generator“ die Rede. Elektrische Maschinen können als Motor sowie als Generator betrieben werden. Die konkrete Funktion wird durch den Betriebsbereich der Maschine bestimmt.

Bei rotierenden elektrischen Maschinen, in denen der magnetische Fluss im Luftspalt radial in der Drehebene und damit senkrecht zur Drehachse verläuft, handelt es sich um **Radialflussmaschinen**. Die magnetische Flussführung ist der formgebende Aspekt des Aufbaus. Magnetisch aktive Elemente der elektrischen Maschine, sowohl ruhend als auch rotierend, bestehen meist aus Paketen geschichteten Elektroblechs zur Flussführung. In den dort in axialer Richtung verlaufenden Nuten sind zur Flusserzeugung oder -verstärkung Wicklungssysteme eingebracht. Je nach Topologie kann eines dieser Systeme durch eine Anordnung aus Permanentmagneten (PM) ersetzt werden. An den beiden axialen Enden der Maschine sind Verbindungen der in den Nuten liegenden elektrischen Leiter notwendig – die sogenannten Wickelköpfe, die nicht zur Drehmomentbildung beitragen und die elektrische Maschine axial verlängern. Die Anzahl der magnetischen Pole der elektrischen Maschine wird durch die Anordnung der Wicklung bestimmt. Der Aktivteil der Maschine ist fast vollständig mit Stahl und Kupfer gefüllt, mit einem kleinen Anteil von Isolierstoffen. Die vorhandene Querschnittsfläche muss auf kupfergefüllte stromführende Nuten sowie dazwischenliegende, den magnetischen Fluss führende Zähne sinnvoll verteilt werden. Eine Vergrößerung der Nutbreite vermindert die Zahnbreite und umgekehrt. Im ruhenden oder rotierenden Teil können die Nuten geschrägt zur Maschinenachse ausgeführt werden, um ein Ausrichten und damit Rasten aufgrund magnetischer Kräfte zu vermeiden.

Einen anderen Ansatz verfolgen die Konzepte der Transversalflussmaschine (TFM) und der Axialflussmaschine (AFM). Bei diesen elektrischen Maschinen verläuft der magnetische Fluss nicht mehr nur in einer Ebene, sondern auf dreidimensionalen Pfaden durch die Maschinenhauptelemente. Bei **Transversalflussmaschinen**, die wie in Abb. 9.1a als rotierende elektrische Maschine ausgeführt sind, wird das Wicklungssystem durch

M. Nell · N. Driendl · B. Groschup
Gruppenleiter, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: martin.nell@iem.rwth-aachen.de; niklas.driendl@iem.rwth-aachen.de;
benedikt.groschup@iem.rwth-aachen.de;

M. Schröder
Technical Specialist, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland
E-Mail: michael.schroeder@iem.rwth-aachen.de

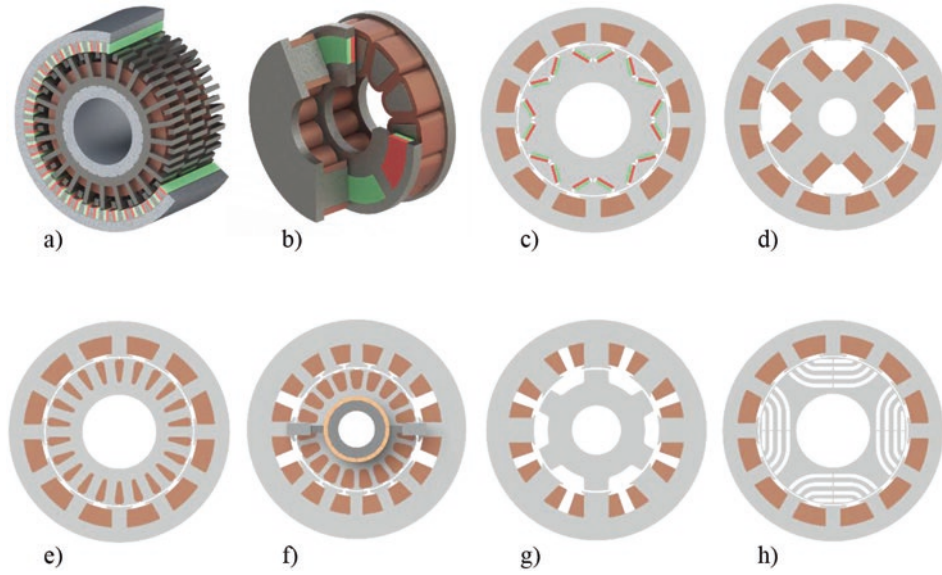

Abb. 9.1 Verschiedene Topologien elektrischer Maschinen: (**a**) Transversalflussmaschine, (**b**) Axialflussmaschine, (**c**) permanentmagneterregte Synchronmaschine, (**d**) fremderregte Synchronmaschine, (**e**) Asynchronmaschine, (**f**) Gleichstrommaschine, (**g**) geschaltete Reluktanzmaschine sowie (**h**) Synchronreluktanzmaschine

einfache Ringwicklungen gebildet. Die Ausrichtung der Windungen entspricht der Bewegungsrichtung. Diskret aufgebaute U-förmige Flussleitstücke führen den Fluss und bilden die magnetischen Pole der Maschine. Diese Anordnung führt zu einer geometrischen Entkopplung der stromführenden und der magnetisch flussführenden Kreise, die dadurch unabhängig voneinander dimensioniert werden können. Der Rotor ist typischerweise mit Permanentmagneten bestückt, Reluktanzrotoren sind möglich. Ein Vorteil der TFM ist der Wegfall der Wickelköpfe. Dadurch sind kleine Polteilungen am Umfang der Maschine realisierbar. Dies führt zu kleinen Drehzahlen und einem großen Drehmoment. Transversalflussmaschinen weisen daher einen großen Durchmesser auf und sind axial kürzer als Radialflussmaschinen gebaut. In der Elektromobilität können sie als Direktantrieb eingesetzt werden und erlauben den Wegfall von Getrieben. Nachteile von Transversalflussmaschinen ergeben sich durch die aufwendige dreidimensionale Flussführung, die mechanische Lagerkonstruktion und die hohe Drehmomentwelligkeit.

Bei der in Abb. 9.1b dargestellten **Axialflussmaschine** werden die Wicklungen üblicherweise als Einzelspulen ausgeführt. Der Rotor lässt sich mit Permanentmagneten oder wie bei einer Asynchronmaschine als Käfig ausführen. Ein zweiteiliger Rotor ist vorteilhaft, um Axialkräfte auszugleichen. Die Maschine kann mit mehreren axial gestaffelten Statoren und Rotorscheiben aufgebaut werden. Die Flussführung erfolgt im Bereich des Stators axial. Im Joch des Rotors werden die Feldlinien tangential geschlossen.

Grundsätzlich können elektrische Maschinen als Synchronmaschine (SM) oder als Asynchronmaschine (ASM) ausgeführt werden. Bei den in der Elektromobilität überwiegend anzutreffenden Radialflussmaschinen ist der Unterschied im Rotor zu finden. Bei der Synchronmaschine erzeugt der Rotor ein zeitlich konstantes Magnetfeld, das synchron mit dem vom Stator erzeugten Drehfeld rotiert. Bei der **permanentmagneterregten Synchronmaschine** (PMSM) wird – wie in Abb. 9.1c dargestellt – das Rotorfeld von Permanentmagneten erzeugt, während dies bei der in Abb. 9.1d gezeigten **fremderregten Synchronmaschine** (FSM) durch eine im Rotor eingebrachte Erregerwicklung geschieht, die über Schleifringe oder kontaktlos mit einem Gleichstrom gespeist wird. Bei der Asynchronmaschine kreist der Rotor etwas langsamer und damit asynchron zum umlaufenden Drehfeld des Stators. Die Differenz der beiden Drehgeschwindigkeiten wird über den Schlupf ausgedrückt. Kreist der Rotor langsamer als das Drehfeld, so ändert sich der magnetische Fluss zeitlich – was eine Spannung induziert, die wiederum einen Strom in den Rotorwicklungen hervorruft.

