

Keramikähnliche Kompositsysteme für die Wicklungsisolation elektrischer Maschinen

M.Sc. Sören MIERSCH¹; Dipl.-Chem. Ralph SCHUBERT²; Prof. Dr.-Ing. Thomas SCHUHMANN¹; Dipl.-Ing. Uwe SCHUFFENHAUER¹; Dipl.-Ing. (FH) Estelle GIEBMANN¹; Dr.-Ing. Mathias LINDNER³; Dipl.-Ing. Bernd CEBULSKI³ und Dipl.-Ing. Sylvia BLANKENHAGEN⁴ (¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden; ² Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS Hermsdorf; ³ IAV GmbH Chemnitz/Stollberg; ⁴ VEM motors GmbH Zwickau)

Kurzfassung

Die Steigerung der elektromagnetischen Ausnutzung elektrischer Maschinen ist im Wesentlichen durch eine Erhöhung des Strombelages möglich. Die Belastungsgrenze resultiert u. a. aus der maximal zulässigen Temperatur der Wicklungsisolation. Aus der geringen spezifischen thermischen Leitfähigkeit herkömmlicher Isolierwerkstoffe resultieren große Temperaturgradienten im Wicklungsquerschnitt und es kommt zur Bildung von Hotspots z. B. in den Wicklungsköpfen. Im Beitrag werden die Entwicklung und die Charakterisierung von Polysiloxan-Kompositen mit keramischen Füllstoffen vorgestellt. Im Vergleich zu herkömmlichen Isoliermaterialien kann die spezifische thermische Leitfähigkeit damit etwa um den Faktor fünf gesteigert werden. Die Materialien werden für die Herstellung der Hauptisolation des Elektroblechpaketes in einem Tauchprozess sowie die Vakuum-Imprägnierung der Wicklung eingesetzt. Für einen elektrischen Radnabenantrieb werden die erwartete Wicklungstemperaturreduzierung und die daraus resultierende mögliche Leistungsdichtesteigerung diskutiert.

Abstract

The increase of the electromagnetic utilisation of electrical machines is essentially achievable by increasing the electric load. The power limit results from the maximum permissible temperature of the winding insulation. The low specific thermal conductivity of conventional insulating materials results in large temperature gradients in the winding cross section and the appearance of hotspots in the end windings. The paper discusses the development and characterisation of polysiloxane composites with ceramic fillers. Compared to conventional insulating materials, therewith the specific thermal conductivity can be increased by a factor of five. The materials are used for the production of the main insulation of the laminated core in a dipping process and the vacuum impregnation of the winding. For an electric wheel hub motor, the expected winding temperature reduction and the possible power density increase are discussed.

1 Einführung – spezifische thermische Leitfähigkeit von Wicklungsisolierwerkstoffen

Die Wicklungsisolierung elektrischer Maschinen besteht aus der Haupt-, Phasen- und Leiterisolierung. Als Flächenisolierwerkstoffe werden vorrangig Polyesterfolien mit einer spezifischen Wärmeleitfähigkeit $< 0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eingesetzt. Die Lackisolierung der Kupferleiter besteht z. B. aus Polyurethan (PUR) und besitzt ebenfalls eine Wärmeleitfähigkeit von ca. $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Bei ungefüllten Imprägniermitteln auf Epoxid- oder Polyurethanbasis liegen Wärmeleitfähigkeiten bei ca. $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Gemäß [1] - [4] sind für gefüllte Vergussmassen spezifische Wärmeleitfähigkeiten im Bereich $(1\dots3) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ erreichbar, wobei sich die Verarbeitungseigenschaften mit steigendem Füllgrad verschlechtern. In [5] wird gezeigt, dass sich durch die Beschichtung von Kupferdrähten mit keramischen Werkstoffen wie z. B. Aluminiumoxid Al_2O_3 die Wärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes auf ca. den 2,5-fachen Wert steigern lässt. Für Hochspannungsmaschinen wird in [6] und [7] der Einsatz keramischer Füllstoffe bis zu einer Füllung von 25 Vol.% untersucht, wobei sich die thermische Leitfähigkeit des Tränkmittels verdoppelt und die Übertemperatur der Wicklung um ca. 10 K sinkt. Im folgenden Beitrag werden die Entwicklung und die Charakterisierung keramikähnlicher Kompositsysteme auf Basis gefüllter Polysiloxane für die Isolation der Wicklung elektrischer Maschinen erläutert.

2 Keramikähnliche Komposit-Werkstoffe für die Isolation elektrischer Wicklungen

2.1 Werkstoffentwicklung und Charakterisierung

Die für die Wicklungs Imprägnierung und die Hauptisolierung des Elektrolechpaketes verwendeten polymerkeramischen Kompositwerkstoffe setzen sich aus einer Polymermatrix und keramischen Füllstoffen zusammen. Die Polymermatrix besteht aus flüssigen Methyl-Phenyl-Polysiloxanen. Die Kompositmatrix bildet sich durch die thermische Vernetzung der Polymere über einen Polyadditionsmechanismus ohne Nebenprodukte aus, was die Bildung dichter und porenfreier Gefüge ermöglicht. Die keramischen Füllstoffe führen zu einer Steigerung der thermomechanischen Stabilität und der spezifischen thermischen Leitfähigkeit des Komposites. Als Füllstoffe kommen Aluminiumoxid ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), Aluminiumnitrid (AlN) und hexagonales Bornitrid ($\alpha\text{-BN}$) zum Einsatz. Bei dem Pulver der aluminiumhaltigen Füllstoffe liegt die mittlere Korngröße im Bereich von $(2\dots6) \mu\text{m}$, wogegen der Bornitrid-Füllstoff als vorgranuliertes Pulver mit einer mittleren Korngröße von $30 \mu\text{m}$ verwendet wurde. Die Kornoberflächen der Füllstoffe wurden mit einem in [8] beschriebenen Siloxan-Beschichtungsverfahren vorbehandelt, um hohe Füllgrade ohne Beeinträchtigung der Fließfähigkeit und eine vollständige Durchtränkung auch dicht gepackter Wicklungen zu erreichen.

