

Thermische Simulation eines hochdetaillierten Wickelkopfmodells einer elektrischen Antriebsmaschine

Andreas Huber, Thinh Nguyen-Xuan, Nicolas Brossardt, Frank Eckstein (BMW Group)
Michael Pfitzner (Universität der Bundeswehr)

Summary

An accurate and appropriate thermal design of electric machines is essential for increasing their mechanical (continuous) power and durability. The use of numerical simulations for thermal and flow analysis in electric machines has grown in popularity in addition to e.g. analytical methods based on thermal lumped circuit analysis [1]-[9].

The capability of providing continuous power of modern electric machine is reduced by thermal limits of some important parts of the electric machine. Many of those components are composed of wires or sheets and exhibit very inhomogeneous thermal and mechanical properties. Electric current flows through the stator coils to induce a rotating magnetic field and produce thereby electric ohmic losses which result in heating-up the stator. The usage of a cooling water jacket integrated in the enclosed housing is one possible but very efficient approach to reject the heat of the stator windings.

Especially the stator end windings exhibit the highest temperatures due to their longest path to the cooling water jacket. The thermal modeling of the distributed end windings still remains a challenge because of the irregular and complexed geometries.

Based on a constructive high-resolved model of an end winding segment with a high number of individually modeled copper wires the thermal behaviour of the end windings is studied dependent on parameters like e.g. thermal conductivities of the insulation by means of CFD.

From the results of the analysis of the detailed model an abstract thermally equivalent analogous model for the end windings without volumetric resolved single wires is derived for the thermal simulations of complete electric machines.

Keywords

BMW, Elektromotor, E-Maschine, Wicklung, Wickelkopf, Harz, Isolationspapier, Wärmeleitfähigkeit, Blechpaket, Gehäuse, thermisches Ersatzmodell

1. Hintergrund.....	2
2. Detailliertes Wickelkopfmodell.....	2
3. Untersuchung des thermischen Verhaltens im hochaufgelösten Wickelkopfmodell.....	3
4. Thermisches Ersatzmodell des Wickelkopfs.....	8
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	11
6. Literatur.....	12

1. Hintergrund

Die Leistungsfähigkeit moderner elektrischer Antriebsmaschinen wird häufig durch die thermischen Grenzen einiger wichtiger Bauteile begrenzt. Insbesondere die Wickelköpfe der Statorwicklung stellen hierbei typischerweise eine der kritischen Motorkomponenten dar. Die genaue Kenntnis der dort vorherrschenden Temperaturen ist daher essentiell, um eine Beschädigung der Maschine durch Überhitzung zu vermeiden. Aufgrund des Aufbaus der Wicklung aus einer Vielzahl einzelner gegeneinander isolierter Kupferdrähte ergeben sich sehr inhomogene thermische Eigenschaften. Während in Drahrichtung die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers dominiert, ist der Wärmetransport quer zu den Drähten vergleichsweise eingeschränkt. Dies führt insbesondere im Bereich der Wickelköpfe zu einer ungleichmäßigen dreidimensionalen Temperaturverteilung.

Bei der thermischen Simulation elektrischer Maschinen ist es generell üblich, die Kupferwicklung als einen Festkörper mit einer inhomogenen Wärmeleitfähigkeit zu modellieren ([2]-[5], [9]). Die experimentelle Bestimmung dieser Wärmeleitfähigkeiten gestaltet sich allerdings als relativ schwierig. Besonders in den geometrisch weitgehend undefinierten Wickelköpfen sind kaum sinnvolle und reproduzierbare Messungen möglich. Aus diesem Grund wird ein hochaufgelöstes Geometriemodell des Wickelkopfs erstellt, um die thermischen Eigenschaften simulativ zu untersuchen. Hierfür ist es erforderlich, jeden einzelnen Kupferdraht sowie das umgebende Imprägnierharz nachzubilden.

2. Detailliertes Wickelkopfmodell

Für den in dieser Arbeit zugrundegelegten Elektromotor besteht die kleinste Symmetrieeinheit in einem 20°-Segment des Stators bestehend aus vier Statornuten mit insgesamt 432 Einzeldrähten. Von einem realen Segmentmodell wurden aus mehreren Perspektiven skalierte Fotoaufnahmen erstellt, um im Anschluss konstruktiv ein realitätsgetreues Geometriemodell mit allen Einzeldrähten und Komponenten wie Isolierung und Harzkörper zu erstellen. Bei der Modellierung ist besonders darauf zu achten, dass sich keine Drähte schneiden bzw. durchdringen. Fig. 1 zeigt ein solches Segment als reales Bauteil sowie den Konstruktionsprozess im CAD-Modell [8].

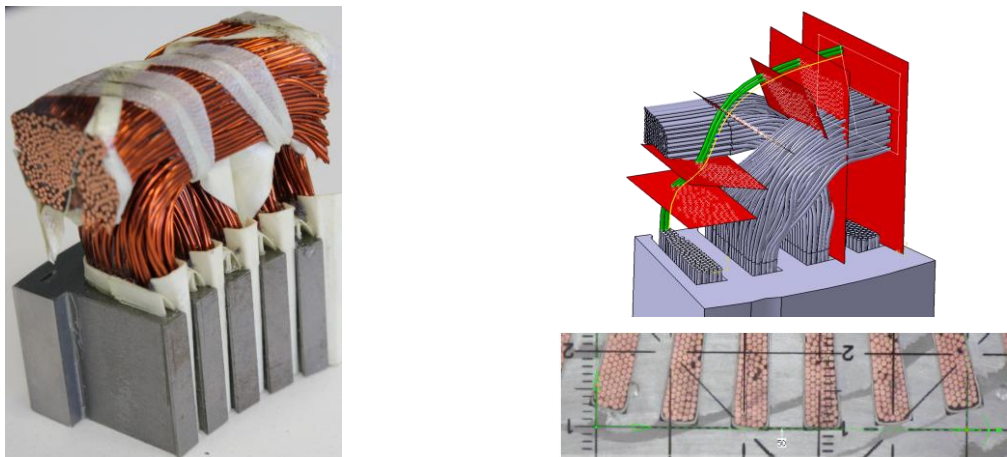


Fig. 1: Reales 20°-Segment eines Wickelkopfs mit verteilter Wicklung (links) und dazugehörige Konstruktion auf der Grundlage von Fotoaufnahmen (rechts) [8].

