

Wie gut eignen sich Polyamid und Polybutylenterephthalat für Hochvoltanwendungen?

## Gegen den Strom

Vor allem die Elektromobilität, aber auch viele andere Elektroanwendungen, stellen verschärfte Anforderungen an die elektrischen Eigenschaften von Thermoplasten. Das wirft die Frage auf, ob die in diesem Bereich üblicherweise eingesetzten Polymere diese noch erfüllen können. Wie gut Polyamid und Polybutylenterephthalat für den Einsatz bei höheren Spannungen und Temperaturen geeignet sind, hat der Kunststoffhersteller Lanxess untersucht.

Thermoplastische Kunststoffe sind als elektrische Isolatoren etablierte Konstruktionsmaterialien in der Elektrotechnik und Elektronik (E&E). Wesentliche Gründe dafür sind, dass sich mit ihnen gängige Anforderungen an die elektrische und brandschutztechnische Bauteilsicherheit erfüllen lassen und dabei die Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Beispielsweise zeigen sie – oft über einen breiten Temperaturbereich – gute elektrische und mechanische Eigenschaften. Ihre thermische Dauerstabilität ist für sehr viele Anwendungen ausreichend hoch. Ausgerüstet mit Flammschutzadditiven bieten sie eine gute Flammwidrigkeit. Die Fließfähigkeit ihrer Schmelze und ihr Verarbeitungsverhalten ermöglichen es, Bauteile per Spritzgießen oder Extrusion wirtschaftlich in Großserie zu produzieren.

Insbesondere Compounds auf Basis von Polyamid 6 (PA 6), PA 66 sowie Polybutylenterephthalat (PBT) sind schon seit Jahrzehnten im E&E-Bereich im Einsatz. Typische Anwendungen sind etwa Steckverbinder (Bild 1), Elektronikgehäuse, Leitungsschutzschalter und Reihenklemmen. Beide Werkstofffamilien sind bei Raumtemperatur

gute Isolatoren ( $10^{15}$  bzw.  $10^{16} \Omega \text{cm}$ ) und zeichnen sich durch hohe elektrische Durchschlag- und Kriechstromfestigkeiten aus. Die elektrischen Eigenschaften von PA 6 und PA 66 sind temperatur- und feuchteabhängig, was für eine Vielzahl von Anwendungen aber nur von geringer Relevanz ist. Die elektrischen Eigenschaften von PBT bleiben hingegen über einen weiten Temperaturbereich nahezu konstant. Auch nimmt PBT im Gegensatz zu PA kaum Feuchtigkeit aus der Umgebung auf. PA und insbesondere PBT verfügen über eine sehr gute Dauertemperaturbeständigkeit ihrer elektrischen Eigenschaften.

### Höhere Anforderungen vor allem in der Elektromobilität

Beide Thermoplastklassen müssen sich jedoch in letzter Zeit schärferen und teilweise auch neuen Herausforderungen stellen. Das gilt insbesondere für den Einsatz in der Elektromobilität einschließlich der damit verbundenen Ladeinfrastruktur. In diesem Bereich sind die Bauteile bei höheren Temperaturen sehr starken Strömen und hohen Spannungen ausgesetzt. Sie müssen auch unter diesen Bedingungen elektrisch isolierend bleiben und dürfen

keine Kriechstrombildung zulassen. Hinzu kommt, dass in der Elektromobilität – wie auch im klassischen E&E-Bereich, in der Unterhaltungselektronik und bei Haushaltsgeräten – der Trend zu miniaturisierten Baugruppen mit gleicher oder sogar höherer Leistung anhält. Eine Folge davon ist, dass die Bauteile stärker wärmebelastet sind und das Risiko von Defekten durch Kriechströme oder elektrischen Durchschlag steigt.