Permanentmagneterregte elektrische Maschinen besitzen in weiten Betriebsbereichen die höchsten Wirkungsgrade und ermöglichen die größten Leistungsdichten. Bedingt durch moderne Hochenergiepermanentmagnete, wie Seltenerdmagnete mit einer Legierung aus Neodym-Eisen-Bor (NdFeB), sind sehr kompakte Konstruktionen möglich. Trotz der hohen Werkstoffpreise für diese Magnete gibt es keine Alternative, wenn Leistungsdichte das Hauptkriterium bildet. Falls aus Kostengründen vom Einsatz der NdFeB-Magneten abgesehen werden soll, können Kompromisse bei Leistungsdichte und Wirkungsgrad eingegangen werden. Wird die elektrische Maschine mit blockförmigen anstelle von sinusförmigen Strömen gespeist, so handelt es sich um eine **permanentmagneterregte bürstenlose Gleichstrommaschine** (BLDC). Die Magnetkreistopologie aus Abb. 9.1c ist in beiden Fällen identisch. Details in der Gestaltung des Magnetkreises sorgen für die effiziente Funktion beider Maschinen. Teilweise werden auch beide Betriebsarten verwendet. So wird im Sinusbetrieb der Antrieb bei kleinen Drehzahlen geführt und dann bei höheren Drehzahlen in den Blockbetrieb gewechselt. Dies hat die Vorteile des ruckfreien Anfahrens beziehungsweise Fahrens ohne Drehmomentschwankungen bei kleinen Fahrgeschwindigkeiten und eines hohen Wirkungsgrads der Leistungselektronik bei höheren Geschwindigkeiten. Ein etwas schlechterer Wirkungsgrad der Maschine muss bei dieser Betriebsart in Kauf genommen werden. Permanentmagneterregte Maschinen lassen sich für einen großen Drehzahlbereich mit hohen Wirkungsgraden und hohen Drehmomentdichten dimensionieren. Sie sind damit gut als Direktantrieb ohne mechanisches Getriebe geeignet, aber auch für Hochdrehzahlkonzepte mit Getriebe. In der Elektromobilität kommen größtenteils permanentmagneterregte elektrische Maschinen zum Einsatz, da sie gute Wirkungsgrade und durch die Verwendung der Hochenergiepermanentmagnete eine sehr große Leistungsdichte aufweisen. Als Hauptantrieb werden meist Innenrotorkonstruktionen verwendet. Außenläufer bilden die Ausnahme. Bei Radnabenmotoren kann diese Konstruktionsvariante vorteilhaft sein. In der Regel befinden sich die Permanentmagnetsysteme im Rotor des Motors, wie in Abb. 9.2 dargestellt. Von links

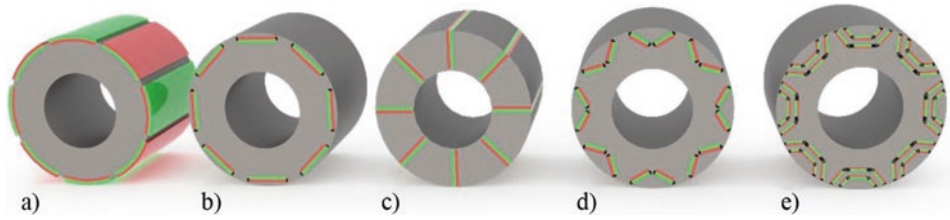

Abb. 9.2 Verschiedene Rotorvarianten für permanentmagneterregte elektrische Maschinen (**a**) auf der Oberfläche des Rotors aufgebrachte Magnete, (**b**) im Rotoreisen eingebettete Magnete, (**c**) Magnetsysteme in Sammleranordnung, um den Luftspaltfluss zu vergrößern, (**d**) V-förmig eingelassene Magnete sowie (**e**) Blechschnitt mit Flusssperren zur Erhöhung des Reluktanzanteils und Permanentmagneten

begonnen, zeigt die Abb. 9.2a auf der Oberfläche des Rotors aufgebrachte Magnete, Abb. 9.2b im Rotoreisen eingebettete Magnete, Abb. 9.2c Magnetsysteme in Sammleranordnung mit Flusskonzentrator, um den Luftspaltfluss zu vergrößern, Abb. 9.2d V-förmig eingelassene Magnete sowie Abb. 9.2e Blechschnitt mit Flusssperren zur Erhöhung des Reluktanzanteils und Permanentmagneten. Mit allen diesen Varianten lässt sich das Luftspaltfeld der elektrischen Maschine anpassen, so dass der Flussverlauf beziehungsweise die induzierte Spannung genau zum speisenden Strom passen, um ein großes und zeitlich konstantes Drehmoment zu erzeugen.

Durch die Permanentmagnete wird ein magnetisches Feld im Rotor erzeugt. Um höhere Drehzahlen zu erreichen, muss dieses Feld im sogenannten Feldschwächbereich aktiv durch zusätzliche Ströme geschwächt werden. Beim Einsatz als Traktionsantrieb dreht sich der Rotor auch weiter, wenn das Fahrzeug rollt und die Maschine nicht aktiv über eine Kupplung vom restlichen Antriebsstrang getrennt wird. Durch die Bewegung der Magnete entlang der Statornuten, in denen die Leiter der Wicklung eingebracht sind, werden durch im Statoreisen induzierte Wirbelströme Schleppmomente und damit sogenannte Schleppverluste erzeugt. Im Fehlerfall kann das Feld des Magnetrotors weiterhin eine Spannung in den Wicklungen induzieren. Diese möglicherweise große Spannung kann zu Schäden der Leistungselektronik führen. Bei der FSM lässt sich die Bildung von Schleppmomenten und hohen induzierten Spannungen im Fehlerfall durch die Abschaltung der Rotorspeisung verhindern.

Die Asynchronmaschine (ASM) verfügt, wie in Abb. 9.1e dargestellt, prinzipiell über den gleichen Statoraufbau wie die SM, unterscheidet sich jedoch im Rotor. Im Gegensatz zur SM haben ASM keine Permanentmagnete und keine mit Gleichstrom gespeiste Erregerwicklung zur Erzeugung des Rotorfeldes. Der Rotor einer ASM kann als Schleifringläufer oder als Käfigläufer beziehungsweise Kurzschlussläufer ausgeführt werden. Der Schleifringläufer trägt ebenso wie der Stator eine Drehstromwicklung. Die Enden der Rotorwicklung werden über Schleifringe herausgeführt und mittels Bürsten kontaktiert. Die Rotorwicklung lässt sich entweder über die Bürsten – gegebenenfalls über einen zusätzlichen Vorwiderstand – kurzschließen oder mit Zusatzspannungen spei-

sen. Dadurch lässt sich die Drehzahl verstellen. Im Bereich der Traktionsmaschinen dominieren die Käfigläufer-ASM. Der Käfigläufer hat in den Nuten einzelne Stäbe, die an den Stirnseiten über Kurzschlussringe leitend verbunden werden. Es besteht kein Zugang mehr zur Rotorwicklung und damit keine Möglichkeit zur direkten Beeinflussung der Drehzahl. Der Rotorkäfig wird häufig aus Aluminium im Druckgussverfahren hergestellt, was verglichen mit der PMSM zu geringeren Material- und Produktionskosten der Maschine führt. Alternativ kann zur Verringerung der Stromwärmeverluste im Rotorkäfig ebendieser aus Kupfer hergestellt werden. Kupferdruckgussverfahren sind im Leistungsbereich bis etwa 150 kW möglich.

Die Erzeugung des Rotorfeldes der ASM unterscheidet sich im Vergleich zur SM. Das grundlegende physikalische Prinzip der ASM ist die elektromagnetische Induktion, die ihr auch den Namen „Induktionsmaschine“ verleiht. Wird eine Drehstromwicklung des Stators einer ASM mit einem Strom der Frequenz f_1 gespeist, ergeben sich symmetrische Ströme, die im Luftspalt der Maschine ein Drehfeld mit Synchrondrehzahl n_1 erzeugen. Dieses Drehfeld induziert aufgrund der elektromagnetischen Induktion in den Leitern der Rotorwicklung Spannungen und Ströme mit der Frequenz f_2. Es entsteht ein Rotordrehfeld, das sich relativ zum Rotor mit der Differenzdrehzahl n_2 und relativ zum Stator mit der Drehzahl $n_1 = n + n_2$ bewegt. Das vom Rotor erzeugte Drehfeld hat somit bezüglich des Stators wieder die Synchrondrehzahl. Gemäß der Lenz’schen Regel versuchen die Rotorströme, ihrer Entstehungsursache – nämlich der Relativbewegung zwischen Stator und Rotor – entgegenzuwirken. Die Rotorströme bilden mit dem Statordrehfeld, das mit synchroner Drehzahl umläuft, deshalb Drehmomente, die den Rotor in Richtung des Statordrehfeldes antreiben und seine Drehzahl derjenigen des Statordrehfeldes anzunähern suchen. Der Rotor kann die Synchrondrehzahl jedoch nie ganz erreichen, da in diesem Fall die Induktionswirkung aufgrund der fehlenden Relativbewegung des Rotors gegen das Statordrehfeld nicht mehr gegeben wäre. Der Rotor zeigt also einen gewissen Schlupf s gegen das Statordrehfeld – er läuft asynchron. Je größer das vom Rotor verlangte Drehmoment ist, desto größer wird der Schlupf. Im Generatorbetrieb der Maschine ist die Drehzahl n des Rotors größer als die Sychnrondrehzahl des umlaufenden Statordrehfeldes. Auch hier versuchen die durch die Relativbewegung induzierten Rotorströme der Lenz’schen Regel entsprechend ihrer Entstehungsursache entgegenzuwirken – wodurch sie zu einem negativen Drehmoment führen.