Tab. 1: Eigenschaften polymerkeramischer Kompositmaterialien zur Wicklungsisololation

Eigenschaft	Methode	Imprägnier- / Beschichtungssystem		
Füllstoff		Al ₂ O ₃	AlN	BN
Füllgrad in Vol.-%		40	40	30
Viskosität in Pa·s	DIN 53019-1:2008-09	1,7	1,7	NaN (komplexes Fließverhalten)
Biegebruchfestigkeit in MPa	ISO 178[1-3]	35,6	19,2	31,8
Wärmeausdehnungskoeffizient in ppm/K	ISO 11359-2	127	100	131
spez. therm. Leitfähigkeit in W/(m·K)	ISO 2007-2	0,83	1,16	2,76
spez. elekt. Widerstand in Ω·cm	DIN EN 62631-3/1-2	4,23·10 ¹⁵	6,64·10 ¹⁵	2,83·10 ¹⁴
elekt. Durchschlagfestigkeit in kV/mm	DIN EN 60243-1	25,1	23,1	20,2

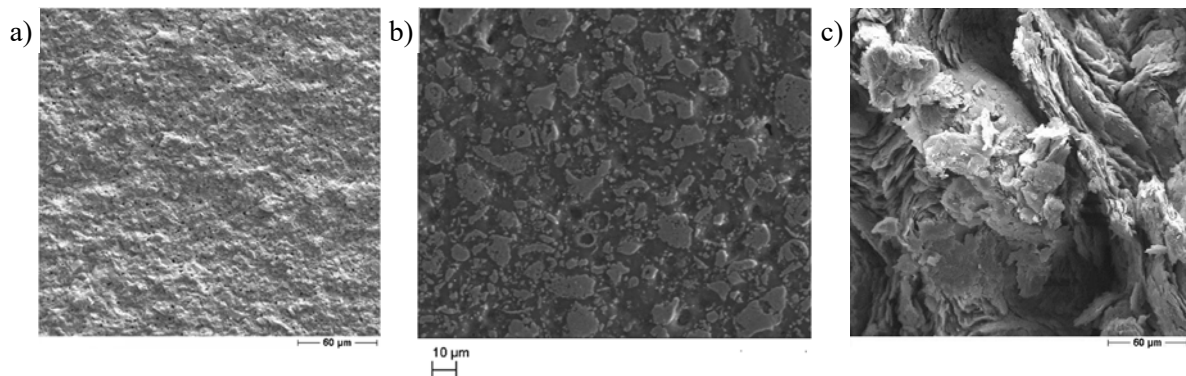


Abb. 1: Mikrostruktur der Kompositsysteme mit den Füllstoffen a) Al₂O₃, b) AlN und c) BN

Die Herstellung der Kompositsysteme erfolgte durch einfaches Verrühren der Komponenten bei 80 °C. Die flüssigen Mischungen zeigten auch über mehrere Tage keine Tendenz zur Separation. Muster zur Charakterisierung der Anwendungseigenschaften wurden durch mehrminütiges Entgasen der flüssigen Materialien bei 120 °C im Vakuum (100 mbar) und anschließendes Vernetzen bei 180 °C / 8 h hergestellt. Wesentliche technologische Kenndaten und mechanische, thermische und elektrische Eigenschaften der entwickelten Werkstoffe sind in **Tab. 1** zusammengefasst. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, die mit Hilfe der „Transient plane source technique“ (Hot Disk TPS 2500S der C3 Prozess- und Analysetechnik GmbH [9])

durchgeführt wurde, zeigt gegenüber herkömmlichen Imprägniermaterialien mit Wärmeleitfähigkeiten im Bereich von ca. $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (z. B. Dobeckan FT 2004/30 EK-SV der Elantas GmbH) wesentlich gesteigerte Kennwerte.

Untersuchungen der Mikrostruktur der Komposite mit dem Feldemissionsrasterelektronenmikroskop Ultra 55 plus (Zeiss) zeigen, dass die Partikel der Füllstoffe Al_2O_3 und AlN fest in der Polymermatrix eingebunden sind, wogegen die plättchenförmigen Primärkörner des Füllstoffes BN ein geschichtetes Haufwerk bilden und augenscheinlich so gut wie keine Matrixeinbindung aufweisen (vgl. **Abb. 1**).

2.2 Experimentelle Untersuchung von Werkstoff-Verbundproben

Das Ziel der Herstellung von Werkstoff-Verbundproben in Form von vergossenen Kupferdrahtstapeln und beschichteten Einzelblechen bestand in der Überprüfung der Realisierbarkeit hoher Kupferfüllgrade bei vollständiger Durchtränkung, der Untersuchungen des Isolationsvermögens, der experimentellen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes sowie der thermomechanischen Stabilität der neu entwickelten Imprägnier- und Beschichtungswerkstoffe. Im Rahmen der Musterfertigung wurden die Imprägnier- und Beschichtungstechnologie analysiert und optimiert.

Bei der Herstellung der Vergussproben kam Kupferlackdraht (Grad 2, $d_{\text{Cu}} = 0,85 \text{ mm}$ und Polyurethan-Isolation $d_{\text{iso}} = (28\dots44) \mu\text{m}$) zum Einsatz (vgl. **Abb. 2**). Der Verguss erfolgte im Vakuum bei $140 \text{ }^\circ\text{C} / 1 \text{ h}$ und anschließender Vernetzung bei $180 \text{ }^\circ\text{C} / 8 \text{ h}$ unter Normaldruck. Die Proben wiesen einen Kupferfüllgrad von ca. 57 % auf. Mit den Al_2O_3 - und AlN -gefüllten Imprägniersystemen gelang eine vollständige Infiltration der Drahtstapel, wogegen das BN-gefüllte System nur unzureichende Infiltrationseigenschaften aufweist (vgl. **Abb. 2**), was zum Ausschluss dieses Systems hinsichtlich weiterer Untersuchungen führte.

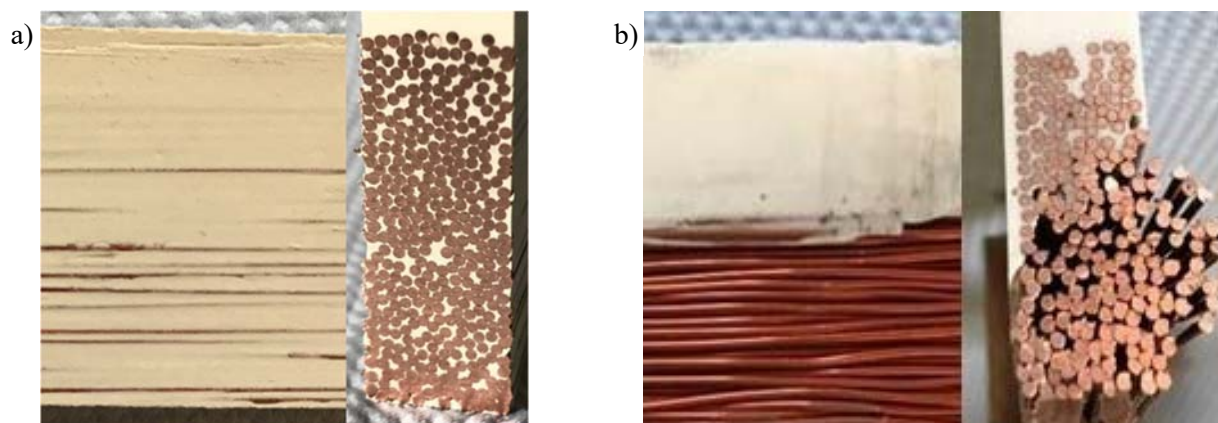


Abb. 2: Wicklungsverbundproben mit a) AlN - und b) BN -basiertem Kompositsystem

Bei den Drahtverbundproben ist zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit quer zur Drahtausrichtung das Hot-Disk-Verfahren nicht anwendbar, da dieses eine sphärische Wärmeausbreitung in isotropen Medien voraussetzt. Daher kam das besser geeignete Plattenverfahren, das einen quer zur Drahtanordnung orientierten Wärmestrom vorgibt, zum Einsatz (vgl. [10]). Für die Wicklungsverbundprobe wurden spezifische Wärmeleitfähigkeiten mit AlN-gefülltem Imprägniermittel von $1,57 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und mit Al_2O_3 -gefülltem Imprägniermittel von $1,38 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ermittelt. Vergleichsmessungen mit dem Plattenverfahren an homogenen Proben des reinen Imprägniermittels zeigen jedoch zu dem mit dem Hot-Disk-Verfahren ermittelten Werten aus **Tab. 1** relative Abweichungen von bis zu -30% (weiterführende Beurteilung der experimentell bestimmten Wärmeleitfähigkeiten des Wicklungsverbundes vgl. **Abschnitt 2.4**). Mikroskopische Untersuchungen des Interfaces zwischen Kupferlackdraht und Imprägniersystem zeigen eine komplette Füllung der Drahtzwischenräume, eine vollständige Benetzung der Drahtoberfläche mit dem Imprägniermittel und eine gleichmäßige Verteilung der Füllstoffkörner sogar in den kleinsten Drahtzwischenräumen (vgl. **Abb. 3**).

