

Von der Entwicklung in die Anwendung

Leitfähige Kunststoffe.

Innovative Metall/Thermo-

plast-Hybridmaterialien verfügen über ein hohes Potenzial zur Steigerung der Funktionalität und Integrationsdichte von Elektronikbauteilen. Für einen weitreichenden industriellen Einsatz müssen sie umfangreiche wirtschaftliche und technologische Anforderungen erfüllen.

**WALTER MICHAELI
TOBIAS PFEFFERKORN**

In zahlreichen Anwendungen der Elektronik/Elektrotechnik sind Kunststoffe den metallischen Werkstoffen überlegen. Vorteilhaft sind u. a. ihr Gewicht, ihre chemische Beständigkeit sowie die zahlreichen Integrationsmöglichkeiten. Das Ziel, Kunststoffe in immer neuen elektronischen Anwendungen einzusetzen, führt daher zu einer ständigen Weiterentwicklung von polymeren Werkstoffen, die auch anspruchsvolle elektrische Eigenschaften erfüllen können [1, 2]. Ein vom Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen, in Zusammenarbeit mit der Siemens AG, Erlangen, entwickelter Hybridwerkstoff erlaubt erstmals, die begrenzte elektrische Leitfähigkeit konventionell gefüllter Kunststoffe anzuheben und hohe, homogen verteilte Werte bis in

den Bereich von Stahl zu erzielen [3, 4]. Dies wird durch den besonderen Synergieeffekt zwischen zwei Füllstoffen erreicht, die in eine thermoplastische Matrix eingearbeitet werden.

Dabei handelt es sich um Kupferkurzfasern und eine niedrig schmelzende Metalllegierung. Die Legierung ist während der Verarbeitung schmelzflüssig und verbessert wie Lot die Kontaktstellen zwischen den Fasern. Es entsteht ein ausgeprägtes metallenes Netzwerk in der ansonsten isolierenden Kunststoffmatrix, das durch den alleinigen Einsatz von Kupferfasern selbst bei gleichem Füllgrad von 85 Gew.-% (44 Vol.-%) nicht erzielt werden kann (Bild 1). Damit steht erstmals ein spritzgießfähiger Werkstoff zur Verfügung, der auch für hoch leitfähige Anwendungen wie komplexe Leiterstrukturen in Molded Interconnect Devices (MID) und

andere elektronische Komponenten, Sensoren sowie Steckverbindungen eingesetzt werden kann. Aber auch effiziente elektromagnetische Abschirmungen und Module zur gezielten Entwärmung von elektronischen Geräten sind denkbar. An Probeplatten mit und ohne Bindenaht konnten Schirmdämpfungen im Bereich der Auflösbarkeit der eingesetzten Transmission-Linienmesszelle und auf dem Niveau einer reinen Metallplatte (>90 dB) gemessen werden (Bild 2 links).

In Kombination mit der Spritzgießtechnik erlaubt das Hybridmaterial einen hohen Grad an Funktionsintegration bei gleichzeitig wirtschaftlicher und flexibler Fertigung, da kostenintensive Füge- und Lötprozesse zumeist entfallen können. Das hohe Anwendungspotenzial veranschaulicht das Beispiel einer 3K-Lichtleiste (Bild 3) der Oechsler AG, Ansbach,