Der Statorstrom in der ASM hat demnach neben der Erzeugung des Statordrehfeldes auch die Aufgabe, den Rotor in jedem Betriebspunkt der Maschine zu magnetisieren. Der daraus in jedem Betriebspunkt resultierende Blindleistungsbedarf der Maschine führt, verglichen mit der SM, zu niedrigeren Wirkungsgraden. Die Diskrepanz des Wirkungsgrades wächst beim Vergleich der ASM mit der PMSM aufgrund der in der PMSM nicht auftretenden Stromwärmeverluste im Rotor. Größere Einbauvolumen und damit schlechtere Leistungsdichten, vor allem im Teillastbereich der Maschine, sind daher zu berücksichtigen. Erst für höhere Drehzahlen lassen sich ähnliche oder sogar höhere Wirkungsgrade im Vergleich zu PMSM erzielen, da bei der ASM kein aktiver Feldschwächestrom benötigt wird.

Ein Vorteil der von der Statorwicklung abhängigen Erregung der ASM ist die Vermeidung von Verlustmomenten beim Mitschleppen der Maschine im Zuge hoher Drehzahlen. In einem solchen Betriebsfall können Schleppmomente und auch hohe induzierte Spannungen durch das Abschalten der Drehstromversorgung des Stators verhindert werden. Weitere Vorteile der ASM im Vergleich zur PMSM sind die in der Serienfertigung niedrigeren Produktions- und Materialkosten sowie ihre hohe Überlastfähigkeit. Letztgenannte ist dabei den hohen zulässigen Temperaturen im Rotor von mehr als 200 °C geschuldet.

Weitere Arten elektrischer Maschinen spielen in der Elektromobilität aktuell nur eine untergeordnete Rolle. Die in Abb. 9.1f gezeigte **Gleichstrommaschine** (GM) mit mechanischem Kommutator besitzt heutzutage für den Einsatz als Hauptantrieb keine Bedeutung mehr. Sie findet sich vereinzelt noch in fahrbaren Arbeitsmaschinen kleinerer Leistungen wieder. Die **geschaltete Reluktanzmaschine** (GRM) aus Abb. 9.1g zeichnet sich durch einen einfachen und robusten Aufbau ohne Magnete und Rotorwicklung aus. Sowohl Stator als auch Rotor besitzen ausgeprägte Zähne. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten elektrischen Maschinen entsteht das Drehmoment nicht zu wesentlichen Anteilen durch die Lorentzkraft, sondern durch die Reluktanzkraft. Wegen des vergleichsweise einfachen Aufbaus werden für den Rotor weder Wicklungssystem oder spezielle Werkstoffe für Dauermagnete noch Materialien wie seltene Erden benötigt. Nachteilig ist vor allem das pulsierende Drehmoment, das sich insbesondere bei kleiner Statorpolzahl auswirkt. Weitere Nachteile sind pulsierende radiale Kräfte zwischen Rotor und Stator, die die Lager belasten und für eine vergleichsweise hohe Geräuschentwicklung verantwortlich sind. Außerdem ist für den Aufbau des Drehfeldes, wie bei der Asynchronmaschine, ein Magnetisierungsblindstrom erforderlich, wodurch der Scheinleistungsbedarf des Umrichters steigt. Für die Praxis interessanter ist die sogenannte **Synchronreluktanzmaschine** (SynRM), die in Abb. 9.1h dargestellt ist. Ihr Rotor weist eine besondere Blechschnittgeometrie mit Flussleit- und Flusssperrabschnitten auf. Durch die Anordnung der wannenförmigen Flusssperren entstehen entlang des Rotorumfangs Vorzugsrichtungen aufgrund unterschiedlicher magnetischer Leitfähigkeit. Um die Leistungsdichte zu erhöhen, können einzelne Wannen mit Permanentmagneten gefüllt werden. Teilweise werden anstelle von Hochenergiemagneten kostengünstigere Ferritmagnete eingesetzt. Der Statoraufbau und die Statorbestromung ist identisch mit denen der SM und ASM.

An die Traktionsmaschine eines elektrischen Antriebsstrangs werden umfangreiche Anforderungen gestellt.[2] Um eine hohe Reichweite des Fahrzeugs zu ermöglichen, muss die Antriebsmaschine leicht sein und möglichst kompakte Abmessungen besitzen. Zudem ist der im Fahrzeug zur Verfügung stehende Bauraum limitiert. Insgesamt führt das

[2] Vgl. Hombitzer et al. 2014.

zur Forderung einer hohen Leistungsdichte. Jedoch lässt sich die Leistungsdichte einer elektrischen Maschine nicht beliebig steigern, da mit ihrer Zunahme auch die Verlustleistungsdichte steigt. Damit führt die maximal abführbare Verlustleistung zu einer thermischen Auslegungsgrenze. Zur Reduzierung der Verlustleistung und zur effizienten Verwendung der im Fahrzeug gespeicherten elektrischen Energie muss die Maschine einen sehr hohen Wirkungsgrad besitzen. Elektrische Maschinen in Traktionsantrieben werden im Vergleich zu zahlreichen industriellen Einsätzen nicht nur in einem Arbeitspunkt betrieben. Daher ist für die Traktionsmaschine nicht der maximal erreichbare Wirkungsgrad entscheidend, sondern der gemittelte Wirkungsgrad im Verlauf einer typischen Fahrt.[3] Die Antriebsstrangkomponenten „Energiespeicher“, „Leistungselektronik“, „elektrische Maschine“ und „Getriebe“ bilden ein System mit gegenseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen. Dadurch entstehen zusätzliche Randbedingungen für die Entwicklung jener einzelnen Bestandteile. Eine separate Auslegung und Optimierung der Einzelkomponenten ist dementsprechend nicht zielführend. Durch eine ganzheitliche Betrachtung und Berücksichtigung von Wechselwirkungen dieser Komponenten ist es möglich, die Leistungsfähigkeit des gesamten Triebstrangs zu verbessern.[4] Einzelne Aspekte lassen sich im Rahmen der Auslegung nicht getrennt voneinander betrachten, da sie in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander stehen und die Optimierung eines dieser Kriterien zwangsläufig zu Nachteilen eines anderen Kriteriums führt. Somit ist ein Vergleich der oben beschriebenen Topologien der elektrischen Maschinen oder eine Bewertung verschiedener Maschinentopologien nicht allgemein möglich – und auch nicht zielführend. Vielmehr ist die elektrische Maschine in ihrer Anwendung zu bewerten sowie entsprechend der konkreten Anforderungen auszuwählen und auszulegen.

Der in elektrischen Maschinen auftretende magnetische Fluss wird – wie zuvor beschrieben – in einem magnetischen Kreis gezielt geführt. Dies erfolgt durch Materialien, die den magnetischen Fluss gut führen (etwa Elektroband, das in Abschn. 9.1 detailliert beschrieben wird) oder verstärken können (beispielsweise Permanentmagnete, die in Abschn. 9.2 betrachtet werden). Elemente dieses magnetischen Kreises stellen den Stator und den Rotor dar. Außerdem bestehen elektrische Maschinen aus verschiedenartig angeordneten Wicklungen, die von einem elektrischen Strom durchflossen werden und mit denen sich Abschn. 9.3 befasst. Zur elektrischen Abschirmung der stromdurchflossenen Elemente gegeneinander und gegenüber der äußeren Umgebung weisen elektrische Maschinen Isolationsbereiche auf, wie sie in Abschn. 9.4 beschrieben werden. Verschiedenen Kühlmöglichkeiten und -systemen widmet sich indes Abschn. 9.5. Zur mechanischen Stabilisierung der Maschine sowie eventuell zur Führung von beweglichen Elementen existieren unterschiedliche mechanische Konstruktionselemente. Derartige Lager erläutert Abschn. 9.6.