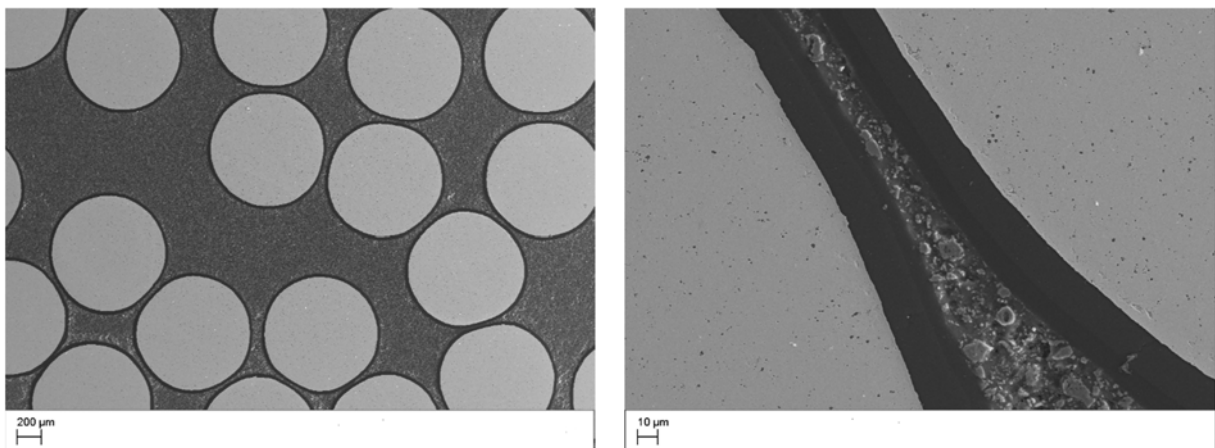


Abb. 3: Mikrostruktur des Interfaces zwischen dem Kupferlackdraht und dem AlN-gefüllten Komposit in einem Ausschnitt der Wicklungsverbundprobe

Zur Untersuchung der Durchschlagfestigkeit und thermischen Wechselbelastbarkeit wurden Proben beschichteter Einzelbleche der Sorte M400-50A und beschichtete Blechstapel angefertigt (vgl. **Abb. 4 a**). Die Beschichtung wurde bei den Einzelblechen durch Tauchen und bei den Blechstapeln durch Bestreichen des auf $120 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmten Körpers aufgebracht. Zusätze von Thixotropiermitteln, wie z. B. Ultrasil VN3, im Bereich von $(0,5 \dots 2) \text{ Ma.}\%$ eröffneten die Möglichkeit, die Schichtdicke bei einer Einmaltauchung in einem Bereich von $(0,05 \dots 0,5) \text{ mm}$ einzustellen. Aus der Untersuchung der Durchschlagfestigkeit im HS-Labor bei Verwendung einer Zylinderelektrode in Öl resultierte ein Wert von ca. $30 \text{ kV}/\text{mm}$. Aus der thermischen

Wechselbelastungsuntersuchung ergaben sich für die Beschichtung mit dem AlN-gefüllten System im Vergleich zum Al₂O₃-gefüllten System ein stabileres Verhalten, wobei der elektrische Widerstand der AlN-Beschichtung zum Ende des Tests größer 50 MΩ betragen hat (**Abb. 4 b**).

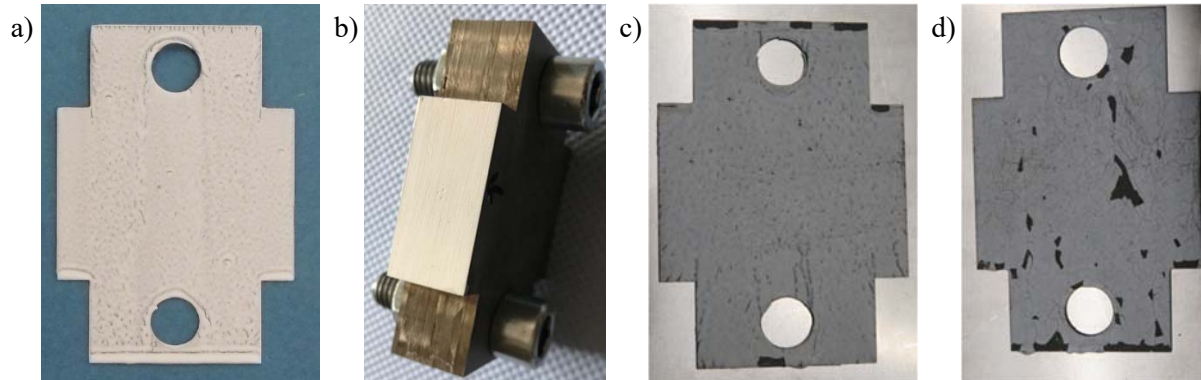


Abb. 4: Elektroblechverbundproben und Untersuchung der thermischen Wechselbelastbarkeit (a) Einzelblech mit AlN-Tauchbeschichtung - Schichtdicke 0,05 mm; b) Blechstapel mit AlN-Streichbeschichtung - Schichtdicke 0,16 mm; thermische Wechselbelastbarkeit nach 1735 Zyklen im Bereich (-40...170)°C / 15 min Halten: c) Beschichtung AlN-gefüllt, d) Beschichtung Al₂O₃-gefüllt)

Parallel dazu wurden die Wicklungsverbundproben den gleichen thermischen Wechselbelastungsuntersuchungen unterzogen, wobei sich ebenfalls die besten thermomechanischen Eigenschaften bei der mit AlN-gefüllten Imprägnierung ergaben.

2.3 Experimentelle Untersuchung von Versuchsmustern

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen obiger Werkstoffproben wurden die in **Abb. 5** dargestellten Versuchsmuster keramikähnlich isolierter Blechpakete und imprägnierter Wicklungen mit Statoren einer Asynchronmaschine der Baugröße 63 realisiert.