Lanxess hat diese neuen Anforderungen zum Anlass genommen, um an Compounds seiner Produktfamilien Durethan (umfasst PA 6 und PA 66) und Pocan (PBT) zu untersuchen, wie wichtige elektrische Eigenschaften – wie der Durchgangswiderstand oder die Durchschlagfestigkeit – von Temperatur, Feuchtegehalt und der Wanddicke abhängen. Dazu wurden unverstärkte und verstärkte Compounds mit und ohne Flammschutzpaket betrachtet. Untersucht wurde zudem, welche Compounds der Produktfamilien die höchste Isolierstoffklasse (CTI 600) erreichen. Weiterhin wurde die Kriechstromfestigkeit nach Temperatur- und Klimaalterung bestimmt. Die Untersuchungen beschäftigten sich außerdem mit der Frage, wie sich Bauteile etwa in Hochvoltssystemen von Elektrofahrzeugen, die häufig Spannungen von über 600 V ausgesetzt sind, mit Hilfe der in der Norm IEC



© Lanxess



**Bild 1.** Hochvoltsteckverbinder sind eine typische Anwendung von PA-6-, PA-66- und PBT-Compounds. © Lanxess

60664-1 definierten Dimensionierungsleitlinien kriechstromfest auslegen lassen. Insgesamt zielten die Analysen darauf ab, Kunden Materialempfehlungen und Unterstützung beim Auslegen besonders belasteter elektronischer Bauteile geben zu können.

### Die Temperatur beeinflusst den Durchgangswiderstand

Die Untersuchungen zum Durchgangswiderstand der Compounds erfolgten nach IEC 62631-3-1 an spritzfrischen Probekörpern mit einer Dicke von 1 mm. Der Durchgangswiderstand ist definiert als der Quotient aus angelegter elektrischer Spannung und gemessener Stromstärke zwischen zwei Elektroden bezie-

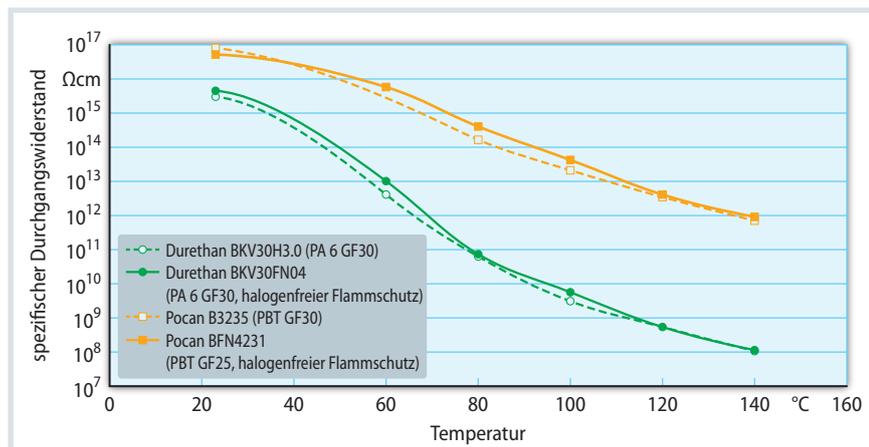
hungsweise stromführenden Teilen. Die materialspezifische Größe ist der spezifische Durchgangswiderstand  $\rho$  ( $\Omega\text{cm}$ ), der dem Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit entspricht und zur Einteilung von Werkstoffen in die Kategorien Isolatoren, Halbleiter und Leiter dient.

Die Tests zeigen, dass der spezifische Durchgangswiderstand der Compounds mit steigender Temperatur abnimmt, wobei dieser Effekt bei PBT deutlich schwächer ausgeprägt ist (**Bild 2**). Zwischen nicht flammgeschützten Compounds und solchen mit halogenfreiem Flammenschutzpaket treten dabei keine signifikanten Unterschiede auf. Compounds auf PA-6- und PA-66-Basis erreichen auch bei 140 °C noch einen spezifische Durchgangswiderstand von

$10^8 \Omega\text{cm}$ . Sie erfüllen damit bis zu dieser Temperatur gängige Anforderungen, die bei der Verwendung in Hochvoltssystemen an Kunststoffe gestellt werden. Der spezifische Durchgangswiderstand von PBT liegt bei dieser Temperatur deutlich höher.