In Fig. 2 ist schließlich das fertige Segmentmodell mit allen Kupferdrähten, Isolationsmaterialien und dem Statorblechpaket dargestellt. Durch geschicktes Spiegeln und Kopieren lässt sich aus diesem Segmentmodell die gesamte Statorwicklung nachbilden. Diese ist ebenfalls in Fig. 2 abgebildet.

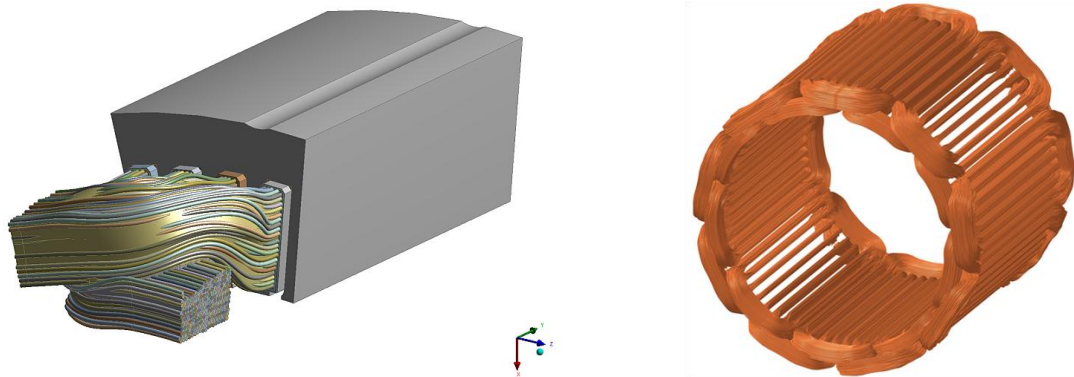


Fig. 2: Hochaufgelöstes 20°-Segmentmodell eines Wickelkopfs (links) und die daraus abgeleitete Statorwicklung (rechts) [8].

Aufgrund der relativ kleinen geometrischen Skalen im Detailmodell weist das numerische Netz mit ca. 46 Mio. eine relativ hohe Anzahl an hybriden Zellen auf. Die Diskretisierung des Harzkörpers im Wickelkopf stellt damit die größte Hürde dar. Fig. 3 zeigt das fertig vernetzte Simulationsmodell.

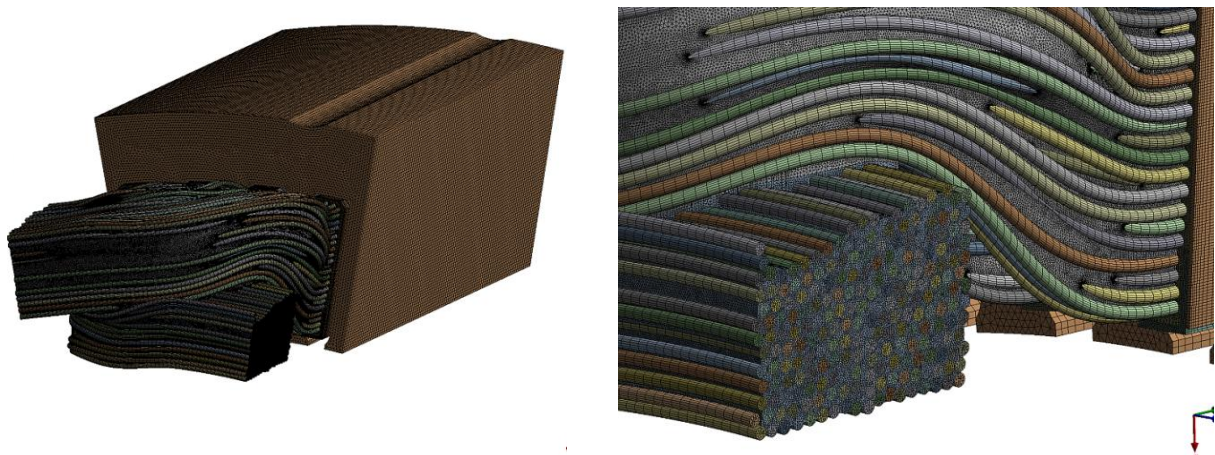


Fig. 3: Numerisches Netz des hochaufgelösten Wickelkopfmodells.

3. Untersuchung des thermischen Verhaltens im hochaufgelösten Wickelkopfmodell

Im Fokus der thermischen Untersuchungen steht die Charakterisierung des Einflusses der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Imprägnierharzes sowie der Nutsolationen auf die Temperaturverteilung und die Maximaltemperatur im Wickelkopf.

3.1. Simulationsrandbedingungen

Die thermische Analyse des hochaufgelösten Wickelkopfmodells wird zunächst vereinfachend ohne konvektiven Wärmetransport, d.h. ohne jegliche Umströmungen des Wickelkopfes, durchgeführt.

Da der Stator in das wassergekühlte E-Maschinengehäuse eingeschrumpft ist, wird an der Mantelfläche des Statorblechpakets eine konstante Temperaturrandbedingung von 75°C vorgegeben (Fig. 4, links). Die Symmetrierandbedingungen am Segmentmodell sind rechts in Fig. 4 hervorgehoben. Alle anderen Wände im Segmentmodell werden vereinfachend als adiabatisch betrachtet. Innerhalb des Wickelkopfs befindet sich noch ein Phasentrenner zur elektrischen Isolation der verschiedenen

Phasen. Dieser wird über einen thermischen Widerstand mit einer definierten Dicke und Wärmeleitfähigkeit modelliert.

