

Antreiber der Elektromobilität

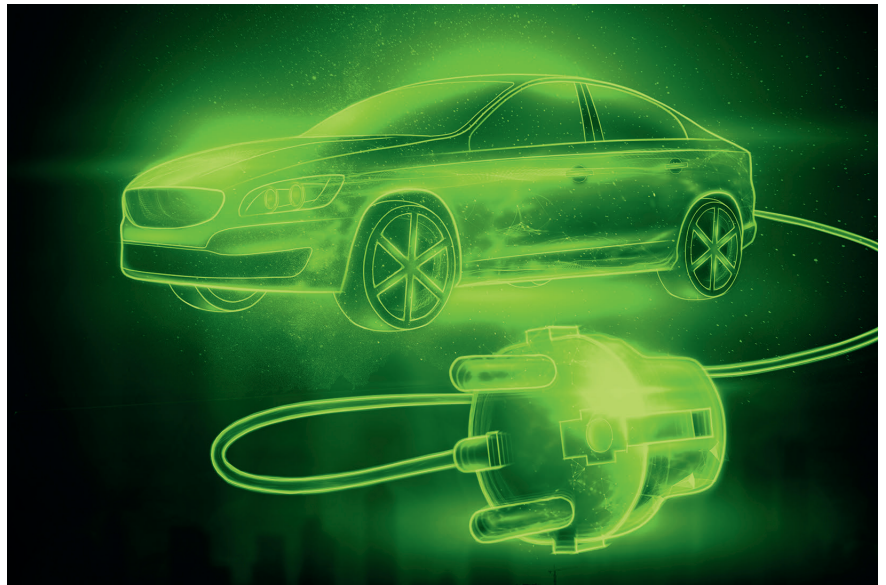
Flammschutz, Wärmebeständigkeit und Kriechstromfestigkeit in Elektrofahrzeugen

Der Wechsel vom Verbrennungs- zum Elektromotor bedeutet für die Kunststoffindustrie einige Unwägbarkeiten. Elektrische Antriebe stellen teilweise gänzlich andere Anforderungen an die Materialien. Welche das konkret sind, kristallisiert sich mit der zunehmenden Verbreitung entsprechender Fahrzeuge immer stärker heraus. Ein Überblick über die wichtigsten Änderungen.

Mit der Wende zur Elektromobilität steht die Automobilindustrie vor einem radikalen Umbruch. In der Übergangsphase diversifizieren die Hersteller den Antriebsstrang ihrer Fahrzeuge stark. Durch verbesserte Verbrennungsmotoren, den Umstieg auf alternative Kraftstoffe und die Einführung von Hybridfahrzeugen reduzieren sie die Gesamtemissionen ihrer Flotte. Gleichzeitig bauen sie Kompetenzen bei Elektromotoren auf, um ein breiteres Angebot an vollelektrischen Fahrzeugen (EVs) anbieten zu können. Auch die von manchen Herstellern entwickelten Brennstoffzellenfahrzeuge nutzen einen Elektromotor als Antrieb.

Die Elektrifizierung erfordert diverse neue Systeme und Komponenten. Das ist unabhängig davon der Fall, ob der Elektromotor durch Strom aus einem großen Batteriemodul oder durch eine Brennstoffzelle in Verbindung mit einer kleineren Batterie angetrieben wird. Hinzu kommen unter anderem Hochspannungsladegeräte, Lithium-Ionen-Akkus, Brennstoffzellen, starke Elektromotoren, Wechselrichter (Inverter) für die Umwandlung von Gleich- (DC) zu Wechselspannung (AC) und DC-DC-Umrichter (Konverter) (**Bild 1**).

Der elektrische Antriebsstrang (siehe **Kasten auf S. 35**) arbeitet üblicherweise bei hoher Spannung (HV) mit Stromstärken von mehreren Hundert Ampere (A). Die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Antriebssystems sind daher wichtiger denn je. Technische Kunststoffe für die elektrische Isolierung oder für Gehäusebauteile in diesem Umfeld müssen künftig erheblich höhere Anforderungen im Hinblick auf ihre thermische Alterungsbeständigkeit, Flammwidrigkeit und Isolierfähigkeit erfüllen. Deutlich wichtiger werden Flammschutzmittel und die Durchschlag- und Kriechstromfestigkeit (Comparative



Nicht nur der Motor und die Energiebereitstellung verändern sich beim Übergang von Verbrennungs- auf Elektrofahrzeuge. Auch bei Materialien gilt es, neue Wege zu gehen

(© Adobe Stock, Aliaksandr Marko)

Tracking Index, CTI). Ohne die Berücksichtigung dieser Kriterien bestehen erhebliche Sicherheitsrisiken, und die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge wird deutlich sinken. Werkstoffhersteller arbeiten deshalb gemeinsam mit Zulieferern und OEMs an Materialien, um den Anforderungen von Elektrofahrzeugen gerecht zu werden und deren Leistung zu erhöhen.