### Ist die hohe Feuchtaufnahme von PA ein Problem?

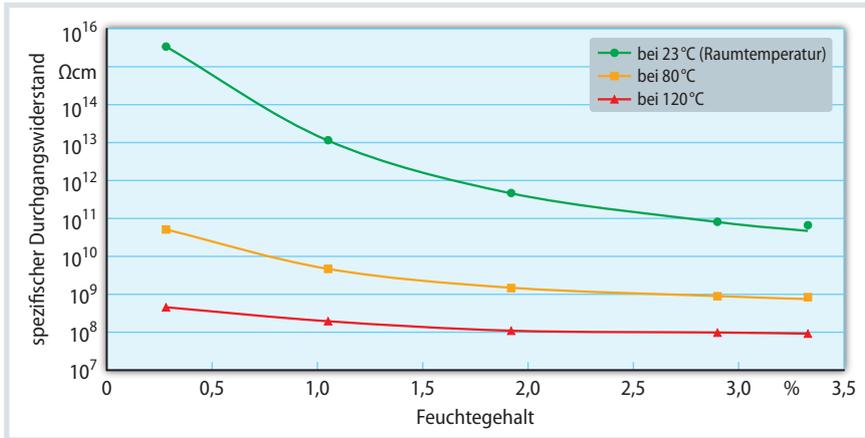
Ein steigender Feuchtegehalt lässt den spezifischen Durchgangswiderstand von PA-6- und PA-66-Compounds sinken. Ungefüllte wie glasfaserverstärkte Produkte mit und ohne Flammenschutz verhalten sich dabei sehr ähnlich. Bei Raumtemperatur ist eine deutliche Abnahme des spezifischen Durchgangswiderstands erkennbar (**Bild 3**). Er pendelt sich jedoch bei Werten ein, die für die meisten Anwendungen unkritisch sind. Bei höheren Temperaturen ist die Abnahme relativ gesehen zwar weniger stark ausgeprägt, die Werte liegen allerdings insgesamt auf niedrigerem Niveau. Der Mindestdurchgangswiderstand von  $10^8 \Omega\text{cm}$ , der für Hochvoltanwendungen empfohlen wird, könnte dadurch unterschritten werden. In diesem Fall ist keine ausreichende Isolationswirkung des Materials mehr gegeben. Da es bei solch hohen Temperaturen aber immer zu einer Rücktrocknung von hygroskopischen Materialien kommt, tritt das in der Praxis nur selten und unter extrem ungünstigen Bedingungen auf. Der spezifische Durchgangswiderstand von PA-66-Compounds lässt mit steigendem Feuchtegehalt im Vergleich zu den PA-6-Pendants weniger stark nach – bei 23 °C etwa um eine Zehnerpotenz.



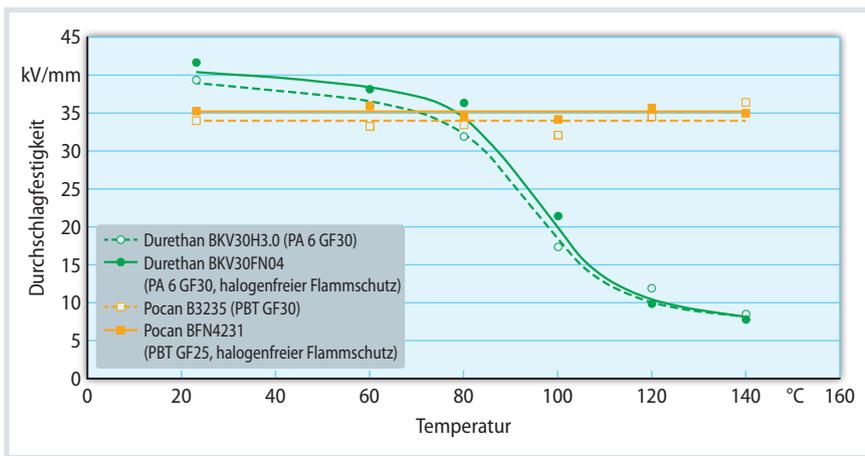
**Bild 2.** Temperaturabhängigkeit des spezifischen Durchgangswiderstands von glasfaserverstärkten PA-6- und PBT-Compounds: Bei PBT fällt der Durchgangswiderstand bei höheren Temperaturen weniger stark ab als bei PA. Quelle: Lanxess; Grafik: © Hanser