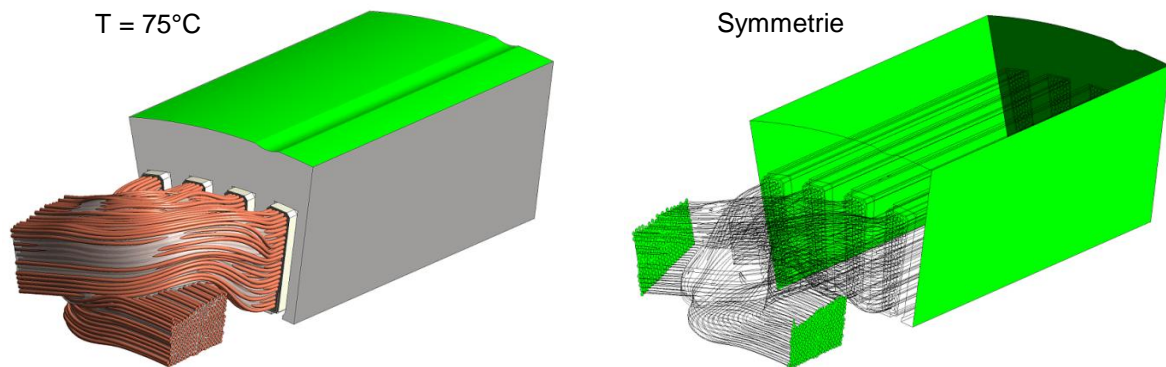


Fig. 4: Simulationsrandbedingungen des hochaufgelösten Wickelkopfmodells [9].

Für die Untersuchung des thermischen Verhaltens wird ein Betriebspunkt auf der Maximalleistungskurve ausgewählt und die dazugehörigen elektromagnetischen Verluste als volumetrische Wärmequellen in den Wicklungen und im Statorblechpaket vorgegeben.

3.2. Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Isolationsstoffe

Die in elektrischen Maschinen eingesetzten Isolationsstoffe haben einen maßgeblichen Einfluss auf das thermische Verhalten der Wicklung. Fig. 5 zeigt die modellierten Isolationsmaterialien im hochaufgelösten Wickelkopfmodell bestehend aus dem die Drähte umgebenden Imprägnierharz und der Nutisolation.

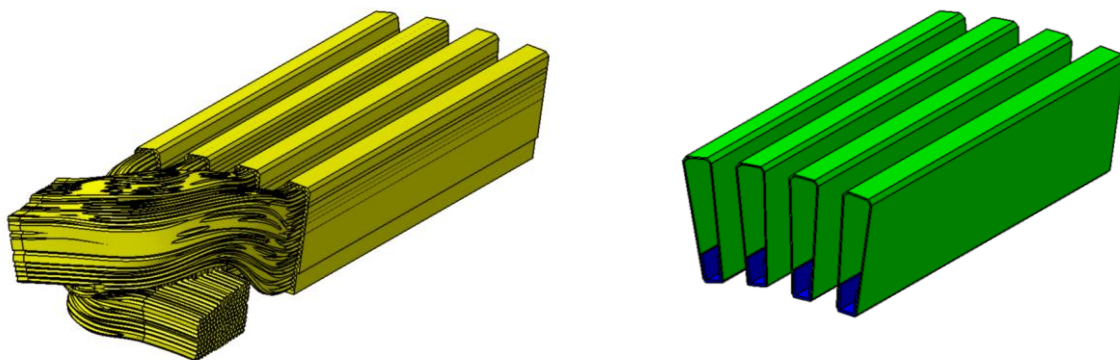


Fig. 5: Isolationsmaterialien im hochaufgelösten Wickelkopfmodell bestehend aus Imprägnierharz (links) und Nutisolation (rechts) [9].

Durch die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Imprägnierharzes wird besonders der Wärmetransport quer zu den Kupferdrähten beeinflusst, was deutliche Auswirkungen auf die Temperaturverteilung in der Wicklung hat. Die Nutisolation besteht typischerweise aus Isolationspapier und dient dem mechanischen Schutz der Wicklung bei der Montage sowie der elektrischen Isolation gegenüber dem Statorblechpaket. Als Nebeneffekt bewirkt die Nutisolation allerdings auch eine thermische Isolation der Wicklung.

Fig. 6 zeigt die simulierte Abhängigkeit der Maximaltemperatur im Wickelkopf von der Wärmeleitfähigkeit des Imprägnierharzes und der Nutisolation für ausgewählte Materialwerte.

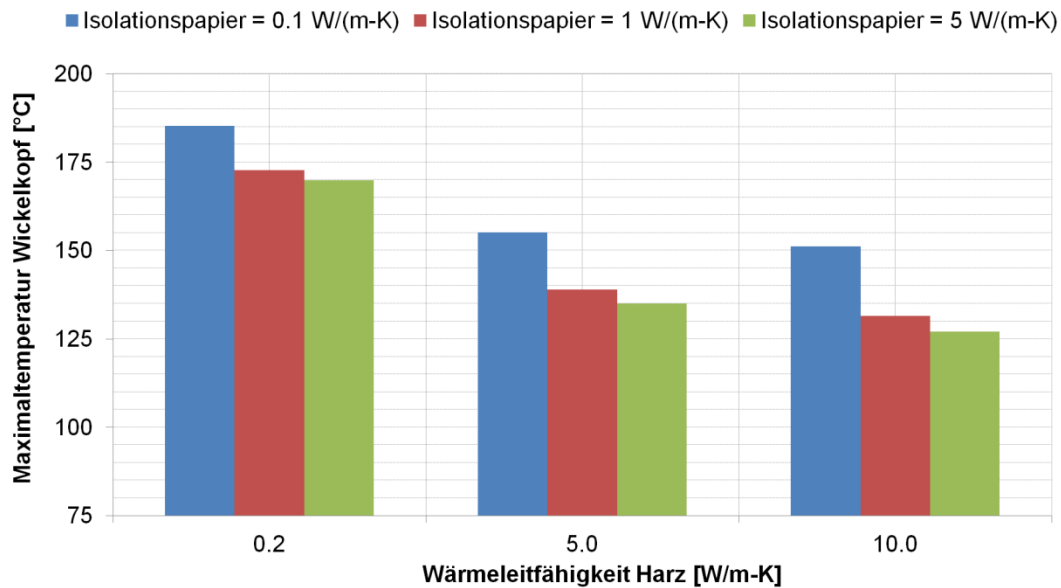


Fig. 6: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Imprägnierharzes und der Nutisolation auf die Maximaltemperatur im Wickelkopf (adiabater Fall).

