

Abkühlung für Fahrzeugelektronik

Wärmeleitfähige Kunststoffe helfen bei der Entwärmung von Bordnetzkomponenten

Die Anzahl elektronischer Komponenten in Fahrzeugen nimmt seit Jahren beständig zu. Um sie mit elektrischer Energie zu versorgen, werden häufig hohe Ströme benötigt. Die dabei entstehende Wärme stellt allerdings eine Gefahr für die Komponenten dar und kann zur Beschädigung und zum Ausfall der Bauteile führen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Temperatur an kritischen Bereichen bieten wärmeleitfähige Kunststoffe. Welche Effekte sich damit erreichen lassen, zeigt das Beispiel einer Vorsicherungsbox für den Golf 8.



Es wird zunehmend enger im Motorraum moderner Fahrzeuge wie beispielsweise des aktuellen Golf 8. Dadurch erhöht sich die Wärmebelastung der verbauten Komponenten

© Volkswagen

Die Anforderungen an das Bordnetz moderner Fahrzeuge wachsen zunehmend aufgrund der steigenden Anzahl an elektrischen Verbrauchern für Komfort- und Sicherheitsfunktionen. Hohe Stromstärken treten dabei nicht nur bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen auf, sondern auch im klassischen 12-V-Bordnetz. Gerade bei niedrigen Betriebsspannungen sind große Ströme erforderlich, um ausreichend elektrische Energie an die Verbraucher zu übertragen.

Durch die steigende Anzahl an Funktionen erhöht sich auch die Anzahl der Komponenten des Bordnetzes. Um sie im Motorraum unterzubringen und gleichzeitig Gewicht zu sparen, ist eine kompakte Bauweise Wert nötig. Kleinere Bau-

teile, geringerer Bauraum und höhere Ströme haben allerdings eine schlechtere Belüftung und eine erhöhte Wärmeentwicklung zur Folge. Das wiederum bewirkt eine größere thermische Belastung der Komponenten. Eine Möglichkeit diese zu reduzieren, stellen wärmeleitfähige Kunststoffe dar, die für eine verbesserte Wärmeabfuhr sorgen. Am Beispiel einer Vorsicherungsbox für den Golf 8 der Volkswagen AG (VW) lässt sich gut erkennen, wie dadurch die Temperaturen gesenkt werden können.

Diese Vorsicherungsbox wird bei der FEP Fahrzeugelektrik Pirna GmbH, Pirna, in hohen Stückzahlen gefertigt. Sie dient der ersten Absicherung der Starter- bzw. Generatorleitung direkt an der 12-V-Fahr-

zeugbatterie. Dafür wird eine 400-A-Sicherung zwischen den Pluspol der Batterie und den Leitungsstrang zum Starter bzw. Generator geschaltet. Die Leitung zur Hauptsicherungsbox und damit zu den Verbrauchern ist parallel dazu über die Stromschiene direkt mit der Batteriepolklemme verbunden (**Bild 1**). Über die Sicherung und deren Kontaktstellen fließt im Betrieb der gesamte Strom aller Verbraucher im Fahrzeug. Nach den Bauteilspezifikation sind das Dauerströme bis zu 300 A bei Raumtemperatur.

Die Schädigung eines Bauteils erfolgt in aller Regel nicht durch den Strom selbst, sondern durch Überhitzung. Nach dem ersten Jouleschen Gesetz erzeugt Strom in einem elektrischen Leiter Wärme durch Umwandlung von elektrischer Energie. Die erzeugte Wärmemenge ist abhängig von der Stromstärke und Dauer sowie dem bauteilspezifischen elektrischen Widerstand. Dieser ergibt sich aus dem Material, der Bauteilgeometrie und dem Querschnitt der Anschlussleitungen.