Ein gutes Beispiel für die veränderten Anforderungen sind Flammschutzmittel für Kunststoffe. Sie sind im Automobilbereich an sich unerwünscht, da sie die mechanischen Eigenschaften und die Fließfähigkeit der Materialien beeinträchtigen und höheres Gewicht und Mehrkosten verursachen. Allerdings sind bei allen Komponenten im elektrischen Hochspannungsstrang – vom Ladestecker bis zum E-Motor – stark erhöhte Anforderungen an die Flammwidrigkeit zu erwarten.

Das beruht einerseits auf Eigeninitiative der OEMs und Zulieferer, und andererseits ist künftig auch von schärferen Vorschriften der Aufsichtsbehörden auszugehen.

Flammschutz auf einmal gewünscht

Beim Flammschutz von Verkehrsmitteln geht es vorrangig darum, die verfügbare Fluchtzeit im Brandfall zu verlängern. Wenig überraschend müssen deshalb in Flugzeugen aufgrund der schwierigen Fluchtbedingungen selbst Sitze und Teppichböden sehr hohe Brandschutzkriterien erfüllen. Aus einem Automobil können die Fahrgäste deutlich leichter entkommen. Deshalb ist es bei Fahrzeugen heute noch relativ einfach, die vorgeschriebenen Entflammbarkeitsprüfungen zu bestehen. Nur eine begrenzte Anzahl von Anwendungen bzw. Herstellern ver-

langt derzeit bei Kunststoffen für elektrische Isolierungen im Fahrzeug eine zertifizierte V0-Einstufung der Flammwidrigkeit nach der Norm UL94.

Mit dem Übergang auf die HV-basierte Elektrifizierung mit unbeaufsichtigter Batterieaufladung dürfte sich die Lage jedoch fundamental verändern. Aufgrund der hohen Ströme und großen Belastung während des Ladens besteht ein erhöhtes Brandrisiko. Außerdem bringt das HV-System generell Gefahren wie potenzielle Kurzschlüsse oder Funkenbildung mit sich. Es gibt zudem mehrere Berichte über schwere Brände, die von eingebauten Lithium-Ionen-Batterien selbst bei geparkten und ausgeschalteten Fahrzeugen verursacht wurden. EVs ohne dezidierten Flammenschutz stellen ein Sicherheitsrisiko dar. Konkret ist deshalb mit höheren Anforderungen an die Flammwidrigkeit (UL94-V0) und die Glühdrahtentzündungstemperatur (GWIT) zu rechnen.

Daneben ist für Fahrzeugdesigner weiterhin der Leichtbau von großer Bedeutung, wenn auch aus grundlegend unterschiedlichen Erwägungen bei den verschiedenen Antriebsarten. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren trägt jedes Gramm Gewichtseinsparung direkt zur Abgasreduzierung bei und verringert somit potenzielle Sanktionen gemäß der jüngsten CO₂-Vorgaben der EU. Bei Elektromotoren müssen die Designer hingegen das Zusatzgewicht des Akkus kompensieren. Dieses beläuft sich schnell auf rund 800 kg. Um beim Fahren die Trägheit eines tonnenschweren Fahrzeugs zu ver-

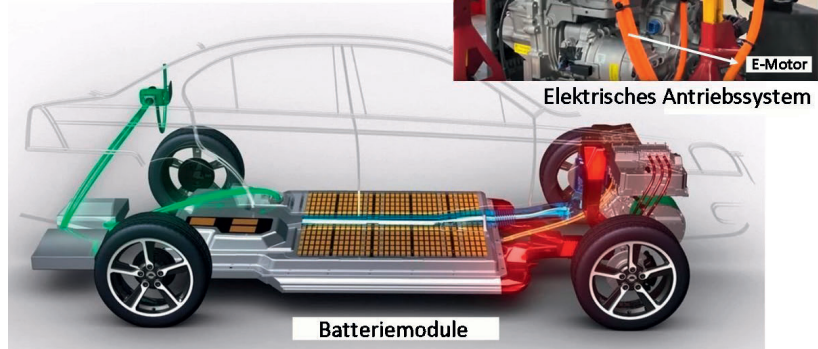


Bild 1. Kernkomponenten des HV-Antriebssystems des Chevrolet Bolt (© DSM)

meiden, sind mehr und bessere Leichtbaukonstruktionen erforderlich. Bei Anwendungen, in denen bisher Metalle zum Einsatz kamen, wird das zum verstärkten Einsatz von Kunststoffen führen. Beispiele sind Teile mit erhöhter Steifigkeit bei Temperaturen von 150 bis 180 °C oder Gehäuse für elektronische Steuergeräte.

Halogenide in Zukunft vermeiden

Um die Anforderungen der Elektromobilität zu erfüllen, hat der Werkstoffhersteller DSM, Heerlen/Niederlande, Materialien speziell für die HV-Systeme hybrider und vollelektrischer Fahrzeuge entwickelt (**Bild 2**). Zum Einsatz kommen aliphatische Polyamiden (PA) 6, 46, 66, 666 und 410, aro-

matische PA 4T (Polyphthalamid, PPA), Polyphenylsulfid (PPS), Polybutylenterephthalat (PBT), Polyethylenterephthalat (PET) und thermoplastische Copolyetherester (TPC). Sehr gut geeignet für den elektrischen Antriebsstrang sind PA 6, PA 66, PA 4T, PBT und PPS. »

Die Autoren

Dipl.-Ing. Yu Bin arbeitet seit 2014 als Advanced Engineering Manager Electrical Vehicles bei DSM Engineering Plastics in Shanghai.