Ein handelsübliches Imprägnierharz mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/m-K entspricht in dieser (adiabaten) Simulation einer Maximaltemperatur im Wickelkopf von ca. 185°C. Würde ein Harz mit einer Wärmeleitfähigkeit von 5 W/m-K verwendet, könnte die Maximaltemperatur im Wickelkopf um ca. 30 K reduziert werden. Wie erwartet ist der Kühleffekt um so größer, je höher die Wärmeleitfähigkeit des Harzes gewählt wird. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der Nutisolation. Beispielsweise bewirkt eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von 0,1 W/m-K auf 1 W/m-K eine Temperaturreduktion in der Wicklung um ca. 13 K. Deutlich höhere Werte für die Wärmeleitfähigkeit bringen allerdings kaum noch eine nennenswerte Verbesserung.

Grundsätzlich bewirkt jegliche Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Imprägnierharzes und der Nutisolation einen positiven Kühleffekt im Wickelkopf. Besonders eine Kombination beider Maßnahmen stellt sich als sehr aussichtsreich dar. Doch sind hier aus fertigungs-, material- und kostentechnischer Sicht Grenzen gesetzt. Besonders die zu erwartenden Mehrkosten für elektrisch isolierende, aber trotzdem gut wärmeleitende Materialien sind hierbei zu berücksichtigen. Die gezeigten Ergebnisse liefern aber wichtige Erkenntnisse über das Optimierungspotenzial zur effektiven Kühlung der Wicklungen im Stator einer E-Maschine und zeigen, dass die eingesetzten Isolationsmaterialien einen großen Einfluss auf die Kühlung des Wickelkopfes ausüben.

3.3. Temperaturverteilung im hochaufgelösten Wickelkopfmodell

Um eine Beschädigung der Wicklungen durch Überhitzung zu vermeiden, werden im Wickelkopf elektrischer Maschinen häufig Temperatursensoren zur Überwachung der Maximaltemperaturen platziert. Die Schwierigkeit bei der Positionierung dieser Sensoren besteht darin, die richtige Stelle im Wickelkopf zu finden. Auch hier kann das hochaufgelöste Wickelkopfmodell wertvolle Hinweise liefern, in welchen Bereichen möglicherweise „Hot Spots“ auftreten können, um genau an diesen Stellen die Temperatursensoren zu positionieren. Eine Beschriftung der vier modellierten Nuten mit deren Position im Segmentmodell zur weiteren Darstellung der Temperaturverteilungen zeigt Fig. 7.

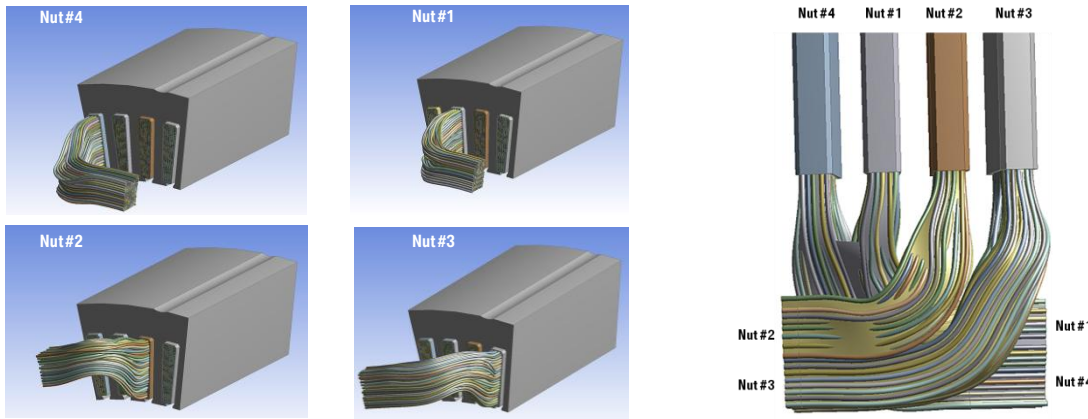


Fig. 7: Bezeichnung und Positionen der vier Statornuten.

Die thermische Simulation mit einer Wärmeleitfähigkeit für das Imprägnierharz von 0,2 W/m-K und 0,1 W/m-K für die Nutisolation ergibt die in Fig. 8 dargestellte Temperaturverteilung in der Wicklung und in den Statornuten. Die äußeren Flächen des Wickelkopfes sind dabei zunächst als adiabaten angenommen.

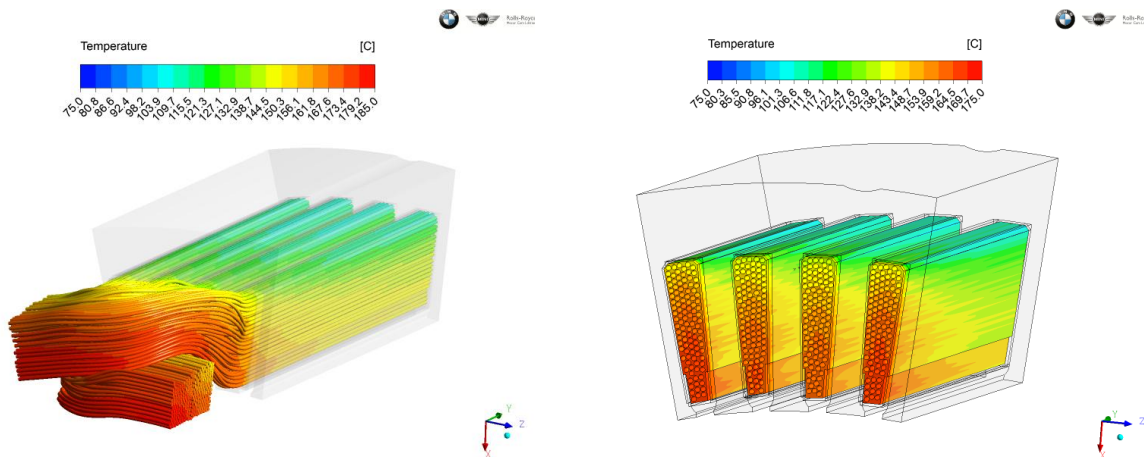


Fig. 8: Temperaturverteilung in der Wicklung (links) und in den Statornuten (rechts) für den adiabaten Fall.