Die Aufbringung der Hauptisolation erfolgte durch Tauchbeschichtung mit thixotropierten AlN- und Al₂O₃-gefüllten Kompositssystemen bei 120 °C und einer anschließenden Vernetzung der Beschichtung bei 180 °C / 8 h (**Abb. 5 a**). Im Ergebnis fiel eine ungleichmäßige Schichtausbildung auf der Blechpaketoberfläche auf, die auch durch vorausgehende Reinigung der Oberfläche bisher nicht verbessert werden konnte. Außerdem wurden Schichtunterbrechungen an den Kanten festgestellt (**Abb. 5 b**). Aktuelle Untersuchungen für größere Nutabmessungen der in **Abschnitt 3** vorgestellten Demonstratormaschine zeigen bessere Isoliererergebnisse, wobei die finale Erprobung der Bewickelbarkeit und der Durchschlagfestigkeit noch aussteht.

Die Imprägnierung der bewickelten Statoren bei vollständiger Füllung des Nutquerschnittes (**Abb. 5 d**) konnte sowohl mit AlN-gefüllten als auch mit Al₂O₃-gefüllten Kompositssystemen

durch langsames Eintauchen der vorgewärmten Statoren in ein auf 120 °C aufgeheiztes Tauchbad, anschließender Entlüftung bei 100 mbar / 120 °C / 2 h, Entnahme aus dem Tauchbad und abschließender Vernetzung bei 180 °C / 8 h realisiert werden. Dabei besitzen die Statoren eine Hauptisolation des Blechpaketes aus herkömmlichen Flächenisolerwerkstoff. Eine Verbesserung des Tränkergebnisses konnte durch den Zusatz von bis zu 2 % Aceton als hochwirksamen Verdüner der Imprägniermasse dahingehend erzielt werden, dass sich die Imprägnier- und Entlüftungszeit auf die Hälfte reduzieren und Überschüsse des Imprägniermaterials vor allem in den Wicklungsköpfen vermeiden lassen (**Abb. 5 c**).

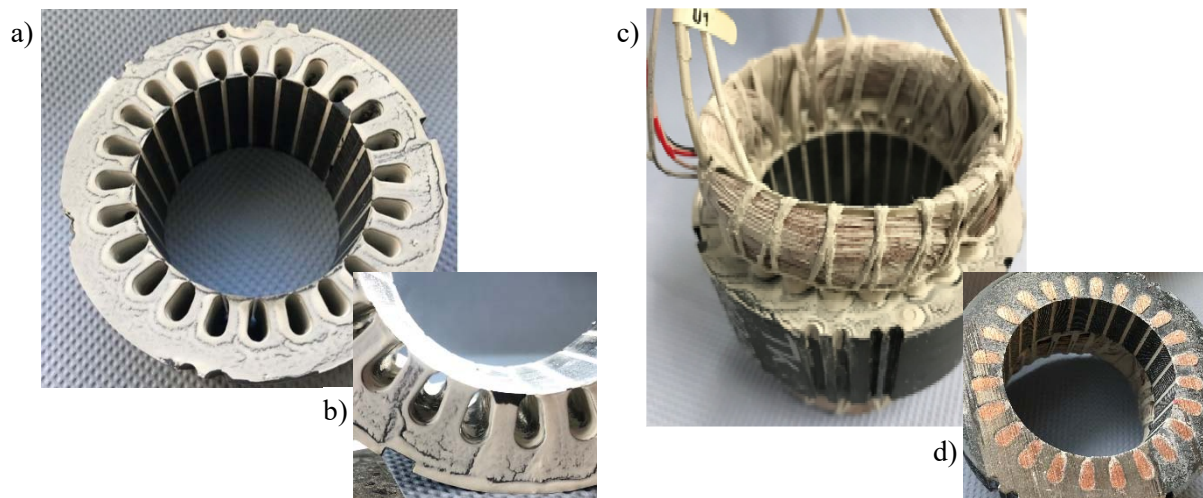


Abb. 5: Versuchsmuster keramikähnlich isolierter Statoren einer DASM der BG 63

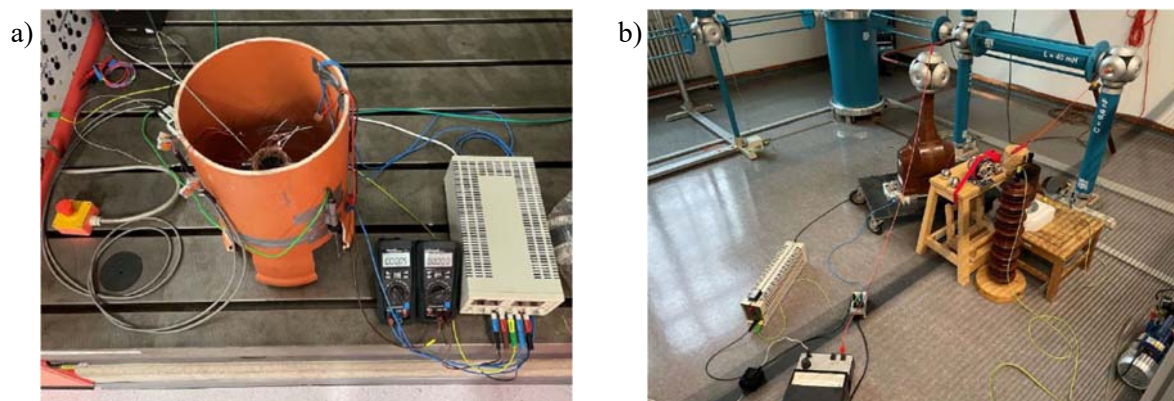


Abb. 6: Versuchsmusteruntersuchungen a) Erwärmungsmessungen und b) TE-Prüfungen

An den Musterstatoren erfolgten Erwärmungsprüfungen bei freier Konvektion (vgl. **Abb. 6 a**), wobei als Referenz ein Stator mit Standardisolierung diente, der bis zu einer mittleren Wicklungsübertemperatur von 105 K belastet wurde. Durch die Imprägnierung mit AlN-gefülltem Kompositsystem kann die mittlere Wicklungstemperatur bei freier Konvektion um ca. 5 K reduziert werden und bei Al₂O₃-Füllung ergeben sich ca. 3,5 K. Im Hinblick auf den Einbau des keramikähnlich isolierten Stators in eine Demonstratormaschine wird auf Basis der Ergebnisse

von Erwärmungsberechnungen eine Reduzierung der mittleren Wicklungsübertemperatur im Bereich (15...20) K erwartet. Ebenfalls erfolgte zur Beurteilung der Imprägnierung der Wicklung die Untersuchung der Musterstatoren mit TE-Messungen (vgl. **Abb. 6 b**), wobei im Vergleich zur Standardisolierung keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

2.4 Numerische Berechnung der thermischen Ersatzwärmeleitfähigkeit der Wicklung

In Analogie zur experimentellen Untersuchung der Wicklungsverbundproben erfolgt die numerische Berechnung der äquivalenten Ersatzwärmeleitfähigkeit in ANSYS® CFX, wobei ein symmetrischer Ausschnitt einer orthozyklischen Anordnung angenommen wird (vgl. **Abb. 7 a**). Die Variation des Kupferfüllfaktors erfolgt über die Modellabmessungen bei konstanten Parametern des Kupferlackdrahtes; die Wärmeleitfähigkeit des Imprägniermittels wird variiert. An den Seitenflächen des Modells wird eine konstante Temperaturdifferenz $\Delta\theta = 80$ K vorgegeben und der Wärmestrom \dot{Q} wird durch die Integration der Wärmestromdichte an der Modellseitenfläche A bestimmt. Die äquivalente Ersatzwärmeleitfähigkeit $\lambda_{w.ers}$ wird aus dem thermischen Widerstand der Anordnung berechnet.