Dr. Tamim P. Sidiki beschäftigt sich als Global Marketing Director Automotive & Consumer Electronics bei DSM Engineering Plastics sowohl mit den Fortschritten im Elektronik- als auch im Automobilbereich. Er arbeitet seit 2007 für das niederländische Unternehmen.

Dr. David Zhu ist seit 2013 als Wissenschaffler bei DSM in Shanghai angestellt. Er arbeitet unter anderem im Bereich Antennen, Solarzellen, 5G und dem elektrischen Antriebsstrang von Fahrzeugen.

Service

Digitalversion

» Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2020-03

English Version

» Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at www.kunststoffe-international.com

Bild 2. Auch für Elektrofahrzeuge eignet sich PA sehr gut. PA 6 und PA 66 kommen etwa in HV-Steckern zum Einsatz, PA 4T bei HV-Stromschienen und Schaltschützen

(© DSM)



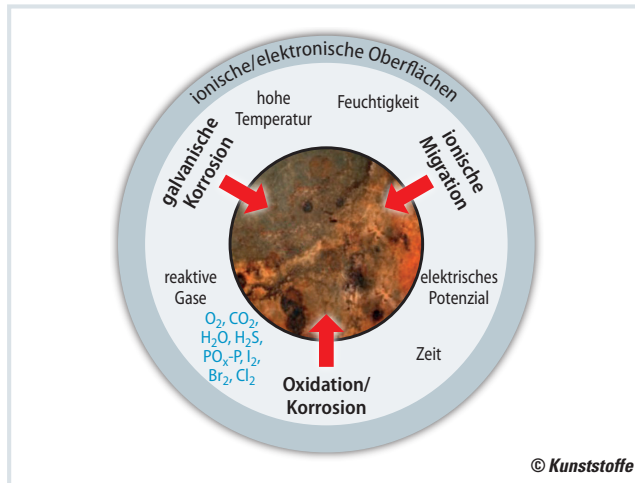
© DSM



Bild: DSM



Bild 3. Die Ausgasung von Wärmestabilisatoren oder die Migration anderer ionischer Verunreinigungen im Kunststoff kann zur Korrosion von elektronischen Bauteilen führen (Quelle: DSM)



Um eine gute Wärmebeständigkeit zu erreichen, werden häufig Halogenide wie kupferiodid-basierte (CuI) Wärmestabilisatoren eincompoundiert. Das hält die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffteile selbst bei erhöhten Dauertemperaturen auf hohem Niveau. Wärme und Feuchtigkeit bewirken aber eine gewisse Hydrolyse des Kunststoffs, bei der Iodid (I_2) ausgast. Das kann zur Elektrokorrosion von Metallkontakten und Kontaktstiften führen. Betroffen sind nicht nur Metallbauteile mit direktem Kontakt zum wärmestabilisierten Kunststoff, son-

dern auch solche, die sich nur in der Nähe befinden (**Bild 3**).

Aufgrund der ionischen Natur des I_2 kann eine konstante Vorspannung die Migration dieser Ionen und somit die Elektrokorrosion deutlich beschleunigen. Das reduziert die Leitfähigkeit von Komponenten wie Stromschienen und führt zu erhöhter Wärmeentwicklung bis hin zum Versagen der Bauteile. Es kann aber auch die Strom-Spannungs-Charakteristik von Komponenten wie Integrierten Schaltungen (ICs) oder Transistoren und damit deren Schaltprofile verändern.

Als langjähriger Materialzulieferer der Elektronik- und Automobilindustrie hat DSM verschiedene technische Kunststoffe entwickelt, die gezielt auf kritische Elektroanwendungen ausgerichtet sind (**Tabelle**). Frei von Metallen und anorganischen Wärmestabilisatoren wie CuI sichern sie die Zuverlässigkeit von Fahrzeugbauteilen wie Sensoren, Steckverbindern, ADAS oder Elektronikgehäusen. In enger Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH, Stuttgart, hat DSM außerdem einen Prüfstand entwickelt, um die Auswirkung der Elektrokorrosion in unterschiedlichen Anwendungsfällen mit und ohne Kontakt zu Metallen zu testen.

Um das Problem der Elektrokorrosion durch Additive weiter zu minimieren, hat DSM außerdem das PPA ForTii Ace eingeführt. Es verfügt über die höchste Glasübergangstemperatur aller PA (Tg 160 °C). Die hohe Tg erübrigt bei Anwendungen mit Dauerbetriebstemperaturen von 150 °C oder höher den Einsatz von Wärmestabilisatoren im Compound, ohne auf die mechanischen Eigenschaften eines PA verzichten zu müssen.

