



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Leichtbau in elektrischen Maschinen

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Abt. Alternative Energiewandler (AEW)
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart**

Volker Bosch

Stand: 2012-10-31 (V02)

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**
German Aerospace Center

Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Dr.-Ing. Volker Bosch
Phone: +49 711 6862-8095
Fax: +49 000 000-0000
Volker.Bosch@dlr.de
www.DLR.de

1 Historischer Rückblick

Elektrische Maschinen werden seit rund 150 Jahren gebaut.

In der ersten Hälfte dieser Zeit fanden dramatische Verbesserungen der Werkstoffe statt, die zu kompakteren Bauformen führten:

- Temperaturbeständige Isolation: Diese ermöglicht eine Verkleinerung der Wicklungsflächen, insb. bei Erregerwicklungen. Daraus resultieren Bauformen mit kürzeren Eisenwegen und damit geringerer Masse.
- Zuverlässige Lackisolation: Die Fehlerrate der Lackdrahtisolation wurde dramatisch verbessert, so dass kein Umspinnen der Drähte erforderlich ist. Der daraus resultierende höhere Kupferfüllfaktor ergibt einen geringeren Querschnitt des Wickelfensters und führt somit auch wieder zu einer Reduzierung des Eisens in der Maschine.
- Die Verminderung der Wirbelstromverluste durch den Einsatz von Si-legiertem Trafoblech und Lack-isolierten Blechlamellen ermöglichte eine weitere Verkleinerung der Maschinenoberfläche.

Das Potential dieser Verbesserungen ist heute weitgehend ausgereizt.

2 Weichmagnetische Werkstoffe

Der magnetische Fluss wird in der Regel in elektrischen Maschinen über weichmagnetische Werkstoffe geführt. Sie zeichnen sich gegenüber Luft durch eine um mehrere Zehnerpotenzen bessere magnetische Leitfähigkeit bzw. Permeabilität (μ) aus.

Als Werkstoffe für magnetische Leiter stehen die drei ferromagnetischen Metalle Eisen, Nickel und Kobalt zur Verfügung. Aus Kostengründen wird meist Eisen in Form silizium-legierter Bleche (Trafoblech) verwendet.

Nickel besitzt zwar eine höhere Anfangspermeabilität als Eisen, weist jedoch eine deutlich geringere Sättigungsinduktion als dieses auf und ist somit in elektrischen Maschinen nicht sinnvoll zu verwenden, da der übertragbare magnetische Fluss dem Produkt aus Sättigungsinduktion und Querschnittsfläche proportional ist. Unter dem Handelsnamen *Vacoperm* werden nickel-legierte Bleche von der Vacuumschmelze Hanau angeboten (Vac2, 2012). Das wichtigste Einsatzgebiet dieser Werkstoffe ist die Abschirmung magnetischer Felder oder der Aufbau empfindlicher Messwandler.

Aufgrund der hohen Kosten und der Schädlichkeit für den menschlichen Organismus wird reines Kobalt nicht für elektrische Maschinen eingesetzt. Im Handel sind kobalt-legierte Eisenbleche erhältlich, deren Sättigungsinduktion gegenüber klassischem Trafoblech um ca. 30% erhöht ist. Unter dem Handelsnamen *Vacoflux* werden entsprechende Werkstoffe von der Vacuumschmelze Hanau angeboten (Vac1, 2012).

Weichmagnetische Ferrite haben aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Sättigungsinduktion keine Bedeutung im Elektromaschinenbau. Bezogen auf Trafoblech liegt die Sättigungsinduktion der Ferrite in der Größenordnung von 20%. Da Ferrit ein gesinterter keramischer Werkstoff ist, sind die daraus hergestellten Teile nicht sonderlich maßhaltig (Schrumpfung beim Brennen) und müssen schleifend nachbearbeitet werden.

Kunststoffgebundenes Pulvereisen bzw. Soft Magnetic Composites (SMC) ist von den magnetischen Eigenschaften mit Eisen vergleichbar. Aufgrund des amagnetischen Bindemittels ist die Permeabilität jedoch geringer als bei Trafoblech. Der Binder wirkt wie ein verteilter magnetischer Luftspalt. Da der Binder auch die elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs reduziert, sinken die Wirbelstromverluste

des Materials im Vergleich zu metallischen Blechen. In Folge des Herstellprozesses (Pulverisierung des Eisens) steigen jedoch die Hystereseverluste gegenüber dem metallischen Eisen an.

