

**KLEBEN +
DICHTEN +
VERGIESSEN**

Kisling

Wärmeleitfähige Vergusslösungen für die Elektromobilität



Wärmeleitfähige Vergusslösungen für die Elektromobilität

Durch den Verguss von Elektromotoren und Leistungselektronik (Steuergerät, Wandler, Umrichter, etc.) mit wärmeleitfähigen Vergussmassen ist es möglich eine signifikante Leistungssteigerung zu erzielen. Um optimale Ergebnisse zu erreichen, werden hierfür hochtechnologische Vergussysteme mit hervorragenden Fließeigenschaften und hohen Wärmeleitfähigkeiten benötigt. Doch welche Leistungssteigerungen sind durch den Einsatz innovativer wärmeleitfähiger Vergussmassen möglich und wie gestalten diese Systeme die Zukunft der E-Mobilität mit? Dies soll im nachfolgenden Beitrag am Beispiel eines Elektromotors näher dargestellt werden.

E-Mobilität – ein wachsender Markt

Der stetig wachsende Markt der Elektromobilität bietet große Chancen für neue Technologien, um die neuen, steigenden Anforderungen zu erfüllen. Das der Wandel zum elektrisch betriebenen Automobil stattfindet und rasant voranschreitet ist evident und kann auch durch die Anzahl an Neuzulassungen belegt werden. Wurden 2017 noch 54.490 Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb neu registriert, so stieg diese Zahl 2021 bereits auf beeindruckende 681.410 [1]. In modernen Elektroautos bilden sowohl die Batterie, die Leistungselektronik sowie auch der elektrische Motor die Herzstücke des Automobils. Diese Bauteile generieren während der Nutzung durch eine auftretende Verlustleistung Wärme, welche eine Reduktion der abrufbaren Leistung zur Folge hat.

Wärmeleitfähige Vergussmassen

Die Herausforderung bei der Formulierung einer wärmeleitfähigen Vergussmasse ist das Herausfinden des optimalen Zusammenspiels verschiedener Füllstoffe und dessen Partikelgrößen, welche ein gutes Fließverhalten, eine gleichmässige Partikelverteilung in der Polymermatrix und effektive Wärmeleitung ergeben.

Eine niedrige Viskosität der Vergussmasse ist ebenfalls wünschenswert, um nicht nur die engen Zwischenräume zwischen den Kupferwicklungen auszufüllen, sondern auch um Unebenheiten der Oberflächen im Mikro- und Submikrobereich auszugleichen.

Hierbei ist die Verdrängung von Luft und damit die Vermeidung von Lufteinschlüssen von höchster Wichtigkeit, da Luft mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,03 W/m*K ein sehr schlechter Wärmeleiter ist und Lufteinschlüsse zu partiellen Teilentladungen führen können. Eine reine Polymermatrix auf Epoxidharz- (EP) oder Polyurethanbasis (PU) weist eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,2 W/m*K auf und ist somit eher ein thermischer Isolator.

Durch den Einsatz geeigneter Füllstoffe und optimierter Einarbeitungsverfahren können mit 2-komponentigen Systemen eine Wärmeleitfähigkeit von bis 3,5 W/m*K erzielt werden. Bei 1-Komponenten Wärmeleitpasten sind sogar Werte bis zu 5 W/m*K realisierbar. Eine Übersicht der Wärmeleitfähigkeiten ist in **Bild 1** dargestellt.

Material	Wärmeleitfähigkeit [in W/m*K]
Luft	0,03
Polymer (EP oder PU), ungefüllt	0,2
Harz, gefüllt	0,6 – 3,5
Pasten, gefüllt	1 - 5

Bild 1: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten von verschiedenen Materialien

Bei der Auswahl der Vergussmasse spielt neben der thermischen Leitfähigkeit auch das Fließverhalten eine wichtige Rolle. Bei zunehmender Wärmeleitfähigkeit eines Systems nimmt auf Grund des steigenden Füllstoffgehalts die Viskosität zu, siehe **Bild**

2.