ID.3 erreicht 100 USD pro kWh

Auch die Bemühungen der Automobilhersteller, die Reichweite der Fahrzeuge zu erhöhen, haben Auswirkungen auf die verwendeten Kunststoffe. Bisher sind die Akzeptanz und der Absatz von Elektrofahrzeugen noch gering. Das liegt vor allem an dem hohen Preis, der ungenügenden Ladeinfrastruktur und der zu geringen Reichweite. Kostenparität zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden EVs »

	Akulon 6	Akulon 6.6	Arnite T	Arnite A	Stanyl	Ecopaxx	Xytron	ForTii
UL94-V0, halogenfrei	XG-FKGS6 K225-K5	SG-FKGS6			HFX-Portfolio		G3080R G4080R	F11 TX1 T11 E11
UL94-V0, halogeniert	K-FKGS6/B		TV4 261 SF TV3 260 S XF		TE 250F6 TE 250F3 TE 250F8 TE 351 46HF5040/50			
UL94-HB	K224 G3-G7 K-FKG3 K-FKG6 K-FKG8	S223-KG5	TV 230 TV 240 TV 260 TV 261 TV 261/G TZ6 280 TV4 260 HS HR T08 200	AV2 370 XL AV2 370/B	TE 200F6 TE 200F8 TE 341	Q-KG5 Q-KG6 Q-KS		KX12 K11 JTX2 JTX8

Tabelle. Compounds von DSM ohne kritische Halogenidsalze oder roten Phosphor: Beide Zusätze können zu Elektrokorrosion führen (Quelle: DSM)

Bild 4. Um die Ladeleistung zu steigern, ist es meist sinnvoller die Spannung anstatt der Stromstärke zu erhöhen (Quelle: DSM)

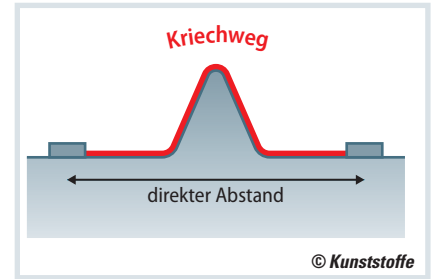
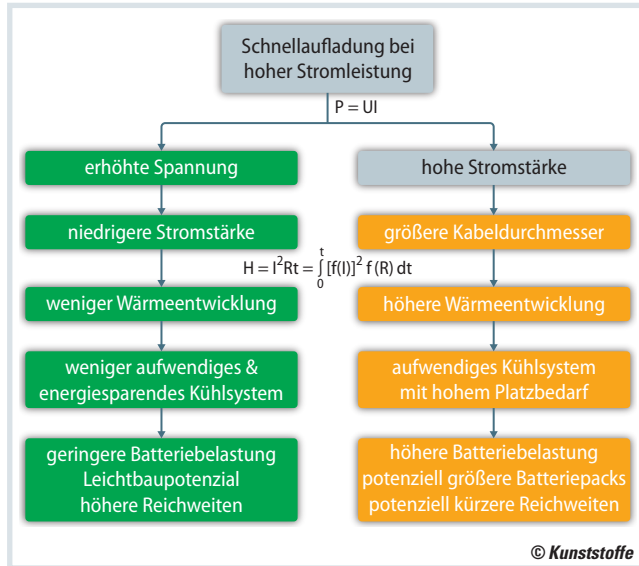


Bild 5. Der Kriechweg wird oft bewusst länger ausgelegt, um einen Stromfluss zwischen zwei Kontakten zu verhindern (Quelle: DSM)

erst bieten, wenn die Batteriekosten auf 100 USD pro kWh fallen. Bei wachsender Nachfrage und Fortschritten in der Batterieleistung dürften die Kosten weiter sinken. Fortschritte in diese Richtung verkündete im letzten Jahr beispielsweise die Volkswagen AG, Wolfsburg, auf der Automobilmesse IAA. Anlässlich der Vorstel-

lung seines Elektrofahrzeugs ID.3 gab der Konzern bekannt, dass er dank der Verträge mit asiatischen Batterieherstellern ein Kostenniveau von 100 USD pro kWh erreicht hätte. Unklar ist noch, ob sich das auf das gesamte Batteriemodul oder lediglich auf die Zellen bezieht. Angesichts der verstärkten behördlichen Anstren-

gungen zur Reduzierung der Feinstaubbelastung in Städten ist außerdem mit einem Ausbau der Ladeinfrastruktur zu rechnen.

Kriechstrom bei 1000 V verhindern

Eines der Schwerpunktthemen für Fahrzeugdesigner ist es daher, die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Das kann auf vier Arten erfolgen:

- Steigern der Batteriekapazität durch weitere Zellen oder neue Batterietechnologien;
- Einbau von DC/AC-Invertern und DC/DC-Konvertern mit höherem Wirkungsgrad;
- Einsatz effizienterer Wechselstrommotoren mit noch weniger Einzelteilen;
- Steigern der Batterieleistung durch höhere Gleichspannung.