Absicherung für die Fahrzeugelektronik

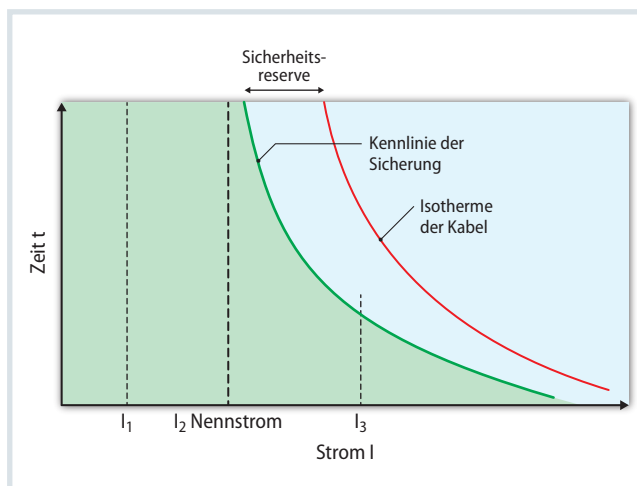
Die Aufgabe der Vorsicherung ist es, bei kritisch hohen Strömen als Sollbruchstelle zu dienen, um andere Bordnetzkomponenten und Leitungen vor Schäden zu schützen. Dafür macht man sich die Folgen der Umwandlung von Strom in Wärme zunutze: Hohe Ströme erzeugen Wärme und zerstören bei einer definierten Temperatur den Schmelzleiter der Sicherung, wodurch der Stromfluss unterbrochen wird. **Bild 2** illustriert dieses Prinzip. Im Normalbetrieb I_n bleibt die Wärme- »

Bild 1. Vorsicherungsboxen schützen Komponenten des Bordnetzes und Leitungen vor einer Überlastung durch hohe Ströme © FEP



Bild 2. Die Kennlinie der Schmelzsicherung zeigt, bei welcher Stromstärke und Belastungszeit die Sicherung auslöst. Die Kurve liegt bewusst unter den für die anderen Komponenten kritischen Bereichen

Quelle: FEP; Grafik: © Hanser



entwicklung in der Sicherung gering, so dass die Schmelztemperatur nicht erreicht wird. Im Fehlerfall I_3 (rote Kurve), also bei sehr hohen Strömen, entsteht schnell viel Wärme, so dass die Sicherung nach kurzer Zeit die Schmelztemperatur erreicht und auslöst. Die Zeit bis zum Auslösen ist von der Stromstärke abhängig.

Der kritische Betriebszustand

Damit andere Komponenten keinen Schaden nehmen, muss die Sicherung ansprechen, bevor deren Grenztemperaturen erreicht sind. Die kritische Temperatur der Leitungen ist neben der Kennlinie der Sicherung in **Bild 2** als „Isotherme der Kabel“ schematisch eingezeichnet. Links von dieser Kurve im Strom-Zeit-Diagramm ist die Temperatur für die Leitungen unkritisch. In Fällen mit geringer Überlast, also im Bereich nahe des Nennstroms der Sicherung, spricht diese nicht sofort an. Das ist der kritischste Betriebszustand, denn der anhaltend hohe Strom erzeugt auch Wärme an anderen Stellen.

Deshalb muss während der Entwicklung sichergestellt werden, dass die Vorsicherungsbox insgesamt und auch andere Komponenten in diesem Grenzbetrieb keinen Schaden nehmen.

Für die Einzelteile der Vorsicherungsbox sind folgende Maximaltemperaturen spezifiziert:

- Leitung: 200 °C
- Stromschiene: 130 °C
- Schraubverbindung: 130 °C
- Sicherung: 125 °C
- Kunststoff: 180 °C

Bild 3 zeigt eine Wärmebildaufnahme der Vorsicherungsbox und die in einem Finite-Elemente-Modell simulierte Wärmeverteilung. Im Vergleich zur Aufnahme mit der Wärmebildkamera ist in der Simulation besser erkennbar, dass ein Hotspot im Schmelzleiter der Sicherung vorliegt. Im Kunststoff selbst entsteht dadurch die höchste Temperatur an der Umspritzung des Gewindebolzens, mit dem die Sicherung und das Kabel verschraubt sind. Während der Hotspot in der Sicherung als Sollbruchstelle erwünscht ist, kann der

Hotspot am Gewindebolzen und der Verschraubung problematisch sein. Im Folgenden wird der Wärmefluss am Bauteil betrachtet, um die Wärmeverteilung besser zu verstehen und mögliche Maßnahmen zur gezielten Absenkung der Temperatur an kritischen Stellen abzuleiten.