2.1 Leichtbau durch weichmagnetische Werkstoffe

Die höhere Sättigungsinduktion kobalt-legierter Trafobleche erlaubt eine Reduzierung der für die Führung des magnetischen Flusses erforderlichen Querschnittsfläche (Eisenquerschnitt). Durch diese Maßnahme steigt die Flussdichte im Werkstoff an. Da die Eisenverluste mit dem Quadrat der Flussdichte ansteigen, erscheint diese Maßnahme auf den ersten Blick nicht sinnvoll. Da die Eisenverluste jedoch volumenspezifische Verluste sind, sind die absoluten Verluste eines kobaltlegiertem Blechpakets nicht notwendigerweise höher als die eines gewöhnlichen Blechpakets.

Die Kosten von kobalt-legiertem Trafoblech liegen mehrere Größenordnungen über denen von silizium-legiertem Blech. Da Kobalt mittlerweile ein begehrtes Spekulationsobjekt diverser Rohstoff-Fonds geworden ist, kann die langfristige Kostenentwicklung nicht vorhergesagt werden.

Für extrem hochtourige Maschinen oder elektrische Maschinen mit einer sehr hohen Polpaarzahl empfiehlt sich die Verwendung von Pulvereisen-Werkstoffen (SMC) anstelle von Trafoblech. Da die Wirbelstromverluste in guter Näherung quadratisch mit der Frequenz ansteigen, die Hystereseverluste jedoch linear, weisen Pulvereisenwerkstoffe bei hohen Frequenzen geringere Eisenverluste auf als Trafobleche. Entsprechende Maschinen können also durch den Einsatz von Pulvereisenwerkstoffen bei gleichen Eisenverlusten kleiner gebaut werden als Maschinen aus Trafoblech.

2.2 Leichtbau durch die Konstruktion der weichmagnetischen Komponenten

Elektrische Maschinen, die aus einem Blechpaket bestehen, weisen in der Regel eine rechteckige Form der Wicklung auf. Diese Tatsache liegt darin begründet, dass der magnetische Fluss in einem Blechpaket stets parallel zur Oberfläche der einzelnen Lamellen geführt werden muss. Da die Spulen einer Wicklung in der Regel den Fluss auf dem kürzesten Wege umschließen müssen, liegen somit stets zwei Seiten einer Spule parallel zur Oberfläche des Blechpakets. Die Blechpakete sind aus Kostengründen aus Blechen geschichtet, die mit dem selben Stanzwerkzeug gefertigt wurden und somit identische Abmessungen aufweisen. Diese Randbedingungen führen zu einem rechteckigen Querschnitt einer Spule, was nicht dem Optimum entspricht. Der optimale Querschnitt einer Spule ist der Kreis, da dieser die maximale Fläche (hier der magnetische Fluss) mit dem kleinsten Umfang (hier Windungslänge) umschließt.

Die Kupfermenge einer elektrischen Maschine kann also durch einen kreisrunden Querschnitt der Spulen optimiert werden, der jedoch dazu führt, dass auch der Zahn, der die Spule trägt, einen entsprechenden Querschnitt aufweisen muss. Das Stanzen eines Blechpakets mit Zähnen, die einen runden Querschnitt aufweisen, ist jedoch nicht wirtschaftlich umsetzbar. (Skizze). Hier kommt nun der Vorteil der weitgehend freien Formbarkeit des Pulvereisen-Materials zum Tragen. Durch die Einsparung von Kupfer lassen sich so Kosten und Masse einer elektrischen Maschine reduzieren.

3 Elektrische Leiterwerkstoffe

Für die elektrischen Leiter wird in der Regel Kupfer verwendet. Seine Leitfähigkeit ist nur um rund 4% geringer als die von Silber, dem Metall mit der höchsten elektrischen Leitfähigkeit. Neben der sehr guten elektrischen Leitfähigkeit ist die hohe thermische Leitfähigkeit von Kupfer wichtig, da beispielsweise die Wickelköpfe einer elektrischen Maschine im Wesentlichen über die Wärmeleitung im Kupfer gekühlt werden.