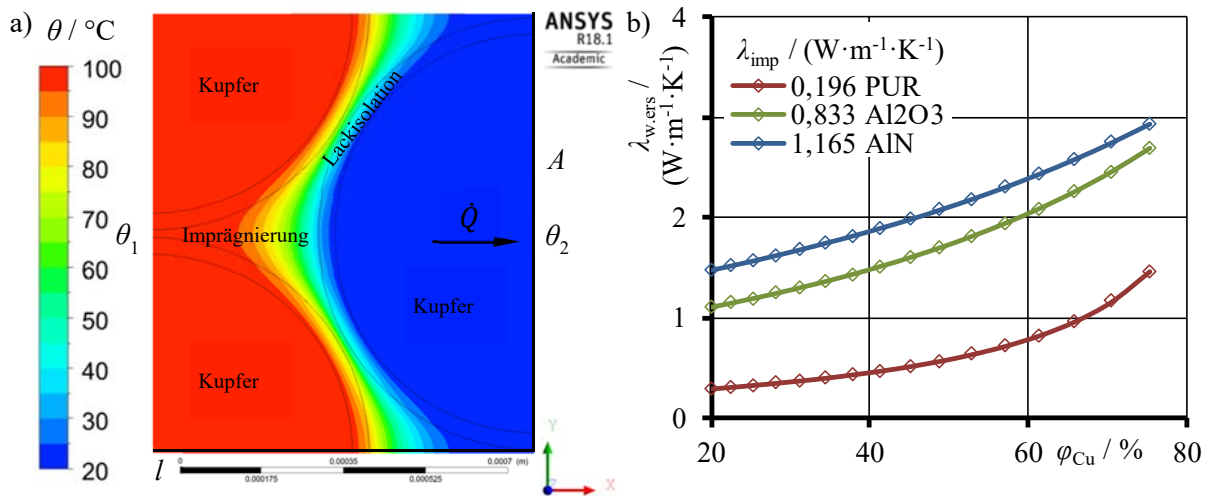


Abb. 7: Numerische Berechnung der äquivalenten Ersatzwärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes (Abmessungen ausgehend von den Untersuchungen in **Abb. 3**: $d_{Cu} = 0,884$ mm, $b_{iso} = 24,6$ μ m, $\lambda_{Cu} = 385$ W/(m·K), $\lambda_{iso} = 0,2$ W/(m·K) und Imprägnierung: $\lambda_{imp.PUR} = 0,196$ W/(m·K), $\lambda_{imp.Al_2O_3} = 0,833$ W/(m·K) und $\lambda_{imp.AlN} = 1,165$ W/(m·K))

Durch die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Imprägniermittels kann die äquivalente Ersatzwärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes deutlich gesteigert werden (vgl. **Abb. 7 b**: $\phi_{Cu} = 57$ % und $\lambda_{imp} = 0,196$ W/(m·K) \rightarrow $1,165$ W/(m·K) \rightarrow $\lambda_{ers.w.AlN} = 3,24 \cdot \lambda_{ers.w.PUR}$). Aus der Simulation ergibt sich für die mit AlN-gefüllte Wicklungsverbundprobe eine Ersatzleitfä-

higkeit von $\lambda_{\text{ers.w.AIN}} = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Für den mit dem Plattenverfahren experimentell bestimmten Wert von $1,57 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ergibt sich eine relative Abweichung von ca. -31 %. Bereits bei dem Vergleich der Messergebnisse an homogenen Materialproben wurde für das Plattenverfahren eine negative Abweichung im Vergleich zu dem Hot-Disk-Verfahren festgestellt. Weiterführend ist der Versuchsaufbau des Plattenverfahrens in Bezug auf einen systematischen Fehler zu analysieren. Die Berechnungsergebnisse des numerischen Modells in **Abb. 7** werden zur Beschreibung der orthotropen Wärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes angenommen.

3 Entwurf einer Demonstratormaschine in Außenläuferbauweise

3.1 Maschinenkonzept für Prüfstanduntersuchung

Das Ziel ist es, die mögliche Steigerung der Leistungsdichte an einer Demonstratormaschine aufzuzeigen. Diesbezüglich wurde die Konzeptstudie eines Radnaben-Antriebes für eine Prüffelduntersuchung modifiziert. Aktuell wird die in **Abb. 8** dargestellte Außenläufermaschine mit herkömmlicher sowie mit keramikähnlicher Wicklungsisolierung ausgeführt. Dabei gestaltet sich die Herstellung einer prozesssicher bewickelbaren, keramikähnlichen Hauptisolierung gegenwärtig noch schwierig. Weiterführend soll ein zweistufiges Beschichtungsverfahren analysiert werden, wobei in der ersten Stufe auf die Nutoberfläche eine sehr dünne, flexible und fest haftende Schicht durch ein besonders niedrigviskoses Kompositsystem aufgebracht werden soll und in der zweiten Stufe mit einem stärker thixotropierten Beschichtungsmaterial der mechanische Kantenschutz realisiert wird.

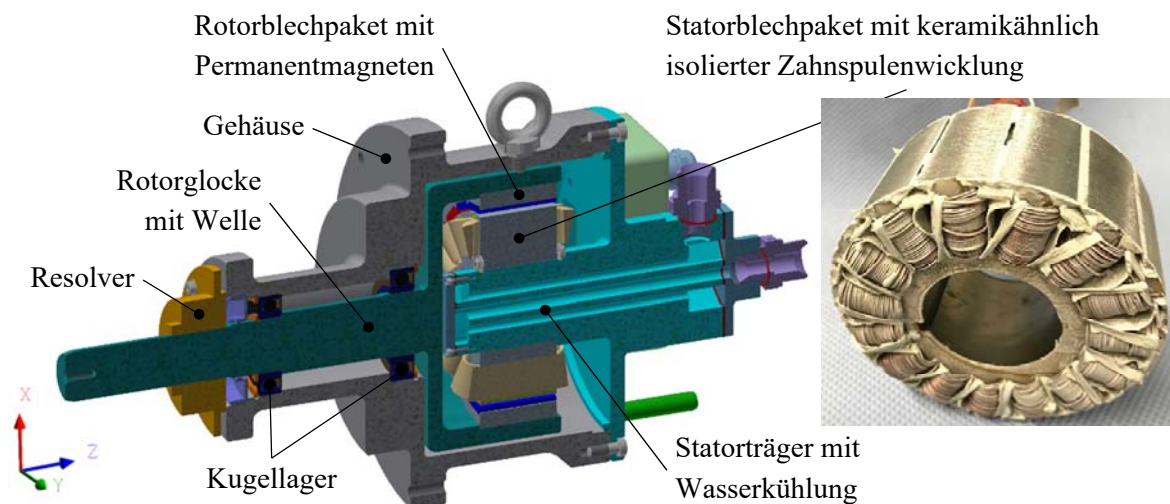


Abb. 8: Permanentmagneterregte Außenläufermaschine mit keramikähnlicher Wicklungsisolierung (Kenngrößen: $P_{\text{mech.S1}} = 9,47 \text{ kW}$, $P_{\text{max}} = 28,4 \text{ kW}$, $n_{\text{eck.S1}} = 7244 \text{ min}^{-1}$ und $n_{\text{max}} = 12000 \text{ min}^{-1}$ sowie Hauptabmessungen: $d_{\text{si}} = 45,0 \text{ mm}$, $d_{\text{sa}} = 104,4 \text{ mm}$, $l_{\text{Fe}} = 43 \text{ mm}$, $N_s = 15$ und $2p = 10$)