Höhere Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs gefragt

Wärme fließt von einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke, wobei es drei Arten der Wärmeausbreitung gibt: Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Am Gewindebolzen finden somit mehrere Effekte gleichzeitig statt:

- Die Luft innerhalb der Box wird durch Konvektion erwärmt.
- Durch Strahlung wird Wärme an sichtbare Flächen abgegeben.
- Wärme wird aus der Sicherung zum Bolzen, Kabelschuh und Kabel geleitet.
- Wärmeabgabe erfolgt über das Kunststoffgehäuse durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung.

Die Wärmeleitung und damit die fließende Wärmemenge ist proportional zum Querschnitt der durchströmten Fläche und zur Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials. Im Vergleich zu Stahl und Kupfer ist die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes sehr gering, weshalb nur wenig Wärme durch das Gehäuse an die Umgebung abgegeben wird. Die in **Bild 4** dargestellte Simulation verdeutlicht diese Wärmeabgabe. Die grüne Fläche stellt den Bereich des Wärmeflusses aus der Box in die umgebende Luft dar. Wärmeleitung findet dabei im Wesentlichen nur in direkter Umgebung des Wärmeeintrags vom Bolzen in den Kunststoff statt. Schon in geringer Entfernung erfolgt kaum noch Wärmeleitung im Kunststoff und damit auch nur eine sehr geringe Wärmeabgabe an die Umgebung. Um die Temperatur des Bolzens zu senken, müsste mehr Wärme an die Umgebung abgegeben werden, beispielsweise über eine höhere Wärmeleitfähigkeit im Kunststoff.

Temperaturunterschied von 10 K

Die Simulation bestätigt die Erwartung, dass die Gesamtmenge der an die Umgebung abgegebenen Wärme bei höherer Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes steigt. Die grün dargestellte wirksame Fläche für die Wärmeabgabe wird größer, da die

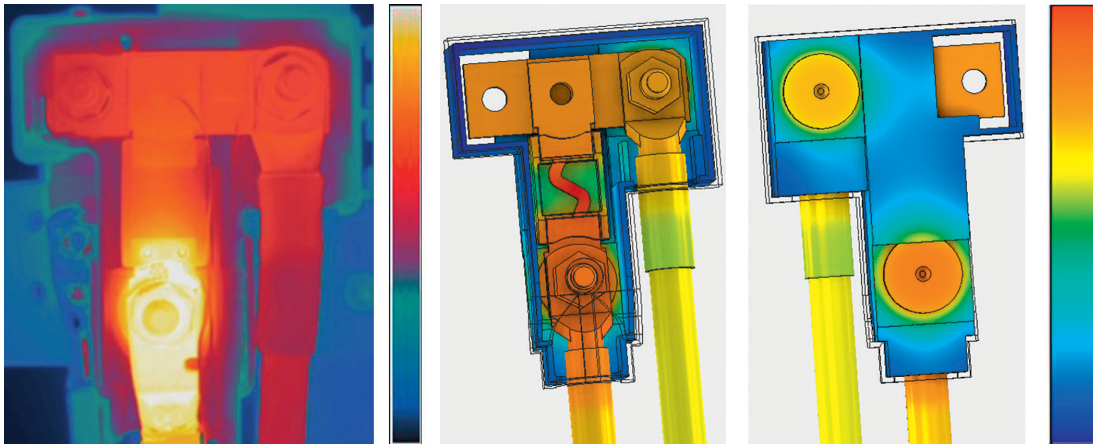


Bild 3. Wärmebildaufnahme (links) und FEM-Simulation (rechts) der Vorsicherungsbox bei Stromfluss: Der Hotspot am Gewindebolzen ist gut zu erkennen

© FEP

Wärme innerhalb des Kunststoffes vom Hotspot weggeleitet wird. Das zeigt, dass sich durch den Einsatz von wärmeleitfähigem Kunststoff die Temperatur am Bolzen reduzieren lässt. Ein Vergleich der Temperaturen am Bolzen mittels FEM-Simulation zwischen einem Kunststoff mit einer Wärmeleitfähigkeit (λ) von $0,23 \text{ W/mK}$ und einem wärmeleitfähigen Kunststoff mit $\lambda = 1,5 \text{ W/mK}$ prognostiziert einen Temperaturunterschied von etwa 10 K . Auf der Verschraubungsseite reduziert sich die Temperatur von 156 auf 146 °C, auf der Unterseite von 153 auf ca. 135 °C (**Bild 5**). Die durch bessere Wärmeableitung erreichte Temperaturabsenkung am Hotspot führt zu einer leichten Temperaturerhöhung in angrenzenden Bereichen des Kunststoffes.