Betrachtet man das Verhältnis von Dichte zu elektrischer Leitfähigkeit, schneidet Aluminium besser ab als Kupfer. Die Dichte von Aluminium liegt bei 30% der Dichte von Kupfer, die elektrische Leit-

fähigkeit beträgt jedoch 60% der Leitfähigkeit von Kupfer. Der wesentliche Nachteil von Aluminium ist dessen Korrosionsfreudigkeit. An Luft überzieht es sich nach kurzer Zeit mit einer vergleichsweise stabilen Oxidschicht, die im Gegensatz zu Kupferoxid elektrisch nicht leitfähig ist.

Für die Verwendung als elektrischer Leiter sind verkupferte Aluminiumdrähte unter der Bezeichnung ALKU erhältlich. Diese lassen sich durch Löten mit einer Anschlussleitung aus Kupfer verbinden. Besondere Sorgfalt erfordert die Verbindung von Aluminium mit anderen Metallen. So bilden insbesondere Verbindungen zwischen Kupfer und Aluminium aufgrund des großen Unterschieds in der chemischen Spannungsreihe Lokalelemente, die bei Anwesenheit von Feuchtigkeit zu massiver Korrosion führen.

Die geringe Festigkeit von Aluminium ist bei der Verwendung von Runddrähten problematisch. Die Drähte dürfen nicht zu häufig gebogen werden. Vorteilhaft ist bei großen Querschnitten die Verwendung von Aluminiumbändern. Diese sollten bei elektrischen Maschinen jedoch nicht senkrecht in der Nut stehen, da ansonsten bei höheren Frequenzen die einseitige Stromverdrängung in Richtung zum Luftspalt den wirksamen Leiterquerschnitt reduziert.

In der Vergangenheit wurden mehrfach elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium gebaut, insbesondere in Zeiten, in denen kein Zugang zum Weltmarkt bestand (Richter, 1916). Teilweise wurden Fahrmotoren und Transformatoren elektrischer Lokomotiven mit Aluminiumwicklungen versehen, beispielsweise bei den Baureihen E44 (Rampp, 2009) und E94 (Sölch, 2000). Heutzutage findet Aluminium in großem Maße Verwendung als elektrischer Leiter beim Bau von Freileitungen. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit der Aluminiumdrähte weisen die Leiterseile einen Kern aus Stahldrähten auf.

Neben dem Vorteil der Gewichtsreduzierung betragen die Kosten für Aluminium lediglich rund ein Drittel der Kosten für Kupfer.

3.1 Leichtbau durch Verwendung alternativer Leiterwerkstoffe

Auf den ersten Blick erscheint die Verwendung von Aluminium als Leiterwerkstoff für den Leichtbau elektrischer Maschinen vorteilhaft. Ein Aluminiumleiter, der den gleichen Widerstand wie ein Kupferleiter aufweist, besitzt lediglich die halbe Masse des Kupferleiters. Jedoch weist der Aluminiumleiter einen um 67% größeren Querschnitt auf. Bei den gebräuchlichen elektrischen Maschinen liegen große Teile der Wicklung im Blechpaket, im sogenannten Wickelfenster. Bei der Verwendung von Aluminium als Leiterwerkstoff muss somit der Querschnitt des Wickelfensters um 67% vergrößert werden. Da der Eisenquerschnitt in den flussführenden Teilen jedoch nicht reduziert werden darf, kann nur der Außendurchmesser des Blechpakets vergrößert werden, was zu einer Gewichtszunahme des Blechpakets führt und damit die Gewichtersparnis in der Wicklung teilweise kompensiert.

3.2 Leichtbau durch die konstruktive Maßnahmen

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, kann die Menge des erforderlichen Leitermaterials optimiert werden, indem der Querschnitt der Spulen kreisrund ausgeführt wird. Für die Energiewandlung in einer elektrischen Maschine ist lediglich der von einer Spule umschlossene magnetische Fluss relevant, nicht jedoch die Länge der einzelnen Leiterstäbe.