3.2 Elektromagnetische Auslegung und Verlustmodell

Der Demonstrator ist eine zehnpolige permanenterregete Synchronmaschine in Außenläuferbauweise mit eingelassenen Oberflächenmagneten. Der Stator verfügt über 15 Nuten mit einer konzentrierten Zahnspulenwicklung (Abb. 9 a). Dazu wurden die inneren geometrischen Verhältnisse in Kombination mit der Wicklungsauslegung einer Optimierung unterzogen. Unter dem Einfluss der Sättigung und der Berücksichtigung technologischer Grenzen ergibt sich jeweils ein Optimum, wie für den Statorrücken mit einer gewählten Rückenlänge $h_r = 7,75$ mm in Abb. 9 b beispielhaft dargestellt ist. Ebenso wurden die Zahnbreiten, das Keilgebiet und die Rotorform für die eingelassenen Magnete sowie die Breite des Luftspalts optimiert.

Mittels transientser elektromagnetischer 2D-FEA-Simulation in ANSYS® Maxwell werden die Ummagnetisierungsverluste im geblechten Stator und in den Permanentmagneten berechnet. Abb. 9 c zeigt für einen Zeitpunkt die ermittelte Ummagnetisierungsverlustdichte im stationären Endwert als primäre Ursache und Beitrag zu den Gesamtverlusten.

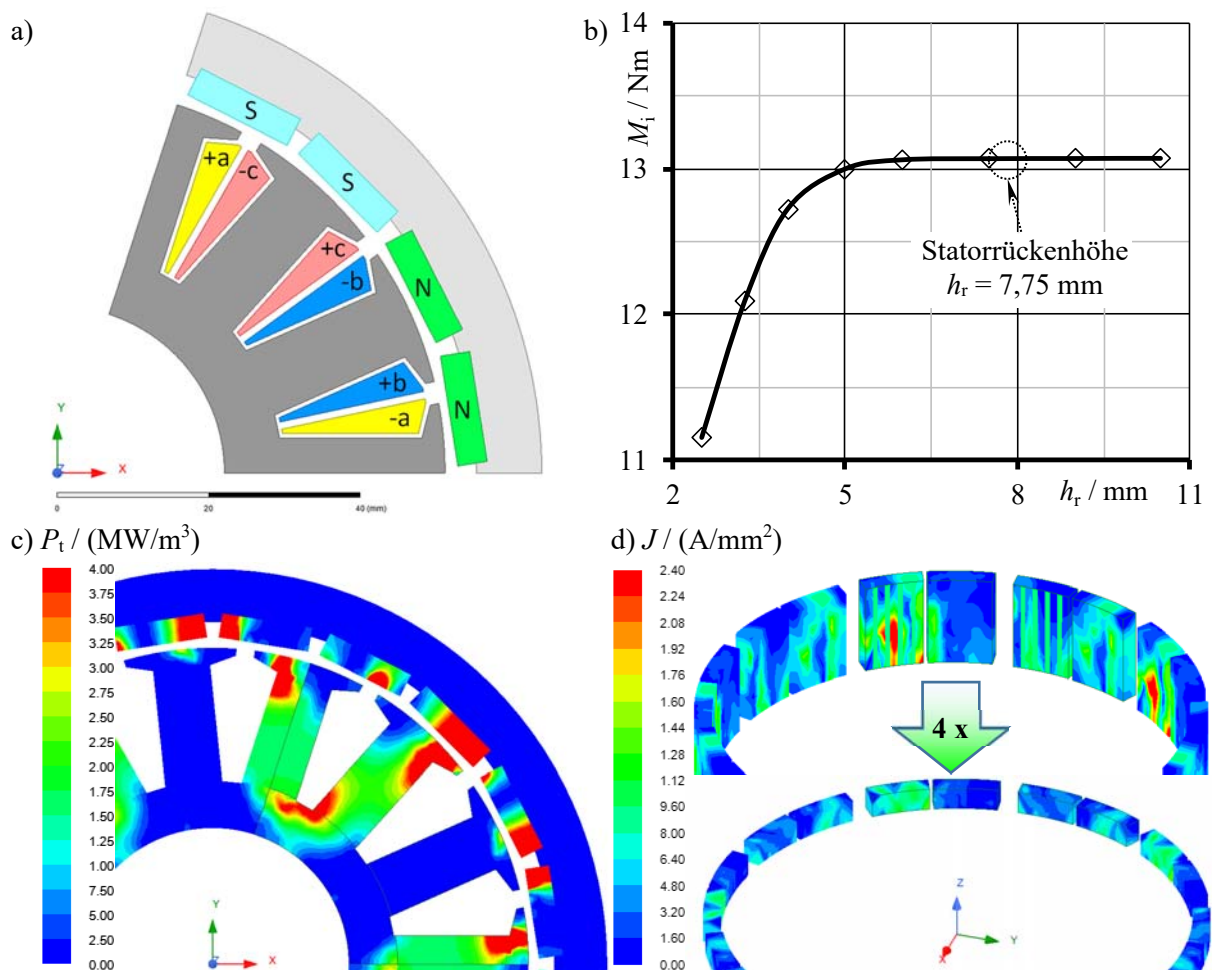


Abb. 9: Modellquerschnitt, Optimierung der Magnetkreisgeometrie, numerische Berechnung der Verlustanteile und Optimierung der Magnetsegmentierung

Der hohe Oberwellenanteil der Feldkurve der Zahnspulenwicklung führt besonders bei Belastung zu einem starken Anstieg der Wirbelstromverluste in den Magneten. Deshalb wurde mittels 3D-FEA eine Analyse der Wirksamkeit einer axialen Segmentierung der Magnete durchgeführt. Numerisch wurde bei vierfacher Segmentierung ein Rückgang der Magnetverluste auf 40 % ermittelt, visualisiert in **Abb. 9 d** anhand der Wirbelstromdichte für einen Zeitpunkt.

Die ohmschen Verluste in der Statorwicklung, getrennt für den Nut- und Wicklungskopfbereich bei Verwendung der mittleren Wickeltemperatur aus der thermischen Simulation, sowie die Reibungsverluste werden analytisch berechnet. In **Tab. 2** sind Leistungsdaten sowie die berechneten Verluste für den Bemessungspunkt und die maximale Leistung zusammengefasst.