Da kein konvektiver Wärmeaustausch betrachtet wird, ergeben sich die Hot Spots in der Simulation an den Stellen, die den längsten Wärmeleitpfad zur Wärmesenke bzw. Kühlung aufweisen. In der Statornut ist dies der Bereich des Luftspalts (Fig. 8, rechts) und in der Wicklung ist die höchste Temperatur in der Nut #4 am äußersten Rand des Wickelkopfes zu finden (Fig. 8, links). Eine detaillierte Temperaturverteilung dieses Bereichs ist zusätzlich in Fig. 9 dargestellt.

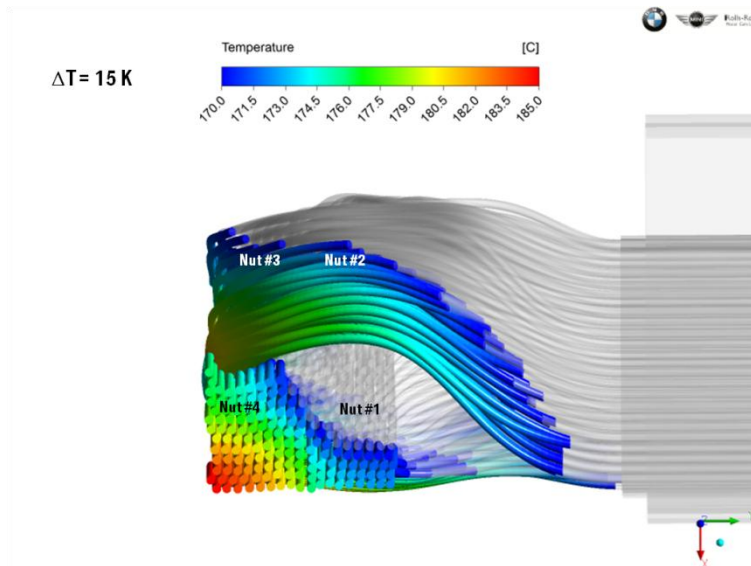


Fig. 9: Temperaturverteilung im Wickelkopf für adiabaten Fall.

Um schließlich auch noch den Einfluss der Luftströmung um den Wickelkopf auf die Temperaturverteilung abzuschätzen, wird der Wärmeübergang an dieser Stelle durch eine Konvektionsrandbedingung an den äußeren Flächen des Wickelkopfs nachgebildet.

Fig. 10 zeigt in Analogie zu Fig. 9 die simulierte Temperaturverteilung im Wickelkopf bei einem Wärmeübergangskoeffizienten von $400 \text{ W/m}^2\text{-K}$ bei einer Umgebungstemperatur von 100°C für einen Temperaturbereich von 15 K.

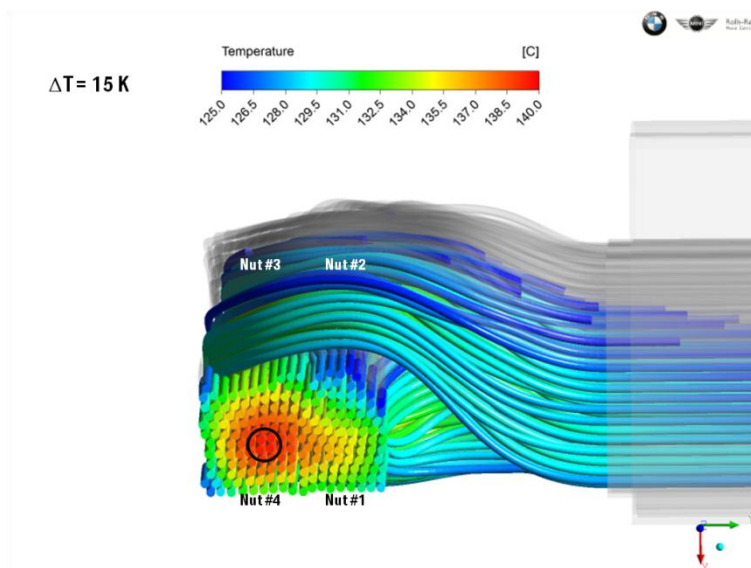


Fig. 10: Temperaturverteilung im Wickelkopf mit konvektivem Wärmeaustausch.

Durch den konvektiven Wärmeübergang am Wickelkopf verschiebt sich der Hot Spot in Richtung des Zentrum des Wickelkopfs und hier kommt es aufgrund der in diesem Fall niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Harzes zu einem Wärmestau.

Auf der Grundlage der Temperaturverteilung mit konvektivem Wärmeübergang kann die ungefähre Position sowie die Tiefe der Positionierung des Temperatursensors abgeschätzt werden, um den Bereich des Hot Spots im Wickelkopf ausreichend genau messen zu können.

4. Thermisches Ersatzmodell des Wickelkopfs

Für die thermische Simulation einer vollständigen E-Maschine muss die Modellierung der Wickelköpfe aufgrund der Rechenzeit und Rechnerkapazität deutlich vereinfacht werden. Auch in frühen Entwicklungsphasen ist der zeitliche Aufwand zur Implementierung mehrerer hochaufgelöster Wickelkopfmodelle nicht vertretbar. Zu diesem Zweck werden im Folgenden zwei vereinfachte Modellierungsansätze erläutert [9]. Im ersten Ansatz werden die harzdurchsetzten Wicklungen im Bereich des Wickelkopfs durch einen Kompositstrang ersetzt (*Ersatzmodell mit geometrisch aufgelöstem Wickelkopf*, Fig. 11). Übergeordnete geometrische Strukturen bleiben erhalten.