### Hohe Durchschlagfestigkeit, kleinere Bauteile

Die Durchschlagfestigkeit  $E_d$  (kV/mm) der Compounds wurde in Anlehnung an die Norm IEC 60243-1 an spritzfrischen Probekörpern untersucht. Sie ist definiert als die elektrische Feldstärke, bei der ein Material gerade noch nicht seine elektrischen Isolationseigenschaften verliert. Beim Versagen des Materials beziehungsweise einem Spannungsdurchschlag ist ein Lichtbogen oder Funkenschlag zu erkennen. Die Durchschlagfestigkeit hängt unter anderem von der Umgebungstemperatur, dem Feuchte- ➤



**Bild 3.** Abhängigkeit des spezifischen Durchgangswiderstands vom Feuchtegehalt am Beispiel eines PA 6 GF30 (Durethan BKV30H3.0): Je höher der Feuchtegehalt desto geringer der Widerstand. Bei Raumtemperatur fällt der Durchgangswiderstand bei Feuchtigkeitsaufnahme stärker als bei höheren Temperaturen. Quelle: Lanxess; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Temperaturabhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von glasfaserverstärkten PA-6- und PBT-Compounds: PBT zeigt über den gesamten Temperaturbereich nahezu keine Veränderung. Bei PA kommt es hingegen zu einer deutlichen Abnahme ab etwa 80 °C. Quelle: Lanxess; Grafik: © Hanser

		PA 6 & PA 66	PBT
<b>Tabelle.</b> Typische CTI-Werte von Compounds aus PA 6, PA 66 und PBT <small>Quelle: Lanxess</small>	ohne Flammenschutz	unverstärkt	CTI 600
		verstärkt	CTI 400-600
	mit halogenhaltigem Flammenschutz	unverstärkt	CTI 250-400
		verstärkt	CTI 400-550
	mit halogenfreiem Flammenschutz	unverstärkt	CTI 600
		verstärkt	CTI 500-600
		CTI 600	
		CTI 425-600	

gehalt des Materials, der Dicke des Probekörpers und der Stromart (Gleich- oder Wechselstrom) ab. Sie hilft dabei zu ermitteln, wie gering bei gegebener Spannung der Abstand zwischen stromführenden Elementen in einem Bauteil gerade noch sein darf, um einen Spannungsdurchschlag zu vermeiden. Werkstoffe mit hoher Durchschlagfestigkeit werden etwa benötigt, um Hochvoltstecker möglichst platzsparend zu dimensionieren.

Die Messungen zeigen, dass sich die Durchschlagfestigkeit von PA-6-, PA-66- und PBT-Compounds mit einer Probendicke von 1 mm unter Temperatureinfluss völlig unterschiedlich verhält. Bei PBT-Compounds bleibt sie bis 140 °C nahezu konstant beziehungsweise unverändert hoch. Dagegen nimmt sie bei den PA-Compounds von einem hohen Niveau bei Raumtemperatur bei steigender Temperatur deutlich ab (**Bild 4**). Für PA-6- und PA-66-Compounds zeigt sich,

dass ihre Durchschlagfestigkeit jedoch erst ab 120 °C einen Wert von 10 kV/mm unterschreitet und somit ebenfalls die hohen Mindestanforderungen an Materialien für Hochvoltanwendungen bei typischen Einsatztemperaturen erfüllt werden.

Die Messungen ergaben weiterhin, dass – anders als beim spezifischen Durchgangswiderstand – die Durchschlagfestigkeit der Compounds signifikant von der Wanddicke abhängt. Sie nimmt mit steigender Probekörperdicke deutlich ab (**Bild 5**). Grund dafür ist, dass die Wärme bei dünneren Wanddicken besser abgegeben werden kann, was ein Aufheizen verzögert und einen frühzeitigen Spannungsdurchschlag verhindert. Dieses Verhalten, das ebenfalls für andere Kunststoffe charakteristisch ist, begünstigt die Miniaturisierung von Komponenten.

