

Armierungshülsen aus Faserverbundwerkstoff erhöhen den Wirkungsgrad elektrischer Antriebe

Ralph Funck
CirComp GmbH
Marie-Curie-Str.11
67661 Kaiserslautern, Deutschland
www.circomp.de

Kurzfassung — Dieser Beitrag beschreibt das Potenzial von Faserverbundwerkstoffen für elektrische Maschinen. Armierungshülsen aus Faserverbundwerkstoffen werden zur Fixierung von Antriebsmagneten in elektrischen Hochleistungsmotoren und Generatoren eingesetzt, um die Magnete bei hohen Drehzahlen auf den Rotoren zu halten. Im Faserwickelverfahren hergestellt Armierungshülsen bieten aufgrund ihrer hohen Festigkeit bei geringem Gewicht in Kombination mit ihrer Magnetfeldtransparenz die perfekte technische Lösung für die Fixierung von Magneten auf Magnetrotoren. Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften können die Hülsen aus Faserverbundwerkstoff sehr dünn ausgeführt und somit der Spalt zwischen Außendurchmesser des Rotors und Innendurchmesser des Stators minimiert werden. Dieser Beitrag beschreibt Vorteile sowie Einsatzgebiete für Armierungshülsen aus Faserverbundwerkstoff.

Schlagworte — Faserverbundwerkstoff, Armierungshülse, Spaltrohr, Spalttopf, Faser-Wickel-Technologie

I. EINLEITUNG

Hülsen aus Faserverbundwerkstoff haben ein breites Anwendungsfeld für elektrische Antriebe. So werden beispielsweise Faserverbund - Bandagen und Hülsen eingesetzt, um Magnete bei hohen Drehzahlen auf Rotoren zu fixieren. Faserverbundwerkstoffe sind zudem in Spaltröhren und in Spalttöpfen für unterschiedlichste Pumpenanwendungen im Einsatz.

Heute werden noch vielfach metallische Bandagen und Hülsen zur Magnetfixierung sowie als Spaltrohr und Spalttopfmaterial eingesetzt. Allerdings erzeugen diese metallischen Bauteile zum Teil erhebliche Wirbelstromverluste und reduzieren somit den Wirkungsgrad der Antriebe beträchtlich.

Durch die Weiterentwicklung der Technologien kommen in jüngster Zeit immer häufiger Bandagen und Hülsen sowie Spaltröhre und Spalttöpfe aus Faserverbundwerkstoffen zum Einsatz. Faserverbundwerkstoff ist der ideale Werkstoff für derartige Anwendungen, da Effizienz und Wirkungsgrad eine Rolle spielen. Faserverbundwerkstoffe zeichnen sich in diesen Einsatzgebieten durch Ihre hohen Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitig geringem Gewicht, elektrisch

isolierender Eigenschaften, Magnetfeldtransparenz und guter mechanischen Bearbeitbarkeit aus.

II. TECHNOLOGIE

In zahlreichen Veröffentlichungen wird der Einfluss des Hülsenmaterials, der Hülsendicke, der Rotorgeschwindigkeit und der Antriebsfrequenz analysiert. Der Wirkungsgrad elektrischer Antriebe lässt sich dabei durch mathematische Modelle [1] und durch Finite-Elemente-Verfahren (FEM) [2] vorhersagen. Der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen lässt sich mit dem Einsatz von Faserverbundmaterialien, je nach elektrischer Maschinengestaltung und Drehzahl, um über 30% erhöhen [3].

Faserverbundwerkstoffe setzen sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen – verstärkenden Fasern und bettenden Matrix. Durch gegenseitige Wechselwirkungen der beiden Komponenten erhält dieser Werkstoff höherwertige Eigenschaften als jede der beiden einzeln beteiligten Komponenten. Geringes Gewicht bei hoher Festigkeit zeichnet moderne Faserverbundwerkstoffe aus. Durch die Wahl einer geeigneten Kombination von Matrix und Verstärkungsfaser kann ein Material hergestellt werden, das genau den Anforderungen einer bestimmten Anwendung entspricht. Die teilweise höheren Kosten von Verbundwerkstoffen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen werden durch die Steigerung des Wirkungsgrads in elektrischen Maschinen überkompensiert.

Als Fertigungstechnologie bietet sich für die beschriebenen Anwendungen das Faserwickelverfahren an (Abbildung 1).