[3] Vgl. Ruf et al. 2016.

[4] Vgl. Hombitzer et al. 2017.

9.1 Elektroblechpaket

Das Stator- und Rotorblechpaket stellt zusammen mit dem Wicklungssystem und gegebenenfalls Permanentmagneten die zentralen Elemente eines elektromagnetischen Energiewandlers dar. Das weichmagnetische Kernmaterial des Stator- und Rotorpakets dient der gezielten Führung des magnetischen Flusses und der Verstärkung des durch die Wicklungen erzeugten magnetischen Feldes.

Sowohl Stator als auch Rotor von rotierenden Radialflussmaschinen sind aus weichmagnetischen Werkstoffen aufgebaut – im Fall von Elektroblech aus gestapelten, voneinander elektrisch isolierten Elektroblechlamellen, wie Abb. 9.3a zeigt. Um die Energieübertragung möglichst effizient zu gestalten, kommt den magnetischen Eigenschaften des Elektroblechs große Bedeutung zu. Eine einfache Magnetisierung, wodurch sich eine hohe Flussdichte im Blech durch einen geringen Einsatz von Strom in den Wicklungen erzielen lässt, sowie geringe Ummagnetisierungsverluste spielen eine zentrale Rolle. Die Flussdichte im Luftspalt zwischen Stator und Rotor ist drehmomentbildend, während sich die Drehzahl proportional zur Ummagnetisierungsfrequenz verhält. Die magnetischen Eigenschaften des weichmagnetischen Kernmaterials stehen im Fokus seiner Anwendung. Das stark nichtlineare magnetische Verhalten in Abhängigkeit von der Frequenz sowie die hohe Sensitivität gegenüber Bearbeitungseinflüssen bilden eine Herausforderung in der gezielten Materialauswahl für definierte Anwendungen sowie in der Materialmodellbildung – und damit in der Berechnung elektrischer Maschinen.[5]

In rotierenden elektrischen Maschinen aus dem Bereich der Elektromobilität werden in der Regel sogenannte nichtkornorientierte Elektrobleche verwendet. Sie verfügen über eine möglichst isotrope Mikrostruktur und kristallografische Textur, um aufgrund der zylindrischen Geometrien und auftretender rotierender magnetischer Felder homogene magnetische Eigenschaften in allen Richtungen der Blechebene zu ermöglichen. Neben

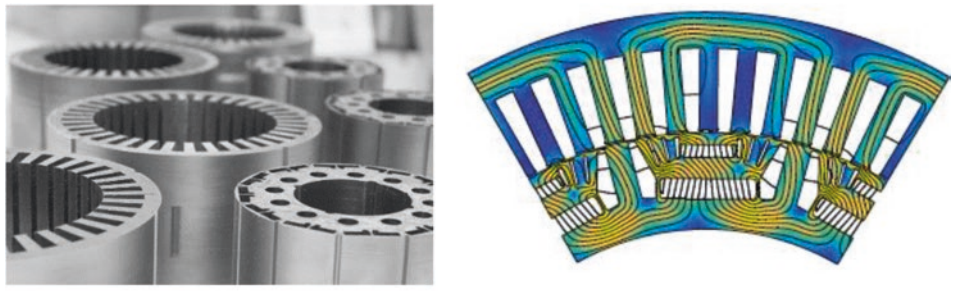

Abb. 9.3 (**a**) Ansicht von Blechpaketen und (**b**) Darstellung eines simulativ ermittelten Flussverlaufs im weichmagnetischen Material einer PMSM

[5] Vgl. Leuning et al. 2018.

Elektroblech stehen weichmagnetische Kompositmaterialien sowie amorphe oder nanokristalline Weichmagnete zur Verfügung.[6] Mit Abstand am häufigsten werden jedoch Elektrobänder aus Eisen-Silizium (FeSi) verwendet.[7] Der Vorteil dieser Werkstoffgruppe sind ihre in weiten Bereichen variierbaren technologischen Eigenschaften. Gütekategorien können dabei von „hochfest" über „hochpermeabel" bis hin zu „frequenzoptimiert" reichen. Außerdem finden FeSi-Elektrobleche mit Blick auf wirtschaftliche Aspekte im Kontext des Gesamtsystems Anwendung.

Übliche Elektrobänder sind Eisenbasislegierungen mit einem Siliziumgehalt von bis zu 3,5 Gewichtsprozent. Sondergüten können einen Siliziumgehalt von bis zu 6,5 Gewichtungsprozent aufweisen. Durch das Legieren mit Silizium wird der spezifische elektrische Widerstand des Materials gezielt erhöht, um den Beitrag der klassischen Wirbelstromverluste während der Ummagnetisierung im Wechselfeld zu verringern. Eine weitere Maßnahme zur Verringerung der klassischen Wirbelstromverluste bildet die Verwendung von Elektroblechlamellen anstelle des Vollmaterials. Je höher die Grundfrequenz ist, desto geringer sollte die Blechdicke sein. Übliche Blechdicken für Traktionsantriebe liegen heutzutage im Bereich von 0,2 bis 0,35 Millimetern. Durch die Verringerung der Blechdicke ergeben sich jedoch Herausforderungen an die Prozesstechnik bei der Verarbeitung sowie eine zwangsläufige Verringerung des Eisenfüllfaktors, bedingt durch den steigenden Anteil von Isolationsmaterial zwischen den Blechen. Wie auch bei der Suche nach der optimalen Mikrostruktur – speziell der Korngröße – und bei der optimalen Blechdicke sowie dem Siliziumgehalt muss stets eine Abwägung zwischen verschiedenen Zielgrößen erfolgen.[8]

Die Bestimmung der magnetischen Eigenschaften erfolgt mit standardisierten Messsystemen anhand verschiedener rechteckiger Probengeometrien oder Ringkernen. Die dabei ermittelten Eigenschaften geben zwar diejenigen des Materials wieder, jedoch stellen sie nicht die zu erwartenden Eigenschaften des Bauteils in der späteren Anwendung dar. Darin liegt eine große Herausforderung, die bei der Weiterentwicklung technisch anspruchsvoller elektrischer Maschinen von zunehmender Bedeutung ist. Die Bearbeitung vom Blech zum gefertigten, bewickelten Blechpaket übt einen negativen Effekt auf die magnetischen Eigenschaften aus, der nicht zu vernachlässigen ist. Vom Bandmaterial ausgehend wird das Material üblicherweise geschnitten und anschließend paketiert, es werden Wicklungen oder Permanentmagnete eingebracht und der Magnetkern wird in ein Gehäuse gepresst. Diese verarbeitenden Verfahrensschritte beeinflussen die magnetischen Eigenschaften des Elektrobandes signifikant.[9] Durch die Verarbeitung werden zum einen mechanische Spannungen in das Blech induziert, zum anderen kann es zu einer elektrischen Kontaktierung der eigentlich voneinander isolierten Blechlamellen kommen, was die magnetischen Eigenschaften negativ beeinflusst.[10]

[6] Vgl. Krings et al. 2017.

[7] Vgl. Moses 2012.

[8] Vgl. Landgraf et al. 2000; Vgl. Leuning et al. 2021.

[9] Vgl. Weiss et al. 2017.

[10] Vgl. Karthaus et al. 2019.

Auch wenn die magnetischen Eigenschaften der Elektrobleche im Fokus ihrer Anwendung stehen, müssen die Materialien weitere Anforderungen erfüllen. Eine hohe Leistungsdichte – und damit in der Regel einhergehend hohe Drehzahlen – beanspruchen das Rotormaterial durch die auftretenden Fliehkräfte mechanisch. Das Material muss fest und formstabil sein. Auch die thermischen Eigenschaften spielen eine große Rolle, um die Verlustwärme effizient abführen zu können. Die Eigenschaften des Elektroblechpakets müssen in Wechselwirkung zur Geometrie und Anwendung im Design-Prozess der elektrischen Maschinen berücksichtigt werden, um den großen Anforderungen im Bereich der Elektromobilität gerecht zu werden.[11]

9.2 Hartmagnete

Wesentliche Anforderungen an den Traktionsmotor in Elektrofahrzeugen bilden eine hohe Leistungs- sowie Drehmomentdichte. Auf dem gegenwärtigen Stand der Technik werden dazu permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit anforderungsgerechten Hartmagneten verwendet. Neben dem möglichst hochpermeablen, verlustarm flussführenden weichmagnetischen Blechpaket erregen hartmagnetische Werkstoffe den magnetischen Fluss im Luftspalt der Maschine, der mit dem resultierenden Drehmoment verknüpft ist. Charakteristische Kenngrößen von Hartmagneten für den Einsatz in elektrischen Maschinen sind dabei

- der Wert $(B \cdot H)_{max}$, das maximale Energieprodukt aus Flussdichte B und Feldstärke H,
- die Remanenzflussdichte B_R,
- die deutlich höhere Koerzitivfeldstärke H_C im Vergleich zu Weichmagneten sowie
- die Temperaturstabilität.