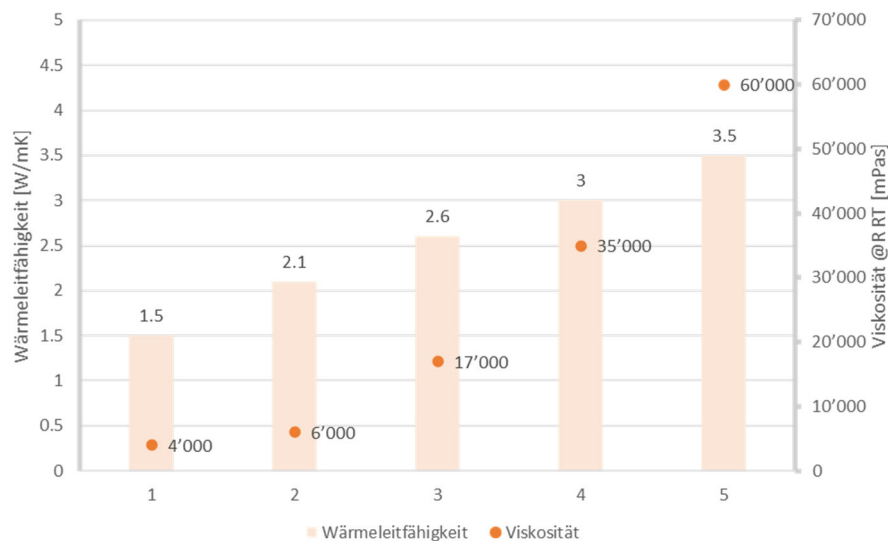


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit vs. Viskosität

Um der steigenden Viskosität entgegenzuwirken, kann der Vergussprozess optimiert bzw. angepasst werden. So können beispielsweise sowohl die Vergussmasse als auch das zu vergiessende Bauteil auf eine erhöhte Temperatur vorgewärmt werden, um zum einen die Viskosität der Vergussmasse zu reduzieren und das Fließverhalten über das gesamte Bauteil gleichmäßig aufrecht zu erhalten, da kein Temperaturverlust durch eine Temperaturdifferenz zwischen der Vergussmasse und dem Bauteil vorliegt und somit ein Anstieg der Viskosität eintritt.

Polyurethane als vielversprechende Alternative zu Epoxidharzen

Polyurethane stellen aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften, wie z.B. die Zähigkeit, und der geringen Neigung zu Spannungsrissen im Vergleich zu Epoxidharzen eine interessante Alternative dar. Ihr vergleichsweise geringer Temperatureinsatzbereich führt jedoch häufig zu einer Nichtbeachtung dieser Polymergruppe. Dauereinsatztemperaturen von bis zu 130°C stellen generell kein Problem für diese Materialgruppe dar und auch Systeme mit Temperatureinsatzbereichen von bis zu 160°C sind am Markt verfügbar. An dieser Stelle muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass diese Temperatur den Temperaturbereich für Dauerbetrieb darstellt. Vereinzelt Temperaturspitzen, welche diese Temperatur übersteigen, können von den Materialien gut vertragen werden, siehe das unten beschriebene Beispiel 2.

Beispiel 1: Optimierte Wärmemanagement am Beispiel eines elektrischen Motors

Eine effiziente Kühlung des E-Motors ist notwendig, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen. Gerade bei diesem Bauteil ist die Größe und damit einhergehend das Gewicht ein wichtiger Faktor, da das Motorengewicht ebenfalls zum Gesamtgewicht des Automobils beiträgt. In **Bild 3** ist schematisch ein Elektromotor und der in orange hervorgehobenen, vergossenen Stator dargestellt. Es gilt zu erwähnen, dass es durch den Einsatz wärmeleitfähiger Vergussmassen möglich ist, verschiedene Bereiche eines Elektromotors zur Leistungsoptimierung zu vergießen. Hierbei muss unter anderem auch das durch den Verguss resultierende zusätzliche Gewicht und die hierdurch erreichte Performance-Steigerung gegeneinander abgewogen werden. So kann z. B. nur der Wickelkopf vergossen werden, was zu einer geringeren Gewichtszunahme führt im Vergleich zu einem Statorvollverguss.

Bei einem Statorvollverguss werden zudem hohe Ansprüche an das Fließverhalten der Vergussmasse gestellt, da ansonsten in fehlerbehafteten Bereichen des Vergusses (Lufteinschlüsse) partielle Teilentladungen, elektrische Durchschläge sowie eine Reduzierung der Wärmeabfuhr auftreten können. Die Gewichtszunahme bei dem hier vergossenen Motor lag bei ca. 6 % und bedeutete eine auf das Leistungsgewicht bezogene Steigerung von ungefähr 15 %.

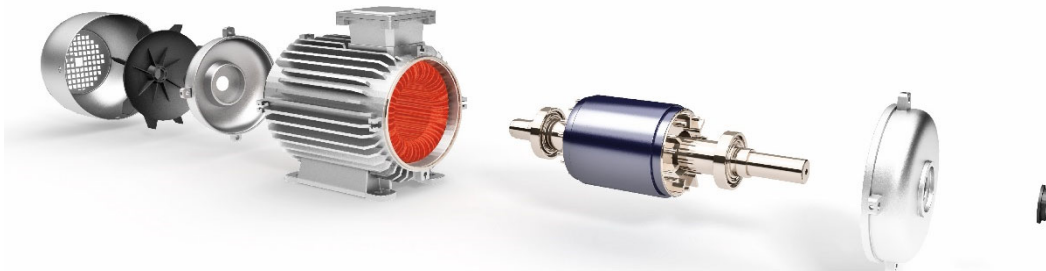


Bild 3. Schematische Illustration eines Elektromotors, bei welchem die vergossenen Wicklungen in orange hervorgehoben sind.