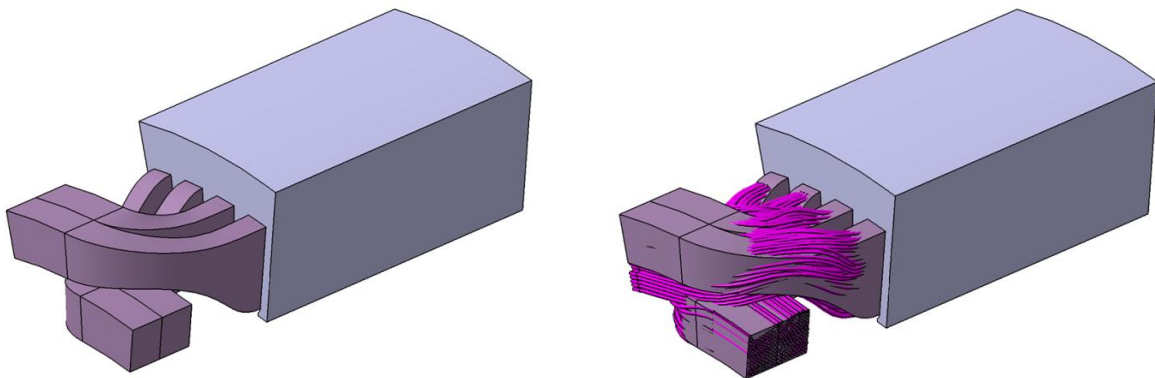


Fig. 11: Ersatzmodell mit geometrisch aufgelöstem Wickelkopf (links) und Überdeckungsgrad zum hochaufgelösten Wickelkopfmodell (rechts) [9].

Im zweiten Ansatz steigt der Abstraktionsgrad, indem die Wicklungen durch einfache Blockstrukturen modelliert werden (*Ersatzmodell mit abstraktem Wickelkopf*, Fig. 12).

Die zugrundeliegende Idee beider Ansätze ist es, Strangabschnitte mit ähnlicher geometrischer Ausrichtung zu Zonen konstanter anisotroper Wärmeleitfähigkeit zusammenzufassen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die dominierende Hauptrichtung der Wärmeleitung in jeder Zone möglichst gut mit dem lokalen Verlauf der Stränge übereinstimmt.

Für ein Ersatzmodell mit abstraktem Wickelkopf muss die Richtung des Wärmeflusses zusätzlich durch interne adiabate „Trennwände“ gesteuert werden (Fig. 12, rechts unten). Mit dieser Maßnahme kann trotz der wegfallenden geometrischen Begrenzung der Stränge eine Temperaturverteilung erzielt werden, welche dem Modell mit aufgelöstem Wickelkopf ähnlich ist.

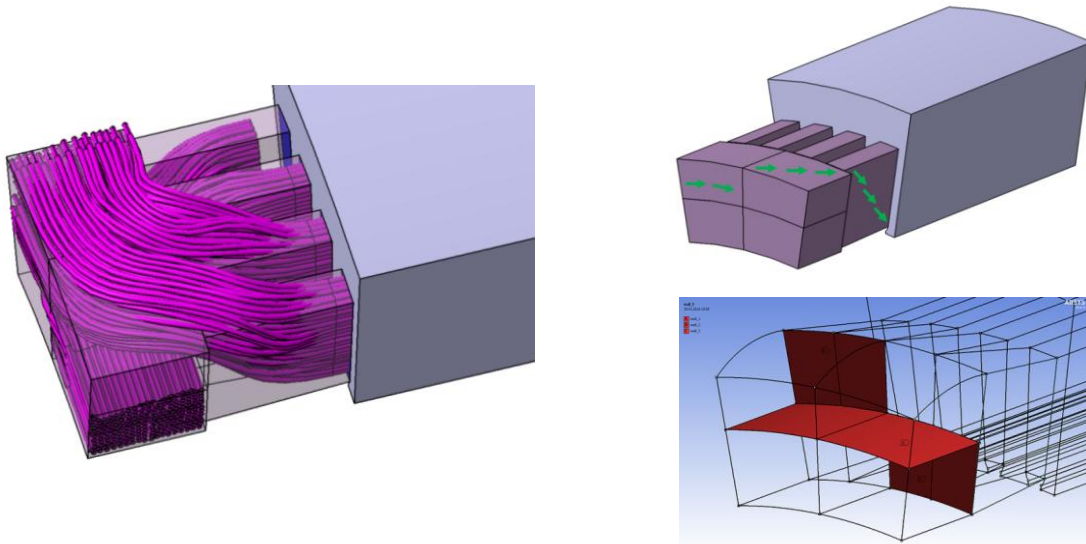


Fig. 12: Ersatzmodell mit geometrisch abstraktem Wickelkopf (links) und Steuerung des Wärmeflusses über interne adiabate Trennwände (rechts) [9].

Die Wärmeleitfähigkeit, welche in einem anisotropen Material durch einen Tensor zweiter Stufe dargestellt wird, dient beim abstrakten Ersatzmodell als wichtige „Stellschraube“ zur Steuerung des Wärmeflusses.

4.1. Temperaturverteilung im thermischen Ersatzmodell des Wickelkopfs

Fig. 13 zeigt die Simulationsergebnisse eines thermischen Ersatzmodells mit geometrisch aufgelöstem Wickelkopf im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des hochaufgelösten Wickelkopfmodells. Das Temperaturniveau wird im Ersatzmodell exakt getroffen. Auch die Lage des Hotspots lässt sich mithilfe des vereinfachten Modells vorhersagen. Der Preis der getroffenen Modellvereinfachungen ist indes ein leicht abweichender Temperaturverlauf entlang der Stränge. Auf der anderen Seite wird mit dem vereinfachten Ansatz eine Reduzierung der Simulationszeit für eine Rechnung mit adiabaten Randbedingungen von mehreren Stunden auf wenige Minuten erreicht.