Da Verbindungen mit Seltenerdmetallen, wie Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und Samarium-Cobalt (SmCo), ein deutlich höheres Energieprodukt als Ferrite oder Aluminium-Nickel-Cobalt (AlNiCo) aufweisen, werden sie vorzugsweise in Traktionsmotoren eingesetzt. Insbesondere NdFeB-Magnete weisen gegenwärtig das größte Energieprodukt auf, sind aber wegen ihrer geringen Temperaturfestigkeit nur bedingt einsetzbar. Durch die Zugabe von schweren Seltenerdmetallen wie Dysprosium lässt sich die Temperaturfestigkeit signifikant erhöhen – allerdings bei gleichzeitiger Verringerung der Remanenz.[12] Entscheidende Nachteile liegen in der geopolitischen Verfügbarkeit und dem hohen Preis von Seltenerdmetallen. Im Fokus der Forschung steht daher unter anderem die Entwicklung von seltenerdfreien Verbindungen (Abb. 9.4).[13]

[11] Vgl. Nell et al. 2020.

[12] Vgl. Glöser-Chahoud et al. 2016.

[13] Vgl. Kuz'min et al. 2014; Vgl. Putri et al. 2018.

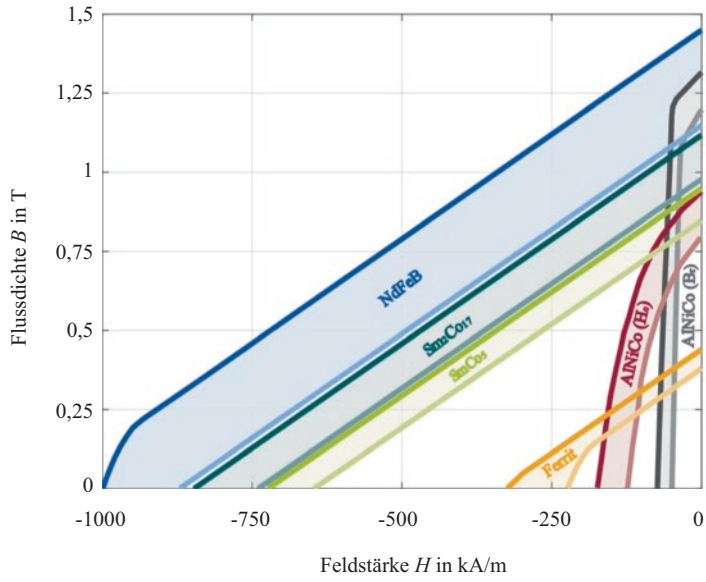

Abb. 9.4 Typische Entmagnetisierungskennlinien verschiedener Werkstoffe bei 20 °C

9.3 Wicklungen elektrischer Maschinen

Die Aufgabe des Wicklungssystems in rotierenden elektrischen Maschinen ist die Erzeugung eines im Luftspalt umlaufenden Feldes. Aufgrund des gegenseitigen Wechselwirkens des Feldes, das durch das im Stator befindliche Wicklungssystem erzeugt wird, und dem Rotorfeld findet die elektromagnetische Wandlung im Luftspalt der Maschine statt – ein Drehmoment bildet sich aus. Das Wicklungssystem spielt somit eine zentrale Rolle im Energiewandlungsprozess.

Den Ausgangspunkt eines Drehfeldes bildet ein symmetrisches, meist dreisträngiges Drehstromsystem. Aus Redundanzgründen können auch mehr als drei Stränge konstruiert werden. Die einzelnen Stränge unterscheiden sich dabei lediglich in ihrer Phasenlage – Amplitude und Frequenz sind identisch. Die drei Stränge des Drehstromsystems sind, wie in Abb. 9.5 dargestellt, jeweils mit um 120 Grad räumlich verteilten Statorspulen (Strängen) kontaktiert. Die Anfänge der Stränge werden mit U, V und W (Wicklungsbeginn) und ihre Enden mit X, Y und Z (Wicklungsende) bezeichnet. Werden die Spulen von einem Drehstromsystem wie in Abb. 9.5 gespeist, wird dadurch ein Feld hervorgerufen, das sich um die Rotationsachse des Rotors dreht. Bei kontinuierlicher Betrachtung resultiert daraus ein betragsmäßig konstanter Feldvektor, der mit synchroner Drehzahl n_1 zum Drehstromsystem des Stators mit der Frequenz f_1 rotiert – das Drehfeld. Da das Drehfeld im vorliegenden Fall zwei diskrete Statorpole ausbildet, handelt es sich um ein zweipoliges Drehfeld; folglich ist die Polpaarzahl $p = 1$. Durch symmetrische Vervielfältigung derarti-

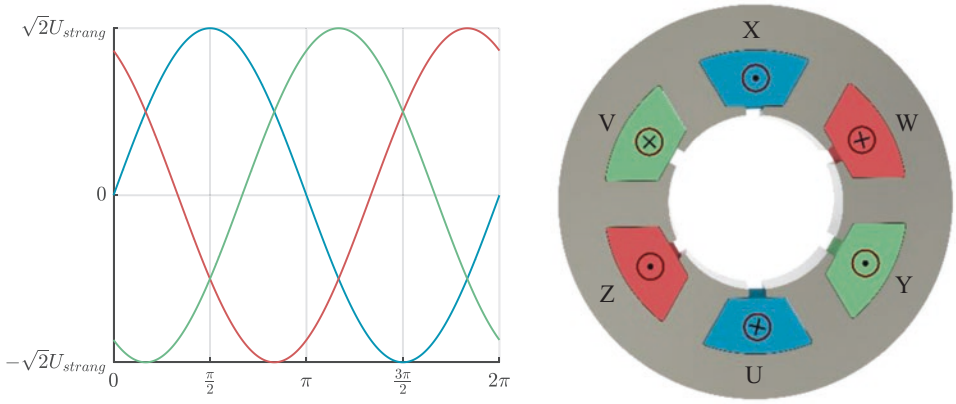

Abb. 9.5 Drehstromsystem einer zweipoligen elektrischen Maschine

ger Spulensysteme entlang des Statorumfangs mit fortlaufender Phasenfolge U, V und W sowie deren Rückleiter X, Y und Z lässt sich eine beliebige Polpaarzahl realisieren. Das Verhältnis aus Drehfelddrehzahl n_1 zu Frequenz der Ströme f_1 wird durch die Polpaarzahl p bestimmt. Durch Wahl der Polpaarzahl und der Speisefrequenz kann somit direkt Einfluss auf die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristik des Motors genommen werden.

Aufbau der Wicklung

Für die Aufteilung der Spulenseiten in diskrete, am Umfang der Maschine verteilte Nuten N sind verschiedene Anordnungen möglich, die durch die sogenannte Lochzahl der Wicklung mit m Strängen beschrieben sind: $q = N/(2 \cdot m \cdot p)$. Es wird zwischen Ganzlochwicklungen ($q \in \mathrm{N}$) und Bruchlochwicklungen ($q \in \mathrm{Q} \setminus \mathrm{N}$) unterschieden. Wicklungen mit $q \geq 1$ sind verteilte Wicklungen, während solche mit $q < 1$ eine Teilmenge der Bruchlochwicklungen bilden und konzentrierte Wicklungen beziehungsweise Einzelzahnwicklungen sind. Konzentrierte Wicklungen zeichnen sich durch ihre geringen Wickelkopfabmessungen und ihre simple Fertigung aus. Nachteilig ist jedoch die Erzeugung zusätzlicher Harmonischer im Luftspaltfeld. Konzentrierte Wicklungen finden somit keine Anwendung in Asynchronmaschinen. Beim Einsatz verteilter Wicklungen kann das Luftspaltfeld möglichst sinusförmig gestaltet werden, was wiederum die Harmonischen reduziert. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Geräuschentwicklung und die Verlustdichte des Motors aus. Durch die häufigen Kreuzungspunkte wächst jedoch der Bauraumbedarf im Bereich der Wickelköpfe.