Zur Überprüfung der durch Simulation ermittelten Ergebnisse wurde im nächsten Schritt die Box mit Material verschiedener Wärmeleitfähigkeiten im Spritzguss gefertigt und anschließend die Stromschiene mit Sicherung und Kabel montiert. Wärmeleitfähige Kunststoffe sind

mit unterschiedlichen Leitfähigkeiten am Markt verfügbar. Für eine bessere Wärmeleitfähigkeit sorgen dabei dem Kunststoffgranulat beigemischte Füllstoffe, die Wärme gut transportieren. Für die durchgeführten Versuche kamen das 77% mineralgefüllte PA 6 Durethan TP430-003 900117 mit $\lambda = 1,75 \text{ W/mK}$ und das 67% mineralgefüllte PA 6 Durethan TP430-004 900117 mit $\lambda = 1,05 \text{ W/mK}$ der Lanxess AG, Köln, zum Einsatz.

Bei je zwei Prüflingen pro Variante wurde der Leitungspfad über die Siche-

rung mit einem Dauerstrom von 200 A beaufschlagt. Als Sensoren wurden sechs Thermolemente an ausgewählten Stellen angebracht, um die Temperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 90 °C im Klimaschrank zu messen. Im Diagramm in **Bild 6** sind die gemessenen und simulierten Temperaturen an Thermolement Nr. 1 an der Anschlusslasche und Nr. 6 auf dem Kunststoffgehäuse unterhalb des Bolzens dargestellt. Es ist erkennbar, dass die gemessenen und simulierten Messwerte recht gut überein- ➤

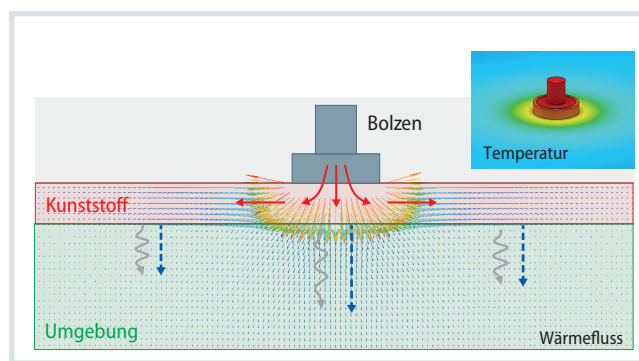


Bild 4. Je nach Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes verteilt sich der Wärmefluss in diesem auf einen größeren Bereich