Tab. 2: Leistungsdaten und Trennung der Komponenten des Verlustmodells in den Arbeitspunkten

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Bemessung	max. Leistung
Betriebsart	-	-	S1	S2-20s
Mechanische Leistung	P_{mech}	kW	9,47	23,06
Drehmoment	M	Nm	12,5	30,4
Drehzahl	n	min ⁻¹	7244	7244
Eisenverluste Statorzähne	$P_{\text{Fe1.z}}$	W	397,4	513,1
Eisenverluste Statorrücken	$P_{\text{Fe1.r}}$	W	63,7	82,6
Eisenverluste Rotorrücken	$P_{\text{Fe2.r}}$	W	0,5	0,5
Magnetverluste	$P_{\text{wb2.m}}$	W	87,6	353,4
Stromwärme Nutbereich	$P_{\text{Cu1.n}}$	W	133,6	950,0
Stromwärme Wicklungsköpfe	$P_{\text{Cu1.wk}}$	W	64,4	457,5
Reibungsverluste	$P_{\text{V.fv}}$	W	150,6	150,6
Gesamtverluste	$P_{\text{V}\Sigma}$	kW	0,90	2,51
Wirkungsgrad	η	%	91,3	90,2
Ausnutzung	C	kVA min/m ³	3,16	8,0
Charakteristisches Produkt	$A \cdot J$	kA/m A/mm ²	374	2661

3.3 Kühlsystemauslegung und thermisches Modell

Im Vergleich zu einer Innenläufermaschine, deren Kühlung effektiv über einen Wassermantel realisiert werden kann, ist die Kühlung des Stators einer Außenläufermaschine aufgrund schlechter Wärmeübergangsbedingungen im Luftspalt und an den Wicklungsköpfen kritisch zu beurteilen. Für die Demonstratormaschine wurde eine Wasserkühlung im Statorträger konzipiert, wobei ausgehend von der Verlustverteilung in **Tab. 2** mit der Wärmequellennetzmethode die in das Kühlsystem eingprägten Verluste berechnet wurden und die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten mittels einer strömungsmechanisch-thermisch

gekoppelten CFD-Simulation in ANSYS® CFX erfolgte. Der auf die innere Mantelfläche des Statorblechpaketes bezogene Wärmeübergangskoeffizient beträgt $\alpha_{\text{ers,k}} = 16 \cdot 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

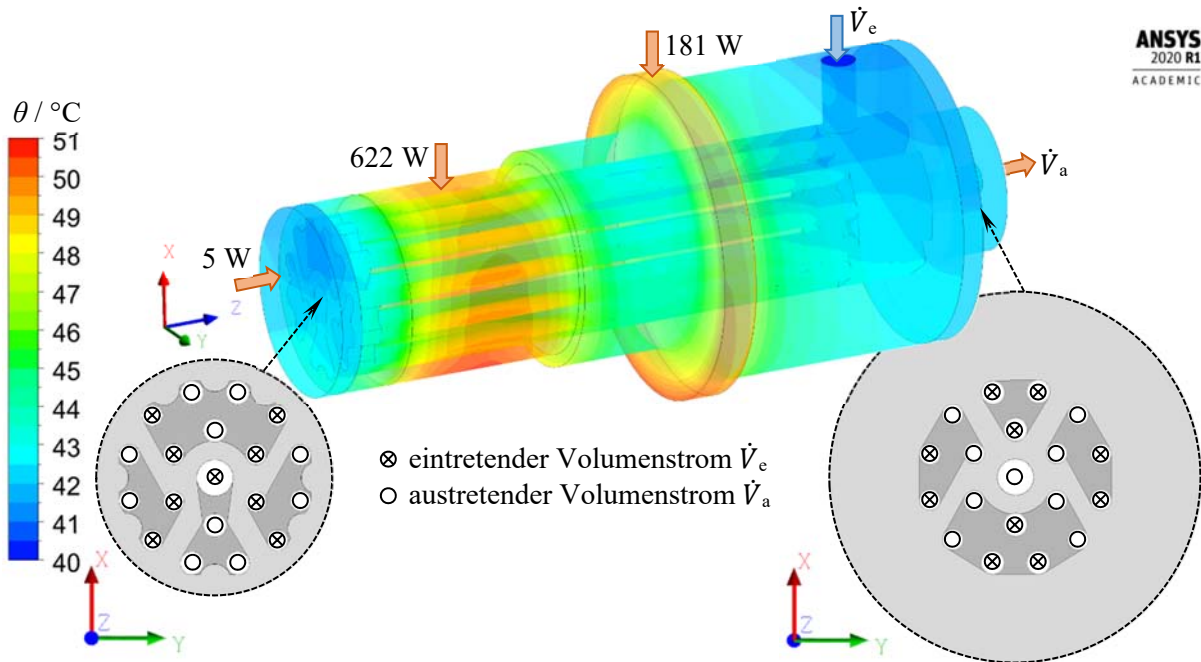


Abb. 10: Auslegung der Statorrohrinnenkühlung der Außenläufermaschine

(Kenngrößen: $\dot{V}_e = 4 \text{ l}/\text{min}$, $\theta_e = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{ers,k}} = 16 \cdot 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und $\Delta\theta_{\text{f,k,ges}} = 2,9 \text{ K}$)

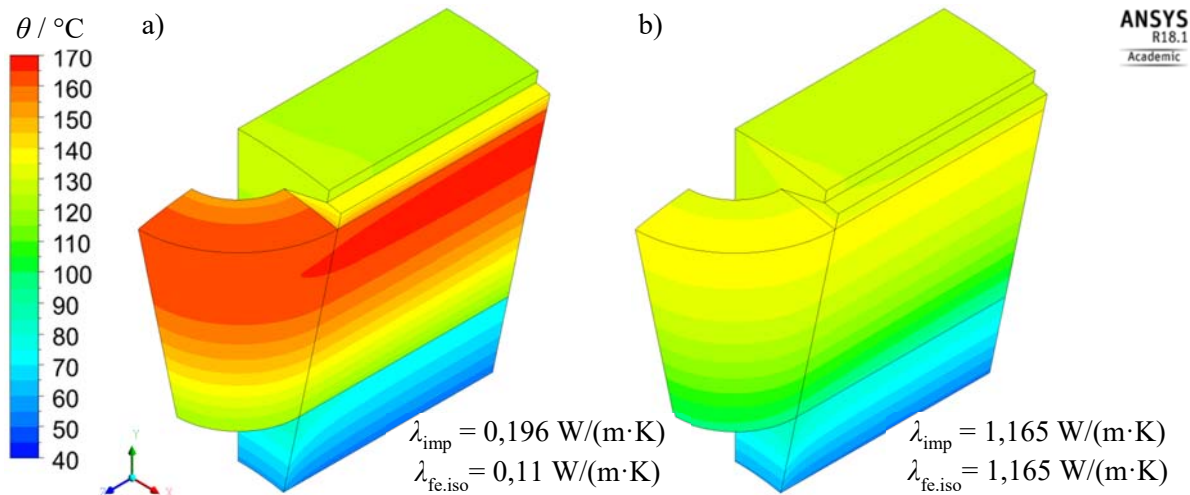


Abb. 11: Berechnung der Statorerwärmung bei Variation der Imprägniermittelwärmeleitfähigkeit