Die Leiter der Wicklung werden in Traktionsantrieben als Runddrahtleiter oder als Hairpinleiter ausgeführt. Runddrahtleiter bieten den Vorteil, nicht gewünschte Stromverdrängungseffekte zu reduzieren. Ihr Nachteil ist ein im Vergleich zur Hairpinwicklung geringerer Kupferfüllfaktor der Nuten, was bei gegebener Drehmomentanforderung und gleichen thermischen Randbedingungen zu einem höheren Bauraumbedarf der Maschine führt. Nachteilig sind Hairpinwicklungen bezüglich des höheren Wechselstromwider-

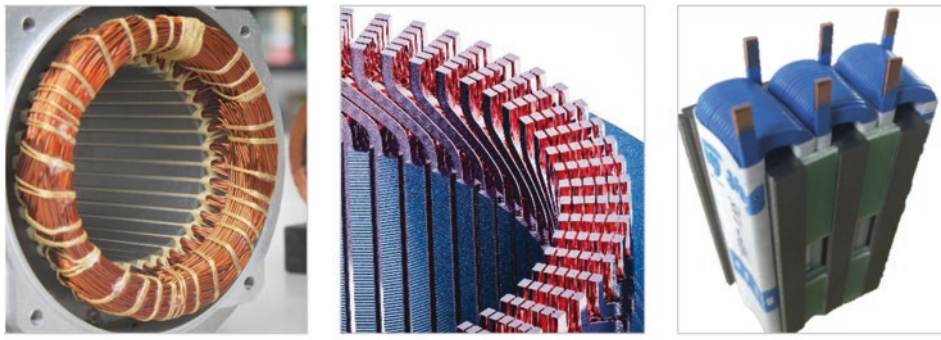

Abb. 9.6 **a** Runddrahtwicklung, **b** Hairpinwicklung, **c** Formspule

stands aufgrund von Stromverdrängung und der Kontaktierung der Wickelköpfe im Produktionsprozess. Die Wickelköpfe der Hairpinwicklungen sind im Vergleich zu denen der Runddrahtwicklungen kompakter auszuführen, was sich vorteilhaft auf den Bauraumbedarf auswirkt.

Neben den zuvor beschriebenen Verfahren steht auch der Einsatz von Formspulen im Fokus der Forschung. Dabei ist eine weitere Erhöhung des Kupferfüllfaktors von Interesse. Formspulen können beispielsweise gegossen oder umformtechnisch hergestellt werden,[14] wobei die nachträgliche Isolation der Formspulen eine Herausforderung darstellt (Abb. 9.6).

9.4 Aufbau von Isoliersystemen

Die Hauptaufgabe des Isoliersystems der elektrischen Maschine besteht darin, die spannungsführenden Komponenten gegeneinander und gegen das Statorblech zu isolieren. Isoliersysteme sind in modernen elektrischen Antriebssträngen Zwischenkreisspannungen von bis zu 800 V oder höher ausgesetzt. Außerdem führt die Verwendung von schnellschaltenden Halbleitern zu immer größer werdenden Belastungen. In Abb. 9.7 ist ein exemplarischer Querschnitt einer Statornut zu sehen, der die wesentlichen Komponenten enthält.

Windungsisolierung
Die Kupferleiter in der elektrischen Maschine sind mit einer isolierenden Lackschicht oder mehreren davon überzogen. Dabei kommen polymerbasierte Isoliermaterialien wie Polyesterimid und Polyamidimid zum Einsatz.[15] In Anwendungen, die besonders hohen elektrischen Belastungen ausgesetzt sind, wird oftmals Polyetheretherketon (PEEK) verwendet.

[14] Vgl. Hameyer 2021.
[15] Vgl. Stone et al. 2014.

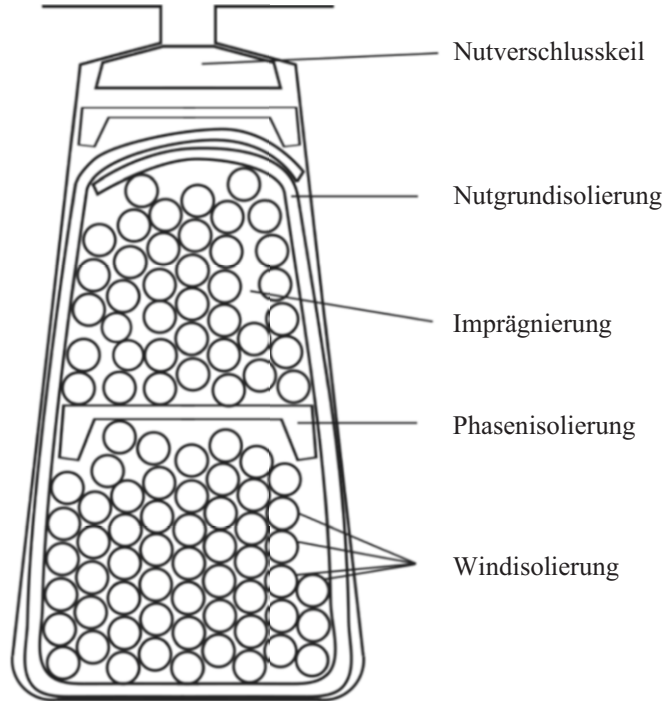

Abb. 9.7 Querschnitt einer Statornut

Nutgrundisolierung
Die elektrische Isolierung des Statorblechs wird durch die Nutgrundisolierung sichergestellt. Eine zusätzliche Funktion dieser Komponente besteht darin, den mechanischen Abrieb der Leiter zu verringern und die Wicklung insbesondere gegen die scharfen Kanten des Blechs zu schützen. Als Materialien kommen unter anderem flexible Laminate und Aramidpapier zum Einsatz. Zusätzlich werden beispielsweise Nutkeile verwendet, um die Leiter in Position zu halten und das Herausrutschen aus der Nut zu verhindern.[16]

Phasenisolierung
Zwischen den einzelnen Phasen treten große Potenzialdifferenzen auf. Zur Isolierung werden Phasentrenner im Wickelkopf und in der Nut zwischen die Drahtbündel der verschiedenen Phasen gelegt. Die verwendeten Materialien gleichen denen, die für die Nutgrundisolierung verwendet werden.[17]

[16] Vgl. Chapman et al. 2008.
[17] Vgl. Chapman et al. 2008.

Imprägnierung/Verguss
Das Isoliersystem wird imprägniert beziehungsweise vergossen, um Lufteinschlüsse zwischen den Einzelkomponenten zu verringern. Dies erhöht die Isolierfestigkeit und verbessert zudem die Wärmeleitfähigkeit. Zusätzlich wird die Wicklung gegen äußere Einflüsse geschützt und der mechanische Abrieb sowie Vibrationen werden verringert.[18]