Obwohl die eingesetzte Vergussmasse noch eine vergleichsweise geringe Dichte von ca. 2 g/cm³ hatte, ist eine Gewichtszunahme des Motors durch den Verguss unausweichlich, weshalb im Einzelfall immer entschieden werden muss, ob der Verguss der Wickelköpfe oder ein Vollverguss für die jeweilige Anwendung zielführender ist

Beispiel 2: Effizienzsteigerung eines Elektromotors durch einen optimierten Vergussprozess

Durch den Einsatz einer 2-komponentigen Polyurethan Vergussmasse mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 1 W/m*K konnten die Vergussergebnisse deutlich verbessert werden. In diesem Fall wurde nicht nur die Vergussmasse, sondern auch der Stator entsprechend vorgewärmt. **Bild 4** (links) zeigt den Vergleich eines aufgesägten E-Motors mit und ohne Vortemperierung. Im linken Bild sind deutliche Fehlstellen (Luftlunker) zwischen den Kupferwicklungen zu erkennen, was auf ein schlechtes Fließen der Vergussmasse durch eine zu hohe Viskosität zurückzuführen ist. Durch die Vorwärmung des Motors konnte die Imprägnierqualität deutlich verbessert werden, weil während des Vergusses die Viskosität auf niedrigem Niveau gehalten werden konnte, siehe **Bild 4** (rechts).



Bild 4: Vergleich der Imprägnierqualität eines nicht vortemperierten Elektromotors (links) und eines vortemperierten Elektromotors (rechts)

In einem weiteren Versuch konnte durch den Vollverguss eines wassergekühlten Motors mittlerer Leistungsstufe bei einer Wassertemperatur von 25°C eine durchschnittliche Leistungssteigerung von 13% gegenüber einem nicht vergossenen Motor erzielt werden. Diese Effizienzsteigerung war sogar noch ausgeprägter, wenn die Wassertemperatur am Einlass auf 65°C erhöht wurde. Hier lag der Leistungszuwachs durch den Vollverguss bei nahezu 20%. Die Ergebnisse sind in **Bild 5** graphisch dargestellt.

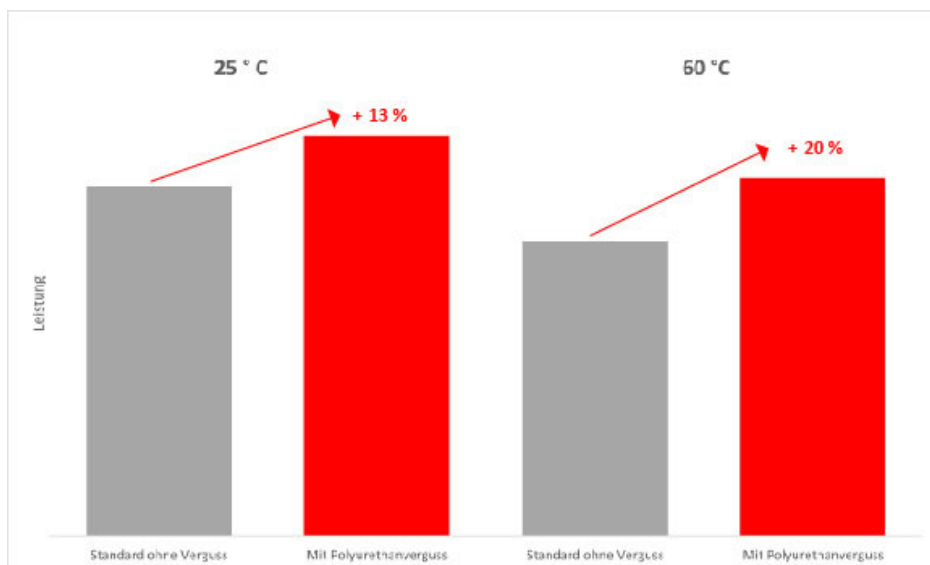


Bild 5. Vergleich der Leistung zwischen einem unvergossenen Elektromotor und einem mit wärmeleitfähigem Polyurethan ($1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) vergossenen Motor bei unterschiedlichen Temperaturen der Wasserkühlung.