Mildhybridfahrzeuge besitzen meistens eine Batterie mit 48 V Niederspannung. Sie fahren nicht rein elektrisch, sondern der Elektromotor unterstützt lediglich den Verbrennungsmotor. Alle Vollhybrid- und verfügbaren batterieelektrischen Fahrzeuge arbeiten hingegen mit Spannungen von 200 bis 400 V. Aktuell gibt es einen Trend zur Steigerung der Batteriespannung von 400 auf 800 V. Auch die Ladeinfrastruktur wird derzeit in Europa mit einem Netz sehr schneller Ladesäulen mit solchen hohen Spannungen ausgebaut. Die Ionity GmbH, München, ein Joint Venture von BMW, Daimler, Ford, VW, Audi und Porsche, baut etwa derzeit ein europaweites Netz von HV-Schnellladestationen (für bis zu 800 V) auf. Eines der ersten Fahrzeuge im Markt, die diese HV-Technologie nutzen, ist der neue Porsche Taycan.

Verschiedene Branchenakteure arbeiten außerdem daran, das Spannungsniveau noch weiter auf 1000 V und höher zu steigern. Ein HV-Ladesystem für »

Bild 6. Vergleich der Kriechstromfestigkeit unterschiedlicher Polymerklassen: Die Farben repräsentieren die jeweilige mechanische Festigkeit (Quelle: DSM)

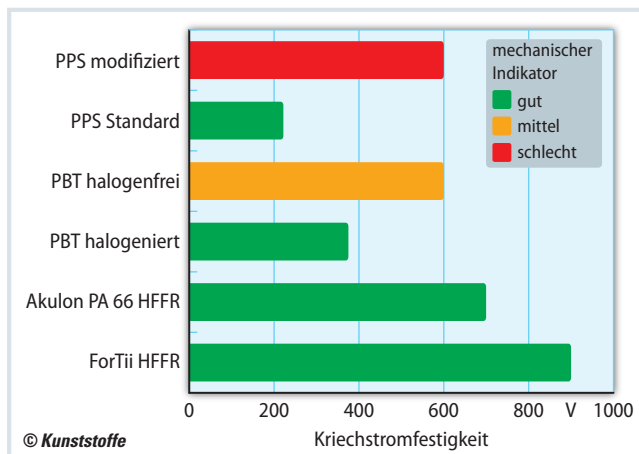
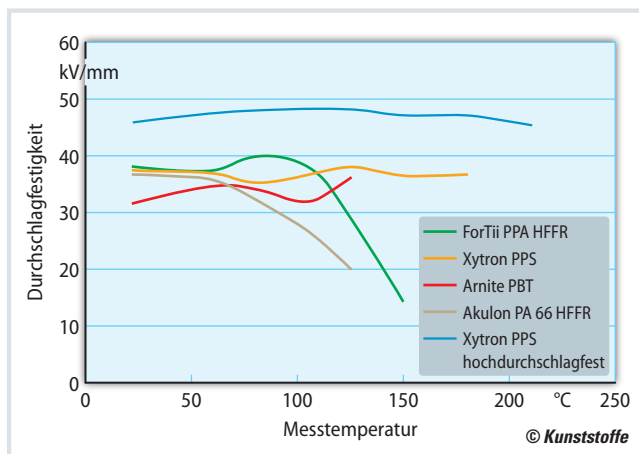


Bild 7. Elektrische Durchschlagfestigkeit vor Alterung bei erhöhten Temperaturen: Bei den meisten Polymeren nimmt diese bei steigenden Temperaturen ab (Quelle: DSM)



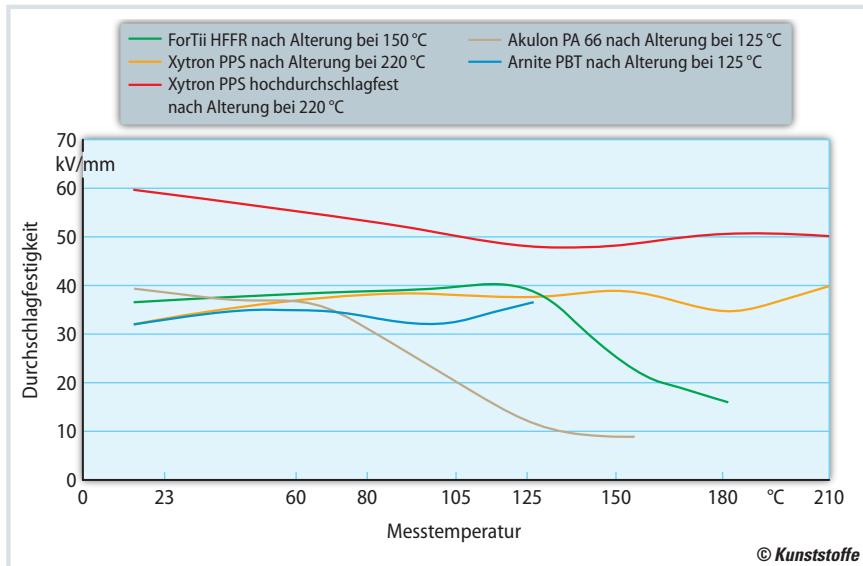


Bild 8. Durchschlagfestigkeit nach Alterung bei erhöhten Temperaturen: Die Kurven der Materialien ähneln sich vor und nach der Alterung. Durch die Alterung nimmt die Durchschlagfestigkeit wie zu erwarten ab (Quelle: DSM)

1000 V kann die Ladezeit für eine Reichweite von 1600 km auf ca. eine Stunde reduzieren. Der Fahrer hat somit nach 15 Minuten ausreichend Strom für 400 km zur Verfügung. Diese Ladezeiten gelten als akzeptabel und sind bei längeren Strecken eine große Erleichterung.