Auslegung von Isoliersystemen
Isoliersysteme von elektrischen Maschinen werden üblicherweise entsprechend der Betriebsspannung klassifiziert. In automobilen Traktionsantrieben werden umrichterbetriebene elektrische Niederspannungsmaschinen unterhalb einer effektiven Spannung von 700 V eingesetzt. Diese werden als Isoliersystem des Typs I bezeichnet. Zum Einsatz kommen in der Regel konventionelle, polymerbasierte Stoffe. Das Isoliersystem dieser Maschinen muss während der gesamten Betriebsdauer den elektrischen Belastungen standhalten und darf in keinem Betriebspunkt Teilentladungen aufweisen. In Isoliersystemen des Typs II werden Materialien eingesetzt, die Teilentladungen standhalten können. Solche Isoliermaterialien werden vor allem in Hochspannungsmaschinen verwendet. Teilentladungen können in luftgefüllten Hohlräumen innerhalb des Isoliersystems entstehen und werden insbesondere durch den Umrichterbetrieb und die damit verbundenen steilen Spannungsflanken begünstigt. Durch das Auftreten von Teilentladungen werden die Isoliermaterialien beschädigt, so dass es innerhalb kürzester Zeit zum Ausfall der Maschine kommen kann. Die Teilentladungsfreiheit wird vor allem durch die Auswahl einer ausreichenden Isolierschichtdicke sichergestellt. Das entgegengesetzte Bestreben ist jedoch, die Isolierschichtdicke so gering wie möglich zu halten, um den Kupferfüllfaktor innerhalb der Nut und damit auch das Drehmoment zu maximieren. Durch normative Vorgaben (DIN EN 60034-18-41)[19] wird für ein Isoliersystem eine Prüfspannung definiert, der das Isoliersystem in Typ- und Qualifizierungsprüfungen standhalten muss. Sie ist abhängig von der Zwischenkreisspannung und diversen Sicherheitsfaktoren. So wird insbesondere das Überschwingverhalten abgebildet, das wiederum von der Länge der Anschlusskabel und der Anstiegszeit der Spannung abhängig ist. Es wird ebenfalls eine gegenüber den Testbedingungen erhöhte Temperatur im Betrieb berücksichtigt. Um die elektrische Belastung des Isoliersystems im Auslegungsprozess abzuschätzen, lassen sich Modelle verwenden, mit deren Hilfe auf Basis einer Simulation nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) Teilentladungsprozesse modelliert werden können. Diese Modelle stammen ursprünglich aus der Hochspannungstechnik und werden zur Charakterisierung von Gasentladungsprozessen verwendet. So ist es möglich, die Teilentladungseinsetzspannung der Geometrie zu berechnen. Die beschriebene Methodik wird vor allem für Ersatzanordnungen der Windungsisolierung, aber auch für die Nutgrundisolierung eingesetzt.[20]

[18] Vgl. Chapman et al. 2008.

[19] Vgl. Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik (DIN EN 60034-18-41 (VDE 0530-18-41)) 2021.

[20] Vgl. Driendl et al. 2021; Vgl. Pauli et al. 2020.

9.5 Kühlsystem

Ein stark vereinfachtes Blackbox-Modell einer elektrischen Maschine ist in Abb. 9.8 dargestellt. Im motorischen Betrieb der Maschine wird im Zuge des elektromagnetischen Energiewandlungsprozesses elektrische Leistung P_{el} in mechanische Leistung P_{mech} umgewandelt. Die Verluste des Prozesses können mit Hilfe des Wirkungsgrades η oder eines Verlustfaktors ξ ausgedrückt werden.

Um ein Überhitzen der temperaturkritischen Komponenten wie der Wicklung, den Lagern oder den Permanentmagneten zu vermeiden, muss die entstehende Verlustleistung $P_{verlust}$ in Form eines Wärmestroms $\dot{Q}_{gesamt}$ aus der elektrischen Maschine abgeführt oder durch die Wärmekapazität der Bauteile zwischengespeichert werden. Die Wahl des Kühlsystems beeinflusst den Wärmestrom, der sich aus der Maschine abführen lässt – und somit insbesondere in stationären Betriebspunkten über den Verlustfaktor ξ die maximale Leistung, die der Energiewandler dauerhaft abgeben kann. In Anwendungen der Elektromobilität sind vorwiegend dynamische Lastkollektive vorzufinden. Die entstehende dynamische Verlustleistung muss gemittelt über einen Lastzyklus aus der Maschine abgeführt werden. Bei der Grobdimensionierung elektrischer Maschinen nach dem aktuellen Stand der Technik findet sich dieser Zusammenhang wieder. Die Esson'sche Ziffer C_{mech} kann benutzt werden, um die mechanische Ausgangsleistung P_{mech} in Abhängigkeit von der aktiven Länge l_i, dem Bohrungsdurchmesser D und der Betriebsdrehzahl im Nennpunkt n_0 auszudrücken.

In Auslegungshandbüchern wird bereits bei der Auswahl der Esson'schen Ziffer C_{mech} das Kühlsystem berücksichtigt. Diese wird im Bereich von kleiner 7 kW · min /m^3 empfohlen.[21] Ein theoretisches maximales Potenzial kann abgeschätzt werden, indem bei Vorgabe maximaler Anwendungstemperaturen der Temperaturabfall über den konvektiven Wärmeübergang zum Fluid des Kühlsystems veranschlagt wird. Dabei ergeben sich theoretisch mögliche Werte, die bis zu zwei Zehnerpotenzen höher liegen.[22] Auf dem aktuellen Stand der Technik kann dieses theoretische Potenzial nicht voll ausgenutzt werden, da aufgrund der größtenteils konduktiven Wärmeleitung in der Maschine von der Quelle zur Senke zusätzlich Temperatur abfällt und so nicht das volle Potenzial am Kühlsystem zur Verfügung steht. Zur Vermeidung dieses nicht gewollten Temperaturabfalls wird ein zu-

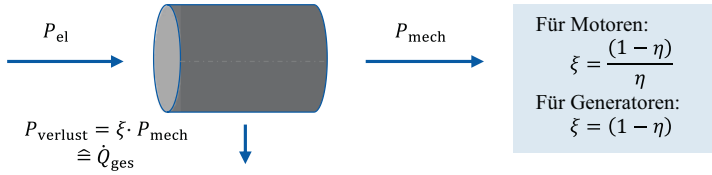

Abb. 9.8 Blackbox-Modell einer elektrischen Maschine

[21] Vgl. Pyrhönen et al. 2008.

[22] Vgl. Groschup et al. 2019.

nehmend besseres Verständnis einzelner Wärmewiderstände in der Maschine erforscht[23] und es werden Kühlsysteme entwickelt, in denen die Kühlung möglichst nahe an den Wärmequellen beziehungsweise den temperaturkritischen Bauteilen liegt.[24]

9.6 Lagerung

Für die elektromagnetische Energiewandlung in modernen Traktionsantrieben mit hohen Leitungsdichten ist ein möglichst kleiner und konstanter Luftspalt essenziell. Um ihn gewährleisten zu können, müssen die in elektrischen Maschinen auftretenden, nicht drehmomentbildenden Kräfte abgestützt werden. Die Hauptaufgaben von Lagern in elektrischen Maschinen bestehen folglich darin, Rotor und Stator exakt und zentrisch zueinander zu positionieren sowie eine möglichst effiziente Drehbewegung zu realisieren. Die zentrische Positionierung durch die Lager ist besonders wichtig, da bei Exzentrizität des Rotors in Betrieb erhebliche Zusatzbelastungen der Lager durch einseitige elektromagnetische Kräfte auftreten. Diese zusätzlichen Belastungen auf die Lagerung sind wiederum stark abhängig von der Exzentrizität.[25] Die Belastung kann zu einer erhöhten Schwingungs- und Schallemission führen.[26]

In Traktionsmaschinen werden aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit und Großserieneignung primär Wälzlager eingesetzt. Die Gestaltung der Lagerung mit Wälzlagern lässt sich flexibel auf die für Traktionsanwendungen relevanten Betriebs- und Umgebungsbedingungen anpassen. Ein Wälzlager besteht aus zwei Laufflächen, zwischen denen Wälzkörper durch eine Abrollbewegung eine Relativbewegung ermöglichen. Die Wälzkörper können dabei durch einen Käfig geführt werden. Die Gestalt der Wälzkörper ist abhängig von den auftretenden Betriebskräften. Durch die Abrollbewegung der Wälzkörper im Lager entsteht Reibung und Verschleiß. Um eine anforderungsgerechte Lebensdauer und Effizienz garantieren zu können, muss eine geeignete Schmierung gewählt werden. Für die Auslegung der Lagerung sind unter anderem die Einflussgrößen „Betriebs-/Umgebungsbedingungen“, „Bauraum“, „Schwingungsverhalten“, „Lebensdauer“ und „Montage/Demontage“ zu berücksichtigen. Die einzelnen Anforderungen zeigen eine starke Abhängigkeit voneinander auf. So ist die Lebensdauer der Lagerung abhängig von Betriebsbedingungen wie der Temperatur, dem Einwirken von Lastspizen in zyklischer Belastung oder eventuellen Lagerspannungen in elektrischen Maschinen. Diese Wechselwirkungen und Einflussgrößen müssen bei der lebensdauerfesten Auslegung von Lagerungen in elektrischen Maschinen bedacht werden (Abb. 9.9).

[23] Vgl. Groschup et al. 2021.

[24] Vgl. Groschup et al. 2019; Vgl. Groschup et al. 2021.

[25] Vgl. Ruf et al. 2016.

[26] Vgl. Jaeger et al. 2020; Vgl. Mülder et al. 2019.