Analog zum Leistungszuwachs, welcher durch den Vollverguss des Stators mit einer Vergussmasse erzielt werden konnte, wurde die Spitztemperatur und Betriebsdauerertemperatur bis zu 10 % gesenkt. Die Ergebnisse sind in **Bild 6** gezeigt. Eine Endtemperatur von 150° C wurde bei dem vergossenen Motor nicht überschritten.

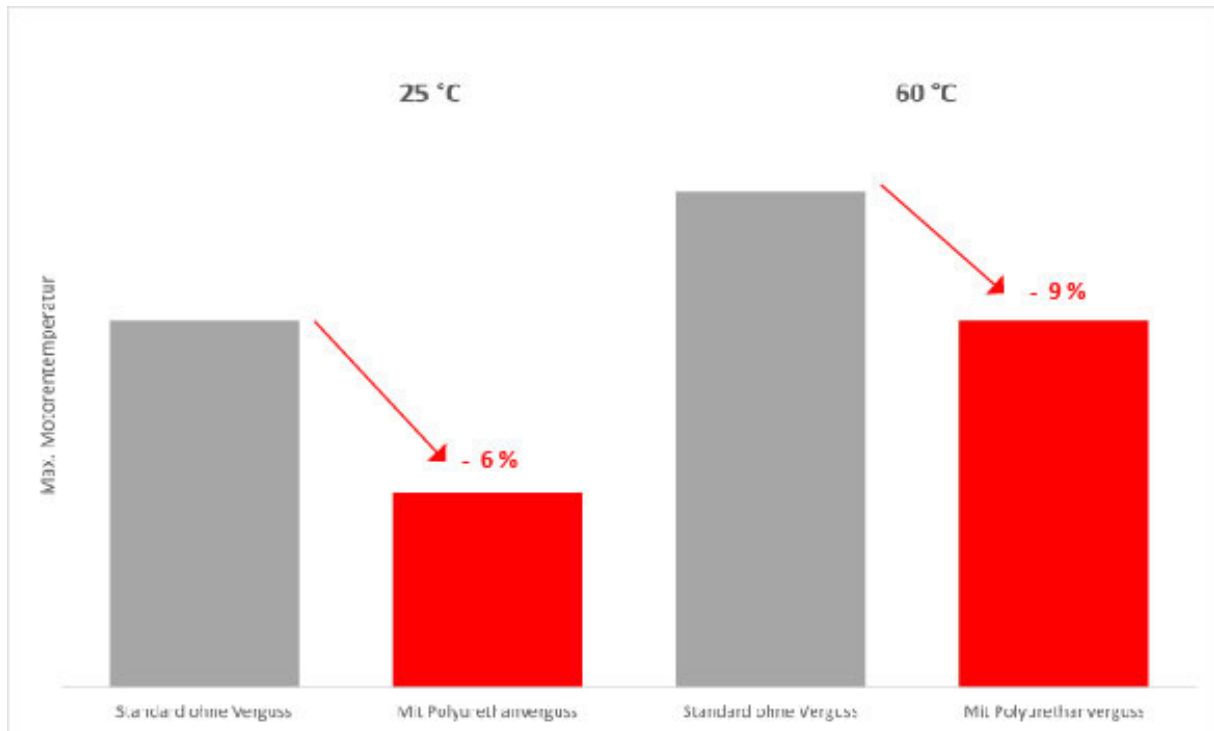


Bild 6. Vergleich der maximalen Motortemperatur zwischen unvergossenem und vergossenem Elektromotor bei unterschiedlichen Kühlwassertemperaturen.

Zusammenfassung und Fazit

Mit der fortschreitenden Elektrifizierung der Automobilbranche eröffnen sich stetig neue Herausforderungen, welche durch den Einsatz innovativer Materialien gelöst werden können. Am Beispiel von Elektromotoren konnte belegt werden, dass der Verguss mit einer wärmeleitfähigen Vergussmasse zu einer Steigerung der Leistung sowie einer Erhöhung der Effizienz (Senkung der Spitzen- und Dauerbetriebs-temperatur) führt. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass durch niedrigviskose Vergusssysteme, welche gleichzeitig aber über eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit verfügen, ein Eindringen der Polymermatrix zwischen die engen Kupferwicklungen möglich war, um so eine optimale Anbindung der Polymermatrix an die Wicklungen zu erhalten. Hierdurch wird eine verbesserte Wärmeabfuhr von der Hitzequelle hin zu einer externen, aktiven Kühlung ermöglicht.

[1] Quelle: <https://www.kba.de/>

Autoren :

Dr. Michael Karcher, Head of Market Management & Application Technology, Kisling Group, mkarcher@kisling.com, www.kisling.com

&

Andreas Hartwig, Market Manager & Senior Application Engineer, Kisling Group, ahartwig@kisling.com, www.kisling.com