Um eine höhere elektrische Leistung bei geringer Verlustleistung zu erreichen, wird bevorzugt die Spannung und nicht die Stromstärke erhöht, da elektrische Leitungsverluste (P) mit dem Quadrat der Stromstärke zunehmen (**Bild 4**). Der elektrische Antriebsstrang erfordert hochspannungsfähige Bauteile, die genügend Strom für den Elektromotor liefern und möglichst kurze Batterieladezeiten ermöglichen. Bei hohen Spannungen müs-

sen die Ingenieure besondere Sorgfalt auf die Auslegung von Parametern wie Durchschlagfestigkeit, Kriechweg und Kriechstromfestigkeit legen.

Zu den Hauptanforderungen für die erhöhte Sicherheit und Zuverlässigkeit elektrischer Systeme zählt das Vermeiden der Kriechstrombildung zwischen Kontaktstiften. Kriechströme entstehen, wenn die Oberfläche des Isoliermaterials verkohlt und dadurch leitfähig wird. Verantwortlich dafür ist die Kontamination der Oberfläche durch Ionen, die in Feuchtigkeit, Staub oder anderen Partikeln enthalten sind und sich im Lauf der Zeit an der Oberfläche ablagern.

Um dies zu vermeiden, hat der Designer prinzipiell drei Optionen:

- Verlängern des Kriechwegs (des effektiven Oberflächenabstands des Kunststoffes) zwischen den beiden Kontaktstiften durch Hinzufügen einer Rippe oder Vertiefung
- Schutz der isolierenden Kunststoffoberfläche vor Ablagerungen und Feuchtigkeit durch Kapselung des gesamten Systems
- Einsatz eines isolierenden Kunststoffes mit einem spezifisch höheren CTI

Der Kriechweg entspricht dem effektiven Oberflächenabstand zwischen den Kontakten (**Bild 5**). Bei gleichbleibendem direkten Abstand der Kontakte muss der Kriechweg verlängert werden, wenn sich bei höheren Spannungen kein Kriechstrom zwischen den beiden Kontakten bilden soll. Falls Designer gezwungen sind, zusätzliche elektronische Funktionen in dem oft bereits begrenzten Baubereich unterzubringen, z.B. eine Glykolkühlung, ist es kaum möglich, den Kriechweg zu verlängern. Vor allem nicht, ohne den direkten Abstand zwischen den Kontakten zu vergrößern. Eine Kapselung von Steckern und Buchsen gegen Kontamination von außen ist auch nicht immer machbar. In diesen Fällen kann der Designer auf Isolierkunststoffe mit höherem CTI zurückgreifen (**Bild 6**). Dadurch lässt sich das Risiko der Kriechstrombildung erheblich reduzieren.

Ohne Halogene und rotem Phosphor

DSM bietet halogenfreie, flammwidrige Kunststoffe mit der dafür erforderlichen elektrischen Leistungsfähigkeit an und hat als einziges Unternehmen weltweit Compounds für Hochspannungsanwendungen mit einem zertifizierten CTI von mehr als 700 V (Akulon PA 66) und 850 V (ForTii PAA) eingeführt. Sie sind metall- und halogenfrei und enthalten weder roten Phosphor noch auf Halogeniden basierende Wärmestabilisatoren, um Elektrokorrosion der Metalle in den Baugruppen zu vermeiden. Die Compounds sind auch in Orange verfügbar.

Um die maximale Sicherheit und Zuverlässigkeit nicht nur während der technisch kritischen Anwendungsprüfung auf Komponentenebene, sondern auch während der gesamten, vom OEM spezifizierten Lebensdauer der Teile zu gewährleisten, hat DSM die Isoliereigenschaften der Kunststoffe bei Raumtemperatur und nach Langzeitalterung bei erhöhten Tempera-

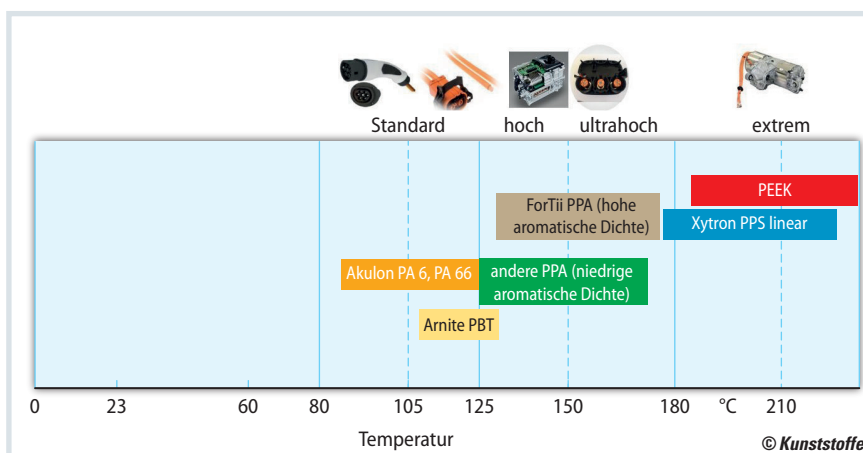


Bild 9. DSM HV-Materialportfolio für erhöhte Betriebstemperaturen: Je nach Temperaturbereich eignen sich unterschiedliche Werkstoffe (Quelle: DSM)

turen ausführlich untersucht. Die Daten bieten dem Ingenieur eine gute Referenz, um die langfristige Leistungsfähigkeit von Anwendungen im elektrischen Antriebsstrang unter tatsächlichen Betriebsbedingungen abzuschätzen.