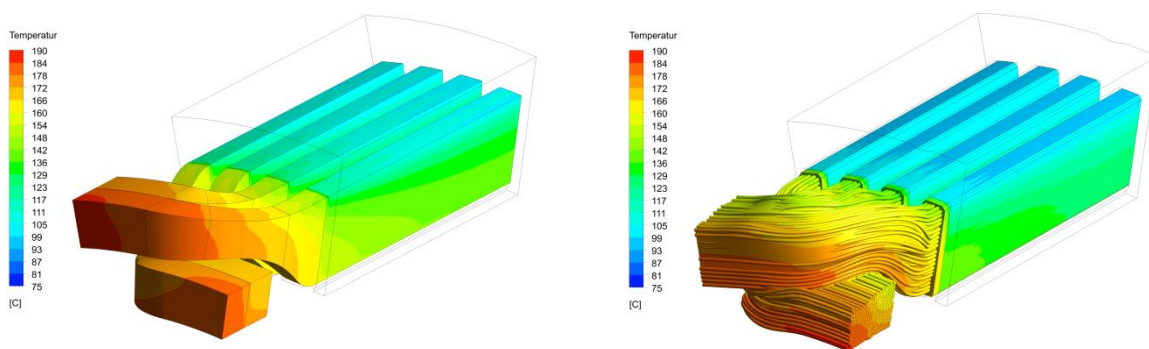


Fig. 13: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ersatzmodells mit geometrisch aufgelöstem Wickelkopf (links) und dem hochaufgelösten Modell (rechts) [9].

Um den Implementierungsaufwand des Simulationsmodells weiter zu senken, kann der Wickelkopf auch abstrakt abgebildet werden. In der detaillierten Ansicht in Fig. 14 mit einer Temperaturskala von 160 bis 190°C lässt sich erkennen, dass trotz der starken Vereinfachung eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse vorliegt. Die Abweichung des ermittelten Maximalwerts der Temperatur liegt bei 2 K. Der Hot Spot kann zudem auch in diesem Modell mit ausreichender Genauigkeit angegeben werden. Die Simulationszeit ist auch für dieses Modell um ein Vielfaches geringer als im hochaufgelösten Fall.

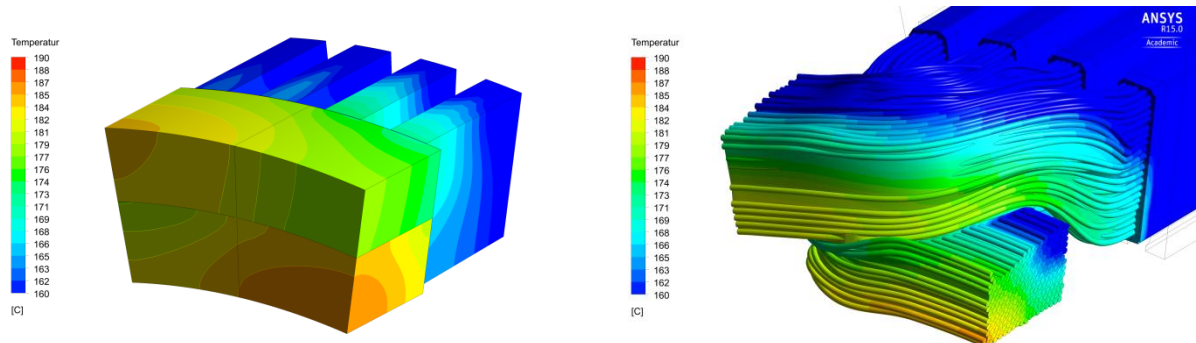


Fig. 14: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ersatzmodells mit abstraktem Wickelkopf (links) und dem hochaufgelösten Modell (rechts) [9].

4.2. Gesamtmodell des Stators

Aufgrund der deutlich verringerten Anzahl an Zellen lassen sich auf Basis der gezeigten vereinfachten Ansätze auch vergleichsweise einfach Gesamtsimulationen des Stators durchführen. Um den Aufwand weiter zu reduzieren, wird aus der anisotropen Werkstoffmodellierung ein Ansatz mit Zonen konstanter isotroper Wärmeleitfähigkeit abgeleitet. Aus den Segmentmodellen können schließlich durch Spiegeln und Kopieren vollständige Modelle des Stators erzeugt werden. Zwei Beispiele hierfür sind in Fig. 15 dargestellt.

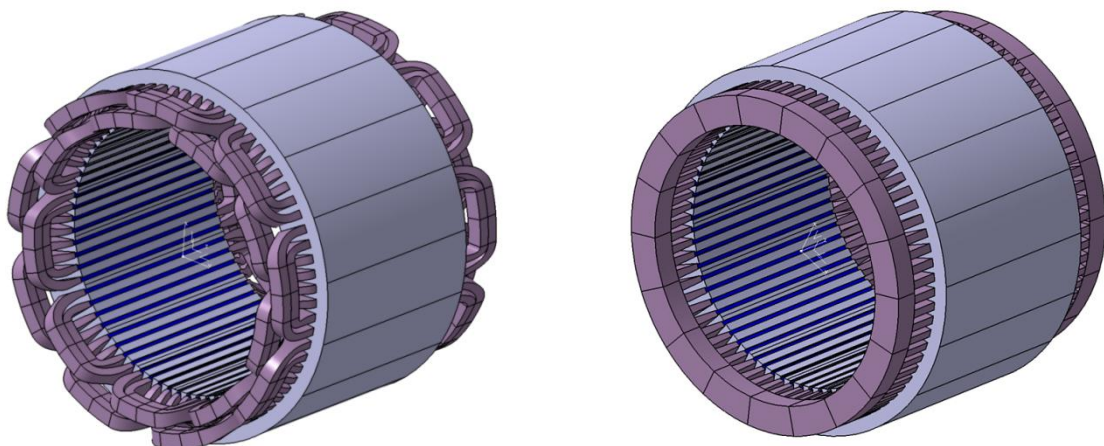


Fig. 15: Ersatzmodell mit geometrisch aufgelöstem (links) und abstraktem Wickelkopf (rechts) [9].