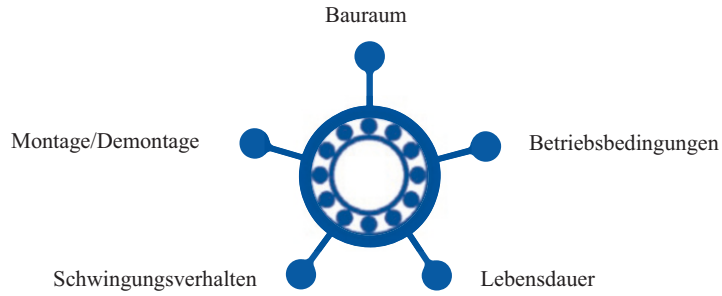

Abb. 9.9 Einflussgrößen bei der Auslegung von Wälzlagern elektrischer Maschinen

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

Chapman, M; Frost, N; Bruetsch, R.: *Insulation Systems for Rotating Low-Voltage Machines*: IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008, S. 257–260

Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik: *DIN EN 60034-18-41 (VDE 0530-18-41)* (Deutsche Norm). Berlin: VDE Verlag GmbH, Mai 2021

Driendl, N; lütke Jüdefeld, C; Pauli, F; Schröder, M; Hameyer, K.: *Ladungsträgerbasierte Modellierung von Teilentladungsprozessen in Runddrahtwicklungen umrichtergespeister Niederspannungsmaschinen*. In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Jg. 138, 2021, Nr. 2, S. 85–95

Fischer, R.: *Elektrische Maschinen.* 14., aktualisierte und erw. Aufl. Aufl. München: Hanser, 2009

Glöser-Chahoud, S; Kühn, A; Tercero Espinoza, L. A. 2016: *Globale Verwendungsstrukturen der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium: Eine szenariobasierte Analyse der Auswirkung der Diffusion der Elektromobilität auf den Bedarf an Seltenen Erden*. In: Working Paper Sustainability and Innovation. Karlsruhe

Groschup, B; Komissarov, M; Stevic, S; Hameyer, K.:*Operation Enhancement of Permanent Magnet Excited Motors with Advanced Rotor Cooling System*: IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 6/19/2019–6/21/2019: IEEE 2019, S. 1–6

Groschup, B; Nell, M; Hameyer, K.: *Operational Enhancement of Electric Drives by Advanced Cooling Technologies*: 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 4/22/2019–4/23/2019: IEEE 2019, S. 65–70

Groschup, B; Nell, M; Pauli, F; Hameyer, K.: *Characteristic Thermal Parameters in Electric Motors: Comparison between Induction- and Permanent Magnet Excited Machine*. In: IEEE Trans. On Energy Conversion 2021, S. 1

Groschup, B; Pauli, F; Hameyer, K.: *Influence of the Preformed Coil Design on the Thermal Behavior of Electric Traction Machines*. In: Energies, Jg. 14, 2021, Nr. 4, S. 959

Hameyer, K. (Hrsg.): *FlexiCoil: Entwicklung einer großserienfähigen und wirtschaftlichen Produktionstechnologie für umformtechnisch hergestellte Formspulen elektrischer Antriebe. Abschlussbericht.* Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung, 42. 1. Auflage Aufl., Düren: Shaker, 2021

Hombitzer, M; Franck, D; Hameyer, K.: *Entwicklungsmethodik für schnelldrehende, permanentmagneterregte Traktionsmaschinen*. In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Jg. 134, 2017, Nr. 2, S. 139–147

Hombitzer, M; Franck, D; von Pfingsten, G; Hameyer, K.: *Permanentmagneterregter Traktionsantrieb für ein Elektrofahrzeug: Bauraum, Wirkungsgrad und Kosten – das Auslegungsdreieck*. In: Schäfer, H. (Hrsg.): Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge: *Das kostenoptimale elektrische Antriebssystem, mitentscheidend für den Markterfolg* (Reihe: Haus der Technik Fachbuch, Bd. 131). Renningen: Expert Verlag, 2014, S. 277–291

Jaeger, M; Drichel, P; Schröder, M; Berroth, J; Jacobs, G; Hameyer, K.: *Die Kopplung elektrotechnischer und strukturdynamischer Domänen zu einem NVH-Systemmodell eines elektrischen Antriebsstrangs*. In: e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, Jg. 137, 2020, Nr. 4–5Nr., S. 258–265

Karthaus, J; Elfgen, S; Leuning, N; Hameyer, K.: *Iron loss components dependent on mechanical compressive and tensile stress in non-oriented electrical steel*. In: JAE, Jg. 59, 2019, Nr. 1, S. 255–261

Krings, A; Boglietti, A; Cavagnino, A; Sprague, S.:*Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines*. In: IEEE Trans. Ind. Electron., Jg. 64, 2017, Nr. 3, S. 2405–2414

Kuz'min, M. D; Skokov, K. P; Jian, H; Radulov, I; Gutfleisch, O.: *Towards high-performance permanent magnets without rare earths*. In: Journal of Physics: Condensed matter, Jg. 26, 2014, Nr. 6, S. 1–5

Landgraf, F; Emura, M; Teixeira, J; Campos, M. de: *Effect of grain size, deformation, aging and anisotropy on hysteresis loss of electrical steels*. In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Jg. 215–216, 2000, S. 97–99

Leuning, N; Elfgen, S; Groschup, B; Bavendiek, G; Steentjes, S; Hameyer, K.: *Advanced Soft- and Hard-Magnetic Material Models for the Numerical Simulation of Electrical Machines*. In: IEEE Trans. Magn., Jg. 54, 2018, Nr. 11, S. 1–8

Leuning, N; Ukwungwu, D; Nell, M; Pauli, F; Steentjes, S; Hameyer, K.: *The Effect of Structural Material Parameters on the Operational Characteristic of Traction Drives for EV Applications*. In: IEEE Trans. Magn., Jg. 57, 2021, Nr. 2, S. 1–6

Moses, A. J.:*Energy efficient electrical steels: Magnetic performance prediction and optimization*. In: Scripta Materialia, Jg. 67, 2012, Nr. 6, S. 560–565

Mülder, C; Franck, M; Schröder, M; Balluff, M; Wanke, A; Hameyer, K.: *Impact Study of Isolated and Correlated Manufacturing Tolerances of a Permanent Magnet Synchronous Machine for Traction Drives*: IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 12.05.2019–15.05.2019: IEEE 2019, S. 982–987

Nell, M; Leuning, N; Mönninghoff, S; Groschup, B; Müller, F; Karthaus, J; Jaeger, M; Schröder, M; Hameyer, K.: *Complete and accurate modular numerical computation scheme for multi-coupled electric drive systems*. In: IET Science, Measurement & Technology, Jg. 14, 2020, Nr. 3, S. 259–271

Pauli, F; Kilper, M; Driendl, N; Hameyer, K.:*Modeling of the Partial Discharge Process Between the Winding and the Stator of Low Voltage Machines for Traction Applications*. In: IEEE Trans. Energy Convers. 2020, S. 1

Putri, A. K; Nell, M; Hombitzer, M; Franck, D; Hameyer, K.:*On the Design of a PMSM Rotor with Ferrite Magnets to Substitute a Rare Earth Permanent Magnet System*: XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 03.09.2018–06.09.2018: IEEE 2018, S. 304–310

Pyrhönen, J; Jokinen, T; Hrabovcová, V. (Hrsg.):*Design of Rotating Electrical Machines.* 1 ed. Aufl., Chichester: Wiley, 2008

Ruf, A; Schröder, M; Putri, A. K; Konrad, R; Franck, D; Hameyer, K.:*Analysis and determination of mechanical bearing load caused by unbalanced magnetic pull*. In: COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Jg. 35, 2016, Nr. 2, S. 728–743

Ruf, A; Steentjes, S; Pfingsten, G. von; Grosse, T; Hameyer, K.:*Requirements on Soft Magnetic Materials for Electric Traction Motors*: 7th International Conference on Magnetism and Metallurgy (WMM) 2016, S. 111–128

Stone, G. C; Culbert, I; Boulter, E. A; Dhirani, H. (Hrsg.):*Electrical insulation for rotating machines. Design, evaluation, aging, testing, and repair.* IEEE press series on power engineering. Second edition Aufl., Hoboken New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2014

Weiss, H. A; Leuning, N; Steentjes, S; Hameyer, K; Andorfer, T; Jenner, S; Volk, W.:*Influence of shear cutting parameters on the electromagnetic properties of non-oriented electrical steel sheets*. In: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Jg. 421, 2017, S. 250–259

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