### Hohe Kriechstromfestigkeit wird immer wichtiger

Die Kriechstromfestigkeit gibt an, wie gut ein Material bei hoher Spannung und Verschmutzung der Ausbildung von leitfähigen Kriechwegen an der Oberfläche widersteht. Je höher die Kriechstromfestigkeit, umso geringer ist die Gefahr von Kurzschlüssen. Kennwert der Kriechstromfestigkeit ist der Comparative Tracking Index (CTI, IEC 60112). Er wird bestimmt, indem ein Prüfkörper zwischen zwei spannungsführenden Elektroden sukzessive mit Tropfen einer genormten Elektrolytprüfung beträufelt wird. Der CTI A ist der höchste Spannungswert, bei der an fünf Proben nach 50 Tropfen kein Ausfall eintritt.

Der CTI-Wert hängt hauptsächlich von der chemischen Polymerstruktur, dem Verkohlungsverhalten des Polymers, von der Temperatur, der Oberflächenspannung und Rauheit der Materialoberfläche sowie von der Art der Kunststoffeinfärbung und -additivierung ab. Vor allem in der Herstellung von Leiterplatten spielt der CTI-Wert eine große Rolle, weil die Abstände zwischen Steckkontakten (Pins) immer kleiner werden (< 10 µm) und daher ein kriechstromfestes Trägermaterial benötigt wird. Aber auch in vielen weiteren E&E- und Elektromobilitätsanwendungen, die einen hohen Überspannungsschutz aufweisen

müssen, sind hohe CTI-Werte unverzichtbar.

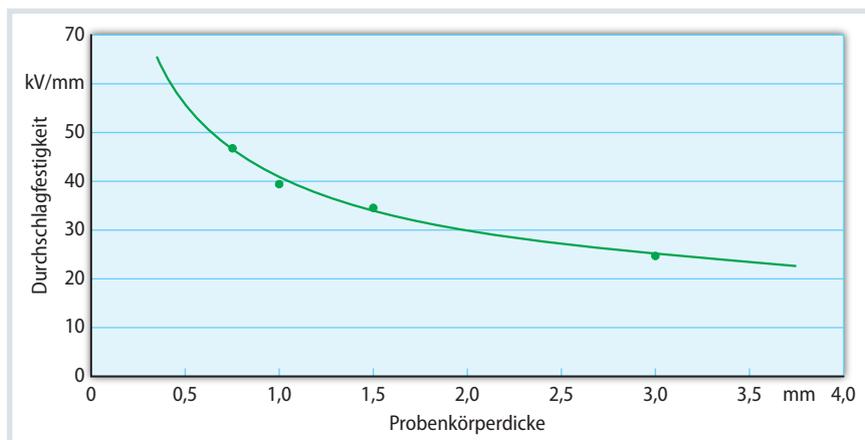
Grundsätzlich gilt, dass halogenfrei und nicht flammgeschützte PA-6-, PA-66- und PBT-Compounds über höhere CTI-Werte verfügen als Compounds mit halogenhaltigen Flammschutzpaketen (Tabelle). Auch lassen sich mit unverstärkten Compounds in der Regel höhere CTI-Werte erreichen als mit verstärkten. Die Feuchteaufnahme von PA-Compounds hat keinen messbaren Einfluss auf ihren CTI-Wert beziehungsweise ihre Kriechstromfestigkeit. Die Untersuchungen ergaben außerdem, dass sich der CTI-Wert der Compounds nach Wärmealterung bei 120 °C oder nach Klimalagerung kaum verändert. Sie bleiben somit auch bei erhöhter Temperatur zuverlässig kriechstromfest.

### CTI-Messungen mit über 600 V sind nicht sinnvoll

Die steigenden Spannungen in vielen Anwendungen der Elektromobilität werfen die Frage auf, ob CTI-Werte von Kunststoffen nicht auch bei höheren Spannungen als 600 V gemessen werden sollten. Dagegen sprechen mehrere Gründe. So neigt etwa die im Testverfahren aufgetropfte Elektrolytlösung bei den durch höhere Spannungen entstehenden Temperaturen zum Verdampfen. Das verfälscht die Messung. Auch können bei Spannungen von mehr als 600 V an der Oberfläche des Probekörpers elektrische Entladungen über die Luft auftreten. Diese beeinflussen ebenfalls die Messung.