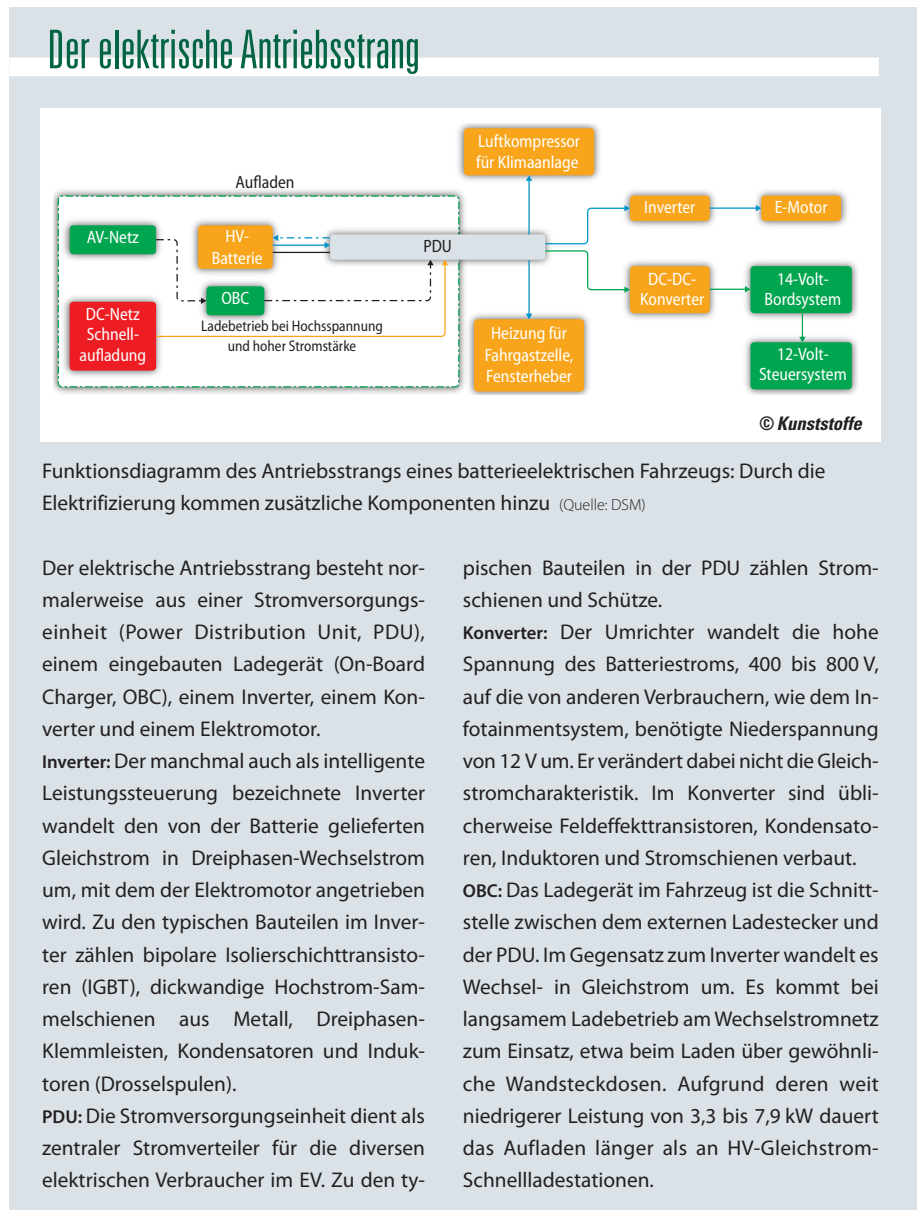
Gründe für elektrischen Durchschlag

Bei polymeren Isolierwerkstoffen können im Wesentlichen drei elektrische Durchschlagmechanismen auftreten:

Der **intrinsische oder materialspezifische Durchschlag** ist abhängig von der Präsenz freier migrationsfähiger Elektronen. Unter der Wirkung eines elektrischen Feldes werden diese Elektronen beschleunigt und neigen dazu, aus dem Käfig der Molekularstruktur auszubrechen. Ab einer gewissen Feldstärke werden sie dann von den Molekülen freigesetzt. Beschleunigt durch das elektrische Feld kollidieren die Elektronen miteinander, bis es schließlich zu einem Avalanche-Effekt und damit elektrischem Durchschlag kommt.