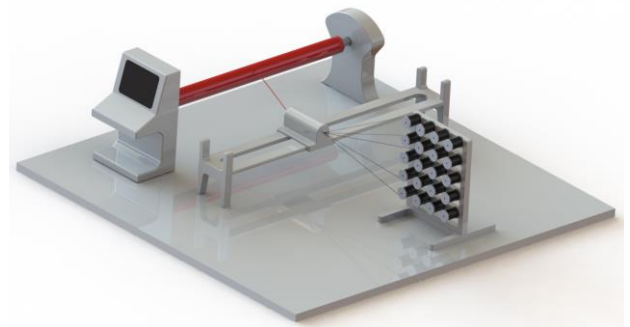


Abbildung 1: Faserwickeltechnologie

TABELLE 1: EIGENSCHAFTEN FASERVERBUNDMATERIALIEN

<i>Material</i>		<i>GFRP DW210</i>	<i>AFRP DW152</i>	<i>CFRP DW231</i>	<i>CFRP DW260</i>
Zugfestigkeit *	MPa	1,440	1,880	2,420	2,420
Dichte	g/cm ³	2.1	1.33	1.52	1.52
Wirbelstromverlust		low	low	low	low
Max. Einsatztemperatur	°C	<110°C	<140°C	<140°C	>300°C
Thermischer Ausd.koeffizient*		~ 7	< 0.2	< 0.2	< 0.2

* in Faserrichtung

Bei dem in Abbildung 1 dargestellten Faserwickelprozess handelt es sich um einen hoch wiederholgenauen, CNC gesteuerten Prozess, in dem mit Matrix imprägnierte Fasern kontinuierlich auf einen rotierenden Kern abgelegt werden. Typischerweise werden Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern als Verstärkungsfasern eingesetzt. Durch die Kombination von Verstärkungsfasern mit Matrixmaterial entsteht glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) und aramidfaserverstärkter Kunststoff (AFK). Eine breite Palette von zertifizierten duromeren und thermoplastischen Faserverbundwerkstoffsystemen, bis hin zu Einsatztemperaturen von über 300 ° C sind auf dem Markt erhältlich. Tabelle 1 zeigt signifikante Eigenschaften typischer Verbundwerkstoffe.

Der Faserwickelprozess hat gegenüber herkömmlichen Techniken erhebliche Vorteile:

- Hohe Festigkeit
- Präzise Faserausrichtung
- Hoher Faservolumengehalt
- Hohe Wiederholgenauigkeit
- Hohe Faserspannung

Die Faserwickeltechnik ist damit der ideale Prozess zur Herstellung von Rotorarmierungen, Rotorhülsen, Aufpresshülsen, Rotorgehäusen, Spaltrohren und Spalttöpfen.

Faserverbundhülsen werden dabei von CirComp sowohl als Aufpresshülsen als auch als Direktbewicklung für Rotoren ausgeführt. Die Aufpresshülsen lassen sich wahlweise bei CirComp oder beim Kunden montieren.

Der Faserspannung während des Wickelprozesses kommt dabei besondere Bedeutung zu. Durch hohes Vorspannen der Fasern während des Wickelprozesses lassen sich insbesondere bei der Direktbewicklung von Rotoren hohe Vorspannungen der Rotormagnete in radialer Richtung erzielen. Dies führt zu extrem dünnwandigen Armierungen. Der somit minimierte Abstand zwischen Rotor und Stator reduziert die Spaltverluste in elektrischen Maschinen erheblich.

Gerade bei großen Rotordurchmessern oder sehr langen Rotoren lassen sich radiale Vorspannung auf Rotormagnete mit bisher bekannten Technologien nur sehr aufwändig realisieren. Die Verwendung der Faserwicklungstechnologie eröffnet neue Möglichkeiten und führt zu einem sicheren, effizienten und wiederholgenauen Prozess, um radiale Vorspannung auf Magnete und Rotoren mit großem Rotordurchmesser oder auf langen Rotoren zu realisieren. Durch eine bei CirComp entwickelte Hochspannungsbremseinrichtung können Glas-, Carbon-, Aramid- und andere Fasern mit extrem hoher und konstanter Vorspannung verarbeitet werden, was zu einer hohen radialen Vorspannung an den Magneten führt.

Armierungshülsen aus Faserverbundwerkstoff, die durch direktes Fadenwickeln mit Faservorspannung auf Rotoren aufgebracht werden, können auf raue und unebene Magnetoberflächen aufgebracht werden, wodurch sich die Bauteilkosten erheblich reduzieren lassen, da komplexe Bearbeitungs- und Schleifprozesse von Magnetflächen eingespart werden. Neben den duroplastischen Verbundwerkstoffen können alle Arten von thermoplastischen Verbundbändern wie z. B. Kohlenstofffaser PEEK (CF / PEEK), Kohlenstofffaser PPS (CF / PPS) oder Aramidfaser PA12 (AF / PA12) Bänder mit der von CirComp entwickelten Prozessen und der Hochspannungsbremse verarbeitet werden.