(Wärmeleitfähigkeiten: Elektroblech: M270-35A $\rightarrow \lambda_{\text{Fe,t}} = 24,8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $\lambda_{\text{Fe,n}} = 0,9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,

Wicklung: $\varphi_{\text{Cu,iso}} = 59 \%$, $d_{\text{Cu}} = 0,71 \text{ mm}$, $\lambda_{\text{Cu}} = 385 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $b_{\text{iso}} = 52 \text{ } \mu\text{m}$, $\lambda_{\text{iso}} = 0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$\rightarrow \lambda_{\text{ers,w.t.PUR}} = 0,78 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_{\text{ers,w.t.AIN}} = 2,38 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $\lambda_{\text{ers,w.n}} = 230 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und Flächenisolerwerkstoffe: $\lambda_{\text{iso}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $\delta_{\text{iso}} = 0,4 \text{ mm}$; Wärmeübergänge: Luftspalt: $\alpha_{\delta} = 60,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

und $\Delta\theta_{\text{f,\delta}} = 84,2 \text{ K}$, Wicklungskopf: $\alpha_{\text{wk}} = 76,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und $\Delta\theta_{\text{f,wk}} = 97,6 \text{ K}$ und Kühlsystem:

$\alpha_{\text{ers,k}} = 16 \cdot 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\theta_e = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{\text{f,k}} = 1,6 \text{ K}$ und Fügspalt Statorträger $\delta_{\text{iso}} = 25 \text{ } \mu\text{m}$)

Parallel zur analytischen Berechnung mittels Wärmequellennetzmethode erfolgt die Analyse der stationären Erwärmung des Statorpaketbereiches mit einem numerischen Teilmodell in ANSYS® CFX (vgl. **Abb. 11**). Die aufgeführten Randbedingungen entstammen einem numerischen Modell zur Bestimmung der äquivalenten Ersatzwärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes gemäß **Abb. 7**, der Kopplung zum analytischen Erwärmungsmodell, Herstellerangaben verwendeter Materialien, analytischen Näherungsberechnungen und Erfahrungswerten. Die eingepprägten Verlustdichten in den Statorpaketen werden ausgehend von **Tab. 2** berechnet.

Bei der herkömmlichen Ausführung der Wicklungsisolation ergibt sich eine maximale Wicklungstemperatur $\theta_{w,max} = 166,5 \text{ °C}$, wobei die Bezugstemperatur $\theta_{bez} = 40 \text{ °C}$ beträgt. Für die Ausführung der Wicklungsisolation in der thermischen Klasse H ergibt sich eine Reserve zur maximal zulässigen Wicklungstemperatur von 13,5 K. Durch den Einsatz des keramikähnlichen Isoliersystems könnte die maximale Wicklungstemperatur um ca. 30 K reduziert werden. Mit den vorgestellten Berechnungsmodellen wird abgeschätzt, dass die elektromagnetische Ausnutzung im Bemessungspunkt um ca. 15 % erhöht werden kann.

4 Fazit und Ausblick

Im Beitrag wurde gezeigt, dass keramikähnliche Kompositsysteme auf der Basis gefüllter Polysiloxane für die Isolation der Wicklung elektrischer Maschinen prinzipiell geeignet sind. Die Steigerung der spezifischen thermischen Leitfähigkeit des Imprägniermittels auf einen Wert $> 1 \text{ W/(m·K)}$ bewirkt eine zwei- bis dreimal höhere äquivalente Ersatzwärmeleitfähigkeit des Wicklungsverbundes im Vergleich zu herkömmlich eingesetzten Imprägniermitteln. Für hochausgenutzte elektrische Maschinen ergeben sich Reduzierungen der Wicklungsübertemperatur von bis zu 30 K. Eine Steigerung der elektromagnetischen Ausnutzung im Bereich (10...15) % erscheint realisierbar. Im Hinblick auf den Einsatz keramikähnlicher Isolierwerkstoffe wird auf die Notwendigkeit weiterer FuE-Arbeiten verwiesen, wobei Schwerpunkte die Vorbereitung eines Zertifizierungsprozesses für das entwickelte Imprägniermittel und die Prozesssicherheit bezüglich der keramikähnlichen Hauptisolation von Elektroblechpaketen sein werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20387 BR „Innovative Wicklungsisolation auf der Basis keramik-ähnlicher Kompositsysteme für energieeffiziente und hochausgenutzte elektrische Maschinen und Komponenten“ der Forschungsvereinigung „Forschungsgemeinschaft der Deutschen Keramischen Gesellschaft e.V.“, Ber-

gerstraße 145 a, 51145 Köln wurde dankenswerterweise über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

5 Literatur

- [1] ÜBLER, W.: *Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit elektrisch isolierender Polymerwerkstoffe*. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, 2002
- [2] ROST, S.: *Vor- und Nachteile unterschiedlicher Verguss-Systeme (EP, PU, SI)*. 3. Fachtagung E-Motoren und Transformatoren des Fachverbandes EWIS, Fulda, 2013
- [3] BENEDEK, C.: *Maßgeschneiderte PU-Vergussmassen und deren Zielkonflikte*. 3. Fachtagung E-Motoren und Transformatoren des Fachverbandes EWIS, Fulda, 2013
- [4] HOLLSTEIN, W.: *Giessharzsysteme und Technologien für den Vollverguss des Stators bei Motoren und Generatoren*. 3. Fachtagung E-Motoren und Transformatoren des Fachverbandes EWIS, Fulda, Germany: 01/2013
- [5] SIMPSON, N.; MELLOR, P. H.; WROBEL, R.: *Estimation of Equivalent Thermal Parameters of Electrical Windings*. 20th International Conference on Electrical Machines, France, Marseille: 2012, p. 1294 - 1300
- [6] TOMÁŠKOVÁ, T.; TRNKA, P.: *The influence of thermal properties of aluminum oxide on electrical insulating materials*. 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, Czech Republic, Brno: 2014, p. 421 - 425
- [7] TOMÁŠKOVÁ, T.; PECHANEK, R.; KINDL, V.: *Benefits of Upgrading Insulating Materials to Operating Temperature of Induction Motor*. 17th European Conference on Power Electronics and Applications, Switzerland, Geneva: 2015, p. 1 - 6
- [8] SCHUBERT, R.: *Entwicklung funktionalisierter polymerkeramischer Komposite*. Schlussbericht zum Teilprojekt 4.4, Innovativer regionaler Wachstumskern Partikeldesign Thüringen, Förderkennzeichen: 03WKC04D, 2018
- [9] KRUPA, P.; MALINARIC, S.: *Using the Transient Plane Source Method for Measuring Thermal Parameters of Electroceramic*. In: International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, 2014, Vol. 8, No. 5, 2014, p. 735 - 740
- [10] GIEBMANN, E.: *Experimentelle Bestimmung der spezifischen thermischen Leitfähigkeit von Verbundproben der Wicklung elektrischer Maschinen*. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2021