Der **thermische Durchschlag** ist abhängig von der Tg des Kunststoffcompounds und der Polarität der Molekularstruktur. Er ist der Hauptversagensmechanismus bei Kunststoffcompounds. Steigt die Temperatur über Tg, hat das zwei Auswirkungen: Zum einen werden die Polymermoleküle beweglich, reiben aneinander und erzeugen einen Energie- bzw. dielektrischen Verlust. Als Folge davon steigt die Temperatur des Kunststoffs weiter an. Zum anderen nimmt der Volumenwiderstand des Polymers und damit die molekulare Bindung der Elektronen ab, die dazu tendieren, vom Valenz- in das Leitungsband zu wechseln. Dadurch fließt in einem Hochspannungsfeld eine höhere Strommenge durch das Polymer. Das kann die Temperatur des Polymers drastisch erhöhen. **Bild 7** zeigt den Zusammenhang zwischen abnehmender elektrischer Durchschlagfestigkeit und steigender Temperatur bei Kunststoffen vor der Alterung. Für viele Polymere gilt, dass bei höheren Temperaturen auch die elektrische Durchschlagfestigkeit abnimmt.

Ein **Entladungsdurchschlag** kann bei Fehlstellen in einem Kunststoffteil auftreten, verursacht durch Poren, Kontamination oder Fremdkörper. Normalerweise sind diese Fehlstellen dauerhaft und weisen eine mittlere oder geringe Durchschlagfestigkeit auf. In einem Hochspannungsfeld kommt es bei derart inhomogenen Strukturen zur Teilentladung, so dass Durchschlag auftreten kann. In **Bild 8** ist die elektrische Durchschlagfestigkeit unterschiedlicher Polymere nach Alterung zu sehen.



Der elektrische Antriebsstrang besteht normalerweise aus einer Stromversorgungseinheit (Power Distribution Unit, PDU), einem eingebauten Ladegerät (On-Board Charger, OBC), einem Inverter, einem Konverter und einem Elektromotor.

Inverter: Der manchmal auch als intelligente Leistungssteuerung bezeichnete Inverter wandelt den von der Batterie gelieferten Gleichstrom in Dreiphasen-Wechselstrom um, mit dem der Elektromotor angetrieben wird. Zu den typischen Bauteilen im Inverter zählen bipolare Isolierschichttransistoren (IGBT), dickwandige Hochstrom-Sammelschienen aus Metall, Dreiphasen-Klemmleisten, Kondensatoren und Induktoren (Drosselspulen).

PDU: Die Stromversorgungseinheit dient als zentraler Stromverteiler für die diversen elektrischen Verbraucher im EV. Zu den ty-

pischen Bauteilen in der PDU zählen Stromschienen und Schütze.

Konverter: Der Umrichter wandelt die hohe Spannung des Batteriestroms, 400 bis 800 V, auf die von anderen Verbrauchern, wie dem Infotainmentsystem, benötigte Niederspannung von 12 V um. Er verändert dabei nicht die Gleichstromcharakteristik. Im Konverter sind üblicherweise Feldeffekttransistoren, Kondensatoren, Induktoren und Stromschienen verbaut.

OBC: Das Ladegerät im Fahrzeug ist die Schnittstelle zwischen dem externen Ladestecker und der PDU. Im Gegensatz zum Inverter wandelt es Wechsel- in Gleichstrom um. Es kommt bei langsamem Ladebetrieb am Wechselstromnetz zum Einsatz, etwa beim Laden über gewöhnliche Wandsteckdosen. Aufgrund deren weit niedrigerer Leistung von 3,3 bis 7,9 kW dauert das Aufladen länger als an HV-Gleichstrom-Schnellladestationen.

genen Strukturen zur Teilentladung, so dass Durchschlag auftreten kann. In **Bild 8** ist die elektrische Durchschlagfestigkeit unterschiedlicher Polymere nach Alterung zu sehen.

Elektrische Eigenschaften, wie CTI, Durchschlagfestigkeit und Volumenwiderstand, sind wichtige Parameter bei der Wahl des richtigen Isolierwerkstoffs für Hochspannungsbaueteile. **Bild 9** bietet einen Überblick über Materialien für Elektroanwendungen im Antriebsstrang. Für Materialien, die im Hochspannungstrakt eingesetzt werden sollen, empfehlen sich eine Untergrenze der elektrischen Durchschlagfestigkeit von 10 kV/mm und ein damit verbundener Volumenwiderstand von $10^8 \Omega \text{cm}$ bei der jeweiligen Betriebstemperatur der Anwendung.

Aufgrund ihrer hohen Tg und aromatischen Anteile bieten halogenfreie Fortii-PPA-Compounds eine ausreichende elektrische Sicherheitsmarge selbst bei erhöhten Dauergebrauchstemperaturen von 160 °C. Das Xytron PPS zeigt wegen seiner linearen und symmetrischen Molekularstruktur in Kombination mit hoher aromatischer Dichte eine weit geringere Polarität als die meisten anderen Polymere. Das macht es zu einem idealen Material für Komponenten, die unter rauen Einsatzbedingungen funktionieren und Spitzenbetriebstemperaturen von über 200 °C standhalten müssen. Es wird daher oft in Umgebungen verwendet, in denen Anwendungen starken Chemikalien, Ölen oder anderen aggressiven Stoffen ausgesetzt sein können. ■