Quelle: FEP; Grafik: © Hanser

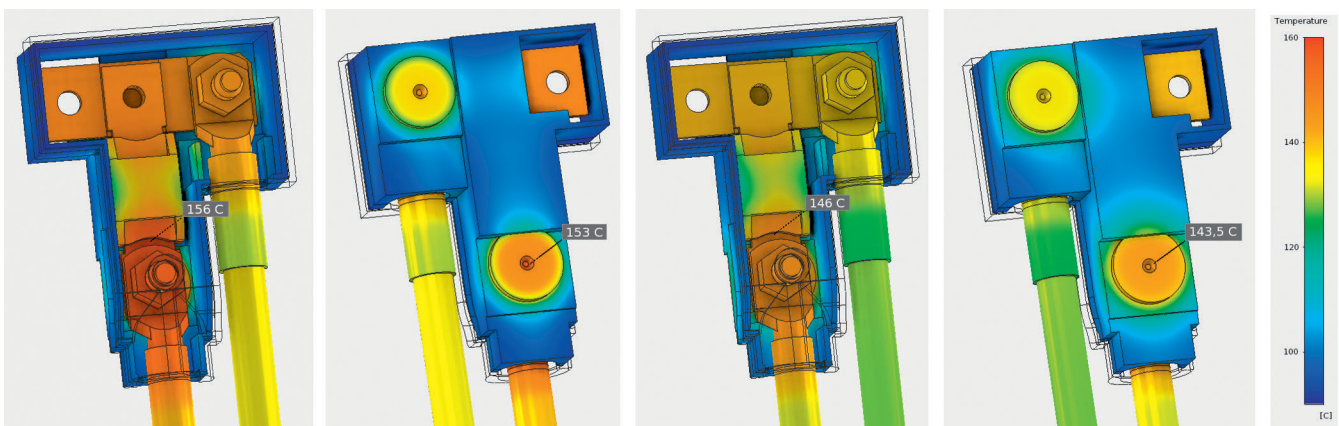


Bild 5. FEM-Simulation der Ober- und Unterseite der Vorsicherungsbox mit Standardkunststoff (links) und wärmeleitfähigem Kunststoff (rechts): Die Temperatur an den besonders betroffenen Bereichen sinkt durch den Einsatz wärmeleitfähigen Materials um 10 K © FEP

stimmen. Mögliche Ursachen für die Abweichungen erklären sich aus der Tatsache, dass nur zwei Messungen je Variante durchgeführt wurden, die Messungenauigkeit der Temperatursensoren $\pm 1,5$ K beträgt und die Simulation ohne Berücksichtigung der Anisotropie der Wärmeleitung, die aus der Fließrichtung beim Spritzen resultiert, durchgeführt wurde. Dennoch ist die Übereinstimmung ausreichend gut, um die Simulationsergebnisse als solche zu bestätigen.

Geringer Materialeinsatz führt bereits zu recht großem Effekt

Die Temperatur an der Anschlusslasche sinkt annähernd logarithmisch mit steigender Wärmeleitfähigkeit. Durch den Einsatz von Werkstoffen mit einer geringen Beimischung wärmeleitfähiger Materialien kann somit bereits ein recht großer Effekt erzielt werden. Wird die Leitfähigkeit weiter erhöht, steigt die Menge an abführbarer Wärme nur noch in geringem Maße, sodass der zusätzlich erzielbare Effekt deutlich geringer ist als zu Beginn. Auch die Granulathersteller bestätigen diese Beobachtungen.

Bild 7 zeigt die Temperaturdifferenz der leitfähigen Varianten zur Variante ohne Wärmeleitfähigkeit an den sechs Messpunkten. Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes kann am Übergang vom Bolzen zum Kunststoff mehr Wärme in den Kunststoff geleitet werden und verteilt sich dort an weniger kritische Stellen. Das ist sehr gut an den leicht erhöhten Temperaturen an den Messpunk-

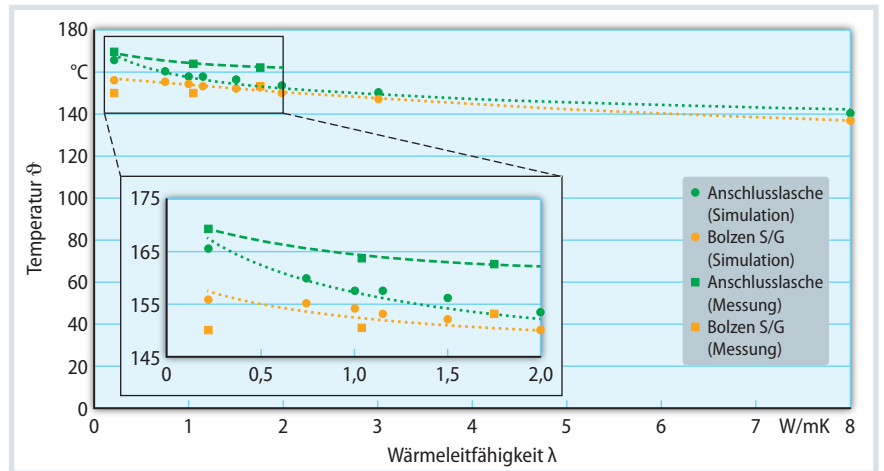


Bild 6. Die gemessenen und simulierten Daten am Gewindebolzen und der Anschlusslasche stimmen recht gut überein. Quelle: FEP; Grafik: © Hanser