Armierungen aus Faserverbundwerkstoff zeichnen sich u.a. durch hohe Festigkeit des Verbundwerkstoffs im Vergleich zu metallischen Werkstoffen aus. Die Hülsen können sehr dünn ausgeführt werden und der Abstand zwischen Außendurchmesser der Rotormagnete und Innendurchmesser des Stators kann minimiert werden. Zudem beeinflussen Faserverbundwerkstoffe das Magnetfeld nicht. Der Vergleich von metallischen Hülsen zeigt signifikante Unterschiede bei Magnetfeldverlusten. Der Unterschied von Wirbelstromverlusten durch Hastelloy C Armierungs - Hülsen im Vergleich Hastelloy 1.4571 Armierungs - Hülsen liegt etwa bei einem Faktor von 3 [4]. Die Eigenschaften der metallischen Hülsenmaterialien sind in Tabelle 2 dargestellt. Typische Größenordnung der Effizienzsteigerung durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoff als Rotorarmierung im Vergleich zu optimierten metallischen Werkstoffen liegt zwischen 2-5% an der Gesamtmaschine. Die Effizienzsteigerung kann bei extremen Hochgeschwindigkeitsanwendungen wesentlich höher ausfallen. Auch lassen sich durch die hohen Festigkeiten der Faserverbundwerkstoffe Anwendungen realisieren, die mit metallischen Werkstoffen nicht realisiert werden können.

TABELLE 2: EIGENSCHAFTEN METALLSICHER MATERIALIEN

<i>Material</i>		<i>C-Stahl</i>	<i>Hastelloy 1.4571</i>	<i>Hastelloy C4</i>
Zugfestigkeit	MPa	280 – 1,900	~ 600	~ 700
Dichte	g/cm ³	7.8	7.98	8.64
Wirbelstromverlust		very high	high	middle
Max. Einsatztemperatur	°C	>300°C	>300°C	>300°C
Thermischer Ausd.koeffizient		11 - 17	~ 16	~ 11

III. ANWENDUNG

A. Außenläufer

Bei Außenläufern handelt es sich um eine Bauform, bei der sich der ruhende Teil (Stator) der Maschine im Inneren befindet und dieser von dem rotierenden Teil (Rotor, „Läufer“) umschlossen ist [5]. Im Allgemeinen zeichnen sich Außenläuferantriebe durch hohe Drehmomente sowie ein hohes Leistungs-Gewichts-Verhältnisse aus. In Außenläuferantrieben oder Außenläufergeneratoren werden Faserverbundwerkstoffe insbesondere zur Herstellung von Rotorgehäusen eingesetzt, um die durch Magnetfelder der elektrischen Maschinen induzierte Erwärmung zu reduzieren und die beschleunigte Masse sowie das Gesamtgewicht der elektrischen Maschinen zu reduzieren.

B. Spaltröhre und Spalttöpfe für Pumpen

Die Megatrendthemen Energieeffizienz und Ressourcenminimierung stellen eine einzigartige Herausforderung für die Prozessindustrie dar: entwickeln und nutzen von Pumpen, die leakagefrei, zuverlässig und effizient arbeiten. Spaltröhrenpumpen und Spalttopfpumpen erfüllen diese Herausforderung in besonderem Maße. Spaltröhrenpumpen bieten viele bemerkenswerte Betriebs-, Wartungs- und Leistungsvorteile. Durch ein Minimum an Komponenten und die Einsparung dynamisch beanspruchter Dichtungen sind derartige Pumpen nahezu wartungsfrei.

Faserverbundspaltröhre in Spaltröhrantrieben bieten aufgrund ihrer Transparenz für das Magnetfeld in Kombination mit den hohen mechanischen Eigenschaften und der nicht korrosiven Eigenschaft die perfekte technische Lösung. Typische Losgrößen bei CirComp für Faserverbundspaltröhre liegen zwischen 10.000 und über 200.000 Jahreseinheiten.

Da der Hauptmagnetfluss in Spaltröhren- und in Spalttopfpumpen das jeweilige Spaltröhre in Rotationsbewegung durchdringt, sind die magnetischen Flussverluste höher als bei Magnetfeldern, die eine Hülse statisch durchdringen. Der Vorteil von Faserverbundwerkstoffen und das Potential der Effizienzsteigerung und damit verbunden der Energieeinsparung im Pumpenbetrieb ist für dies Art der Anwendung besonders signifikant.

C. Rotorarmierungen

Rotorarmierungen aus Faserverbundwerkstoff in Form von Hülsen (Bild 2) bieten aufgrund ihrer Durchlässigkeit für das Magnetfeld in Kombination mit den hohen mechanischen Eigenschaften und dem geringen Gewicht die perfekte technische Lösung zur Magnetbefestigung.