Fig. 16 zeigt schließlich die Simulationsergebnisse mit adiabater Randbedingung auf der Oberfläche der Wickelköpfe. Trotz des reduzierten Ansatzes stimmen das Temperaturniveau und die Lage des Hot Spots relativ gut mit den Ergebnissen der Segmentmodelle überein.

Infolge des isotropen Ansatzes geht jedoch der Temperaturgradient über den Querschnitt der Stränge verloren. Die Rechenzeit des Vollmodells ist im Vergleich zum jeweiligen Segmentmodell lediglich um den Faktor acht größer [9].

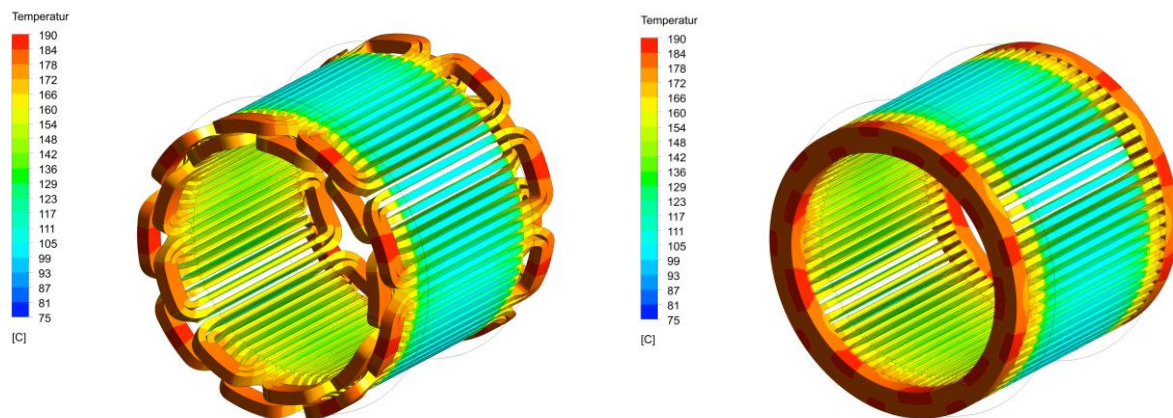


Fig. 16: Simulationsergebnisse der Gesamtmodelle des Stators bei isotroper Werkstoffmodellierung für beide Abstraktionsstufen des Wickelkopfs.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch ein geometrisch hochaufgelöstes Wickelkopfmodell ist es möglich, den Einfluss der Wärmeleitfähigkeiten der eingesetzten Isolationsstoffe auf das thermische Verhalten der Wicklung umfassend und ohne aufwendige Messungen zu untersuchen. Wie zu erwarten zeigt sich, dass jegliche Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit einen positiven Einfluss auf die Kühlung hat. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann anschließend ein ökonomisch sinnvoller Bereich für die entsprechenden Materialkennwerte definiert werden. Außerdem lässt sich mit dem detaillierten Wickelkopfmodell sehr genau die Position der kritischen Hot Spots in der Wicklung bestimmen und das Modell liefert so wertvolle Hinweise für die Positionierung von Temperatursensoren zum Schutz der Wicklung vor Überhitzung.

Des Weiteren werden auf Basis des hochaufgelösten Wickelkopfmodells einige Ansätze für vereinfachte Rechenmodelle vorgestellt. Durch die geometrische Nachbildung ganzer Stränge bzw. die geschickte Kombination von Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten lässt sich die Modellgröße deutlich reduzieren. Dadurch wird es möglich, auch für vollständige Statorn rechnerische Simulationsmodelle bei vergleichbarer Genauigkeit zu erzeugen.

Um zukünftig eine genauere Abschätzung des Einflusses der konvektiven Wärmeabfuhr am Wickelkopf auf die Temperaturverteilung machen zu können, wird im nächsten Schritt ein hochaufgelöstes Wickelkopfsegmentmodell inklusive der umgebenden Komponenten wie Gehäuse, Rotor und der eingeschlossenen Luft für die thermische Berechnung herangezogen. Auf diese Weise ist eine mit Ungenauigkeit behaftete Abschätzung des Wärmeübergangskoeffizienten basierend auf semi-empirischen Korrelationen und thermischen Netzwerkmodellen am äußeren Rand des Wickelkopfes nicht mehr erforderlich, da die Strömung insgesamt im Modell mit betrachtet wird.

6. Literatur

- [1] Huber, A.; Pfitzner, M.; Nguyen-Xuan, T.; Eckstein, F.: „Effiziente Strömungsführung im Wassermantel elektrischer Antriebsmaschinen“, ATZelextronik 8, Nr.6, 2013
- [2] Kolondzovski, Z.; Belahcen, A.; Arkkio, A.: „Multiphysics thermal design of a high-speed permanent-magnet machine“, Applied Thermal Engineering 29, Nr.13, 2009
- [3] Wrobel, R.; Mellor, P. H.; Holliday D.: „Thermal Modeling of a Segmented Stator Winding Design“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, 20011
- [4] Hettegger, M.; Streibl, B.; Bíró, O.; Neudorfer, H.: „Identifying the heat transfer coefficients on the end-windings of an electrical machine by measurements and simulations“, XIX Internationale Conference on Electrical Machines, 2010
- [5] Cezário, C. A.; Oliveira, A. A. M.: “Electric Motor Internal Fan System CFD Validation”, International Conference on Electrical Machines, 2008
- [6] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Staton, D.; Shanel, M.; Mueller, M.; Mejuto, C.: „Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, 2009
- [7] Staton, D.; Boglietti, A.; Cavagnino, A.: “Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis”, Electric Machines and Drives Conference, IEMDC’03, IEEE International Bd. 2, Vol. 2, 2003
- [8] Stockinger, U.: „Numerische Simulation und experimentelle Validierung thermischer Materialeigenschaften elektrischer Maschinen“, Bachelorarbeit, TU München, 2012
- [9] Brossardt, N.: „Entwicklung einer Methode zur effizienten Berechnung der Temperaturverteilung im Stator einer elektrischen Maschine“, Diplomarbeit, TU München, 2014