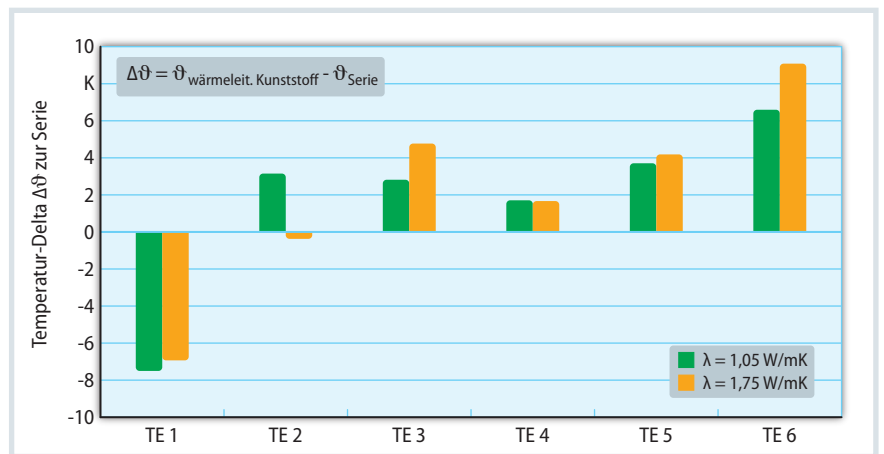


Bild 7. Durch die Verwendung von wärmeleitfähigen Kunststoffen sinkt die Temperatur am ersten Messpunkt und steigt an den restlichen an, da sich die Wärme besser im Bauteil verteilt

Quelle: FEP; Grafik: © Hanser

ten 2 bis 6 erkennbar, während am Messpunkt 1 an der Anschlusslasche die Temperatur aufgrund der besseren Ableitung sinkt.

Anhand der Kombination aus Simulation und Experiment konnte gezeigt werden, dass sich die Temperaturverhältnisse, wie sie aus dem Stromfluss durch Bauteile resultieren, mit der Finite-Elemente-Methode realistisch simulieren lassen und das Wärmemanagement mittels wärmeleitfähiger Kunststoffe in einem gewissen Rahmen erfolgreich ist. Im vorgestellten Fall der Vorsicherungsbox ließ sich dadurch am kritischen Hotspot eine Temperaturabsenkung von etwa 10 K erreichen. Gleichzeitig muss allerdings berücksichtigt werden, dass spezielles wärmeleitfähig gefülltes Kunststoffgranulat mengenabhängig leicht doppelt so teuer sein kann wie Standardgranulat. Diese Methode kann somit den Bauteilpreis leicht in

unerwünschte Höhen treiben. Durch die Verwendung einer Zweikomponententechnik lässt sich die Kostenerhöhung allerdings begrenzen. Dabei werden nur besonders betroffene Bereiche aus gefülltem Material hergestellt, während unkritische Bereiche aus Standardmaterial gefertigt werden.

Die Verwendung von wärmeleitfähigen Kunststoffen benötigt keine Geometrieänderung und erhöht auch die Bauteilkomplexität nicht, ist aber kostintensiver. Der Einsatz leitfähiger Materialien lohnt sich deshalb immer dann, wenn geometrische Anpassungen aufgrund von Rahmenbedingungen nicht durchgeführt werden können. Wärmeabfuhr mithilfe von aktiver Kühlung oder integrierten Kühlgeometrien und -körpern kann schnell aufwendig werden, weshalb im Einzelfall der beste Kompromiss zu suchen ist. ■

Die Autoren

Dr. Frank Schneider leitet den Bereich Innovation & Technik bei FEP Fahrzeugelektrik Pirna; frank.schneider@fepz.de

Dr. Stephanie Pfeifer arbeitet in der Produktentwicklung bei FEP Fahrzeugelektrik Pirna; stephanie.pfeifer@fepz.de

Olaf Eichler ist Produktentwickler bei FEP Fahrzeugelektrik Pirna; olaf.eichler@fepz.de

Service

Digitalversion

➤ Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-08