### Leitlinie zur Bauteilauslegung bei höheren Spannungen

Grundsätzlich ist der CTI-Test eine Prüfmethode zum direkten Vergleich von Materialien unter Standardbedingungen und sollte nicht direkt mit der Betriebsspannung in der Anwendung verknüpft werden. Denn ein CTI-Wert von 600 bedeutet nicht, dass ein Material nicht auch bei höheren Spannungen als 600 V zum Einsatz kommen kann. Hilfestellung für dieses Thema bietet die Norm IEC 60664/VDE 0110-1. Darin sind Konstruktionsrichtlinien festgelegt, mit denen sich das CTI-Prüfergebnis entsprechend „übersetzen“ und das Bauteildesign für höhere Spannungen optimieren lässt.



**Bild 5.** Abhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von der Probekörperdicke für ein PA 6 GF30 (Durethan BKV30H3.0) bei Raumtemperatur: Bei steigender Dicke nimmt die Durchschlagfestigkeit deutlich ab. Das liegt vor allem an der besseren Wärmeabgabe bei geringeren Wanddicken.

Quelle: Lanxess; Grafik: © Hanser

Die Norm gilt für Bauteile, die bei einer Nennspannung bis 1000 V und Frequenzen bis 30 kHz im Fall von Wechselstrom oder einer Nennspannung bis 1500 V im Fall von Gleichstrom zum Einsatz kommen. Basis zur Festlegung von Mindestkriech- und Mindestluftstrecken im avisierten Bauteil ist ein Fließschema, in das mehrere Größen eingehen. Dazu zählen unter anderem die Isolierstoffgruppe, in die das betrachtete Material gemäß seines CTI-Werts fällt, der Nennspannungsbereich, die Bemessungsstoßspannung und der Verschmutzungsgrad, der durch den Einsatzort des Bauteils bestimmt ist. Für einen Hochvoltsteckverbinder (Titelbild), der bei einer Nennspannung von 800 V eingesetzt wird, ergibt sich mithilfe der Konstruktionsrichtlinien und des Fließschemas bei einem Verschmutzungsgrad der Stufe 2 eine Mindestkriechstrecke von 4 mm, falls für ihn ein Material mit einem CTI-Wert von 600 verwendet wird.

### Fazit

Aus den Untersuchungen ergeben sich folgende Empfehlungen für Hochvoltbauteile etwa von Elektrofahrzeugen: PA-6- und PA-66-Compounds sind wegen der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit ihrer elektrischen Eigenschaften bis 120 °C einsetzbar. Hingegen sind PBT-Compounds hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften Temperaturen bis zu 150 °C gewachsen. Benötigt eine Anwendung eine hohe Kriechstromfestigkeit, stehen dafür in beiden Thermoplastklassen

Compounds mit CTI-Werten von 600 zur Verfügung. Diese können ebenfalls für Anwendungen mit höheren Spannungen als 600 V verwendet werden. Die Kriechstromfestigkeit beider Compoundfamilien lässt auch nach einer Langzeitalterung bei 120 °C kaum nach. ■

## Info

### Text

**Sarah Luers** ist in der globalen Anwendungsentwicklung E/E beim Lanxess-Geschäftsbereich High Performance Materials in Dormagen tätig.

**Dr. Stefan Theiler** arbeitet in der globalen Anwendungsentwicklung elektrifizierter Antriebsstrang beim Lanxess-Geschäftsbereich High Performance Materials; [durethan-pocan@lanxess.com](mailto:durethan-pocan@lanxess.com)

### Service

Nähere Informationen zu den beschriebenen Untersuchungen sowie zu vielen PA- und PBT-Compounds von Lanxess finden sich in der technischen Information „Electrical properties of Durethan and Pocan“. Sie kann unter <https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/de> unter den Menüpunkten „Bibliothek“ – „Technische Literatur“ heruntergeladen werden.

### Digitalversion

Ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

### English Version

Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)