Abbildung 2: Faserverbundhülsen (CirComp)

Derartige Hülsen finden Ihr Anwendungsspektrum in einem breiten Feld, insbesondere dann, wenn Klebtechniken an Ihre Grenzen kommen. Das Abheben von rein adhäsiv mit dem Rotor verbundenen Magneten ist häufig auf unzureichende Aufbringung des Klebers, nichteinhalten der Klebespalte und Prozessparameter, Verunreinigungen, Alterung des Klebers oder Überlastung der Klebeverbindung zurück zu führen. Das Abheben von Magneten führt dann meist zu katastrophalen Schäden in den Maschinen.

Um diese Nachteile zu überwinden, werden die Magnete zusätzlich mit Hülsen auf den Rotor fixiert.

Motor- und Generatoreinheiten mit Faserverbundhülsen werden bereits in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt wobei Anwendungen mit hohen Rotordrehzahlen prädestiniert sind. Abb. 3 zeigt einen Hochgeschwindigkeitsrotor mit CFK-Armierung.

Faserverbundhülsen können als Presspassung ausgeführt auf den Rotoraußendurchmesser aufgepresst werden oder können durch direktes Aufwickeln unter Faservorspannung auf die Rotoren appliziert werden. Ein Hauptvorteil der direkten Fadenwicklung auf Rotormagnete liegt darin, dass die mechanische Bearbeitung der Magnete am Rotoraußendurchmesser entfallen kann. Oberflächenrauigkeiten der Magnete und geringfügige Fehlausrichtungen der Magnete lassen sich durch die direkte Fadenwicklung auf Rotormagneten kompensieren.



Abbildung 3: Hochgeschwindigkeitsrotor mit CFK-Rotorarmierung (CirComp).

Das Anwendungsspektrum für Faserverbundhülsen umfasst alle Arten von Hochgeschwindigkeitsmotoren und Generatoren sowie Kinetic Energy Recovery Systeme (KERS), Mikro-Gasturbinen-Motoren, turboelektrische Antriebe sowie elektrische Turbolader. Ein elektrischer Turbolader wird von einem Elektromotor angetrieben wobei Elektromotor und Turbine auf höchste Drehzahlen ausgelegt ist, wie dies auch bei einem herkömmlichen Turbolader der Fall ist. Die Elektromotoren arbeiten mit Drehzahlen von über 100.000 U / min. Der Elektromotor des Verdichters beschleunigt das Verdichterrad so in einer viertel Sekunde. Das passiert gerade im unteren Drehzahlbereich, wenn die Abgasenergie noch nicht reicht, um ein entsprechendes Beschleunigen zu ermöglichen. Diese Konstruktion führt zu einer höheren Effizienz von turboaufgeladenen Motoren. Mit den neuesten Prozesstechnologien stehen für derartige Anwendungen Faserverbundhülsen-Hülsen für Anwendungstemperaturen über 300 ° C zur Verfügung [6].

Alle in diesem Artikel beschriebenen Faserverbundkomponenten werden von CirComp gefertigt und geliefert. Typische Losgrößen für die Komponentenfertigung liegen zwischen 1 und über 200.000 Faserverbundhülsen mit Abmessungen zwischen 20mm und 1.000mm Durchmesser.

QUELLEN

- [1] H. Mosebach, "Einfache analytische Rechenmodelle für permanentmagneterregte Synchronmaschinen," *Electrical Engineering*, vol. 81, issue 3, 1998, pp. 171-176.
- [2] D. Saban, J.F. Gieras and T.A. Lipo, "Calculations of losses in retaining sleeves of high speed permanent magnet brushless machines: simple analytical approach versus finite element method," *ICEM'06 Chania, Greece*, 2006, abstract no. pma 5-9.
- [3] D. Uneyama, "The proposal for can loss estimation method of canned motor," *Proceeding of international conference on electrical machines and systems*, Seoul, Korea, Oct. 8-11 2007.
- [4] N.N., "Werkstoffe für Spaltpöfpe und Spaltröhre bei leakagefreien Pumpen," *KSB,Werkstofftechnik*, issue 3, December 2000.
- [5] O. Schwab, „Großserientaugliches Herstellverfahren für neuartige elektrische Axialflussmotoren“, *Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Portal produktionsforschung.de*, Sept. 2012.
- [6] B. Bittmann, "Manufacturing of high temperature composite parts for air cooling unit (e.g. cyanate ester / carbon fibres) by filament winding", *CORDIS Community Research and Development Information Service*, Oct. 2015.