4 Gewichtsoptimierung der elektromagnetisch aktiven Teile

Soll das Gewicht einer elektrischen Maschine reduziert, bzw. deren Leistungsdichte erhöht werden, so ist der naheliegende Ansatz die Erhöhung der Nenndrehzahl der Maschine. Das Drehmoment einer elektrischen Maschine wird bestimmt durch das Vektorprodukt von magnetischem Erregerfluss und Ankerstrom. Die Flussdichte kann nicht beliebig gesteigert werden, da der magnetische Fluss im Trafoblech geführt werden muss und dieses aus wirtschaftlichen Gründen nicht zu weit in die Sättigung getrieben werden kann. Der Ankerstrom kann ebenfalls nicht beliebig gesteigert werden. Die thermisch zulässige Stromdichte in der Wicklung ist hier der begrenzende Faktor. Das Drehmoment

einer elektrischen Maschine hängt somit von Stromdichte und Flussdichte ab, ist also proportional zum Volumen der Maschine.

Im Gegensatz zum Drehmoment wird die Drehzahl einer elektrischen Maschine jedoch im Wesentlichen nur von den mechanischen Eigenschaften, wie der mechanischen Festigkeit des Rotors (Fliehkräfte) und der Lebensdauernforderung an die Lagerung bestimmt. Hochtourige Maschinen weisen somit prinzipiell eine höhere Leistungsdichte auf als niedertourige, die aber in der Regel mit höheren Eisenverlusten erkauft wird, da diese überproportional mit der Frequenz und damit mit der Drehzahl ansteigen.

Betrachtet man einen Antrieb bestehend aus elektrischer Maschine und Getriebe, so kann die Leistungsdichte des Antriebs durch eine Erhöhung der Drehzahl der elektrischen Maschine verbessert werden.

5 Mechanische Komponenten

Die mechanischen Komponenten einer elektrischen Maschine, also im Wesentlichen die Welle und das Gehäuse, müssen als wichtigste Eigenschaft den mechanischen Belastungen standhalten. Besondere elektrische oder mechanische Eigenschaften sind nicht erforderlich – ganz im Gegenteil: elektrische Nichtleiter und amagnetische Werkstoffe wären sogar von Vorteil, da keine Problem mit Lagerströmen oder magnetischen Axialflüssen zu befürchten sind, die die Lebensdauer der Wälzlager negativ beeinflussen können.

Bei der Verwendung von Kunststoffen ist jedoch deren geringe thermische Leitfähigkeit zu beachten. Die Entwärmung des Rotors erfolgt bei geschlossenen Maschinen zu einem erheblichen Teil mittels Wärmeleitung durch die Welle. Ebenso wird der größte Teil der Wärme, die im Stator entsteht, über das Gehäuse abgeleitet. Hier ist besonders zu beachten, dass das Blechpaket die Wärme nur in Längsrichtung der Bleche gut übertragen kann. In Querrichtung, also senkrecht zur Blechoberfläche, ist die Wärmeleitfähigkeit vergleichsweise gering.

Prinzipiell erscheint es machbar, Gehäuse und Wellen elektrischer Maschinen aus (faserverstärkten) Kunststoffen herzustellen. Für eine optimale elektrische Maschine sollte die Wärmeleitfähigkeit des Materials erhöht werden, beispielsweise durch den Einsatz von Fasern, die in Längsrichtung eine gute thermische Leitfähigkeit aufweisen oder durch die konstruktive Integration wärmeleitender Elemente wie Heatpipes, Metalldrähte oder Kühlwasserkanäle.

6 Literaturverzeichnis

Rampp, Brian. 2009. *Die Baureihe E44 -- Die richtungsweisenden Serienlokomotiven der Bauart SSW.* Freiburg: EK-Verlag, 2009.

Richter, Rudolf. 1916. *Elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium, Zink und Eisen.* Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1916.

Sölch, Hans (xyania internet verlag). 2000. elektrolok.de. *Alles über Elloks.* [Online] 2000. [Zitat vom: 12. September 2012.] <http://www.elektrolok.de/Kurzprofile/194.htm>.

Vac1. 2012. VACOFLEX -- Chemische Zusammensetzung. [Online] Vacuumschmelze, 02.. 07. 2012. [Zitat vom: 6. September 2012.] <http://www.vacuumschmelze.de/index.php?id=126>.

Vac2. 2012. VACOPERM -- Chemische Zusammensetzung. [Online] Vacuumschmelze, 02.. 07. 2012. [Zitat vom: 6. September 2012.] <http://www.vacuumschmelze.de/index.php?id=132>.