Elektrische Leitfähigkeit im Vergleich

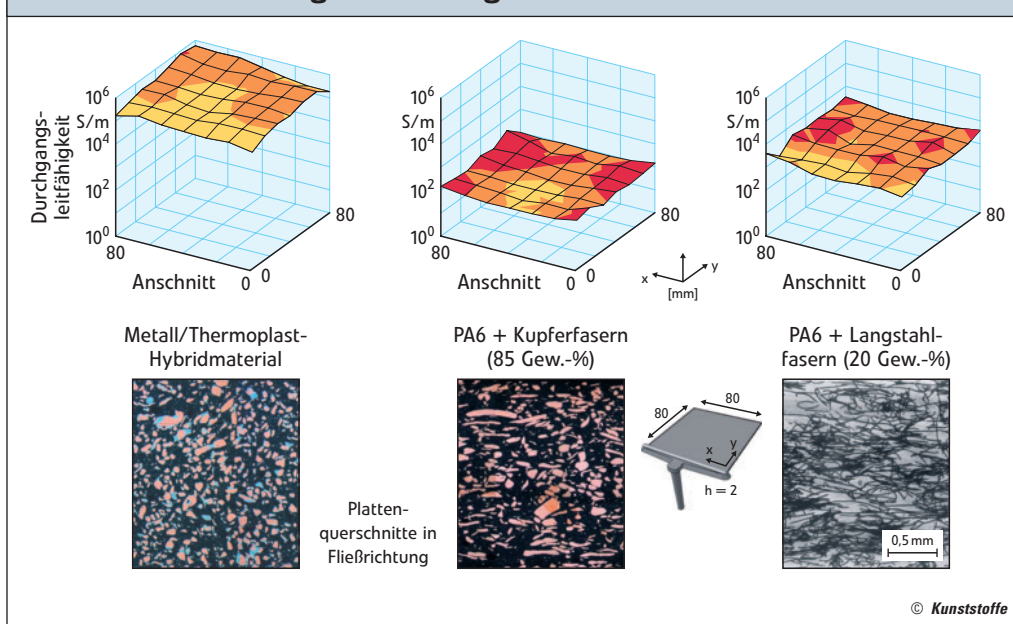


Bild 1. Die Kombination fester und flüssiger Füllstoffe erlaubt hohe und homogene Leitfähigkeiten im Vergleich zu einfach gefüllten Kunststoffen

(Bilder: IKV)

die auf der K 2007 in einer Fertigungszelle der Arburg GmbH + Co KG, Loßburg, hergestellt wurde [5].

Für einen weitreichenden industriellen Einsatz reichen hohe Leitfähigkeits- und Schirmdämpfungswerte allerdings nicht aus. Vielmehr werden an ein neuartiges Material zahlreiche wirtschaftliche und technologische Anforderungen gestellt. Die Praxistauglichkeit des Hybridmaterials wird daher zurzeit am IKV untersucht. Gerade zur Realisierung von Leiterstrukturen auf einem Kunststoffträger im Mehrkomponenten-Spritzgießen treten Aspekte wie die Fließfähigkeit, Stromtragfähigkeit und Kontaktierbarkeit des Materials in den Vordergrund.

Fließfähigkeit unter Prozessbedingungen

Die Materialfließfähigkeit unter Prozessbedingungen hängt neben der Wahl des Matrixkunststoffs wesentlich von der Art der Füllstoffe ab. Zwar ist die Viskosität des Hybridmaterials trotz des hohen Füllgrads aufgrund der niedrigviskosen Metallschmelze relativ gering, die hohe Wärmeleitfähigkeit kann aber zu einer frühzeitigen Materialerstarrung führen. Zudem ist die minimale Querschnittsfläche von Leitern durch die Größe der

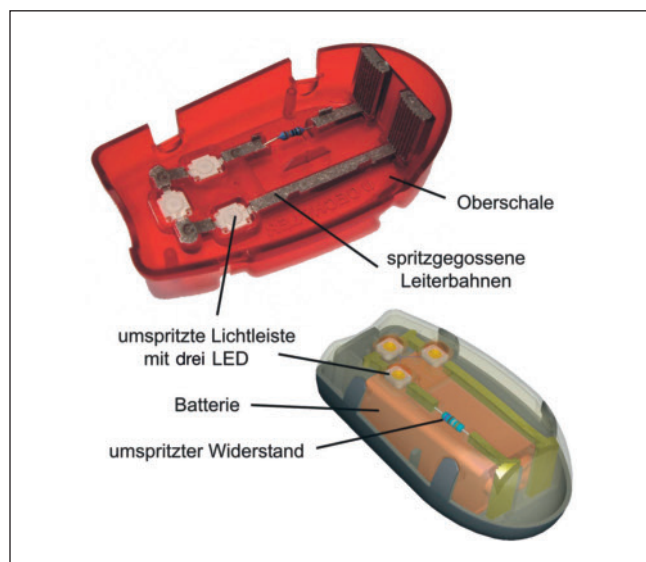


Bild 3. Leiterbahnen werden in dieser Lichtleiste direkt durch den Mehrkomponenten-Spritzgießprozess integriert, in dem zugleich drei LED umspritzt werden (Quelle: Oechsler AG)

eingesetzten Kupferfasern beschränkt, da diese den Fließkanal verstopfen können. Ein Vergleich der realisierbaren Fülllängen in Abhängigkeit des Kanalquerschnitts zeigt, dass mit zunehmender Querschnittsfläche die Fließlänge deutlich steigt (Bild 4). Die kritische Grenze liegt bei einer Querschnittsfläche von ca. $1 \times 1 \text{ mm}^2$. Darunter nehmen die Fließwege deutlich ab. Darüber hinaus wird das Metallgefüge aufgrund hoher Materialscherung inhomogener, sodass die elektrische Leitfähigkeit absinkt. Eine Anpassung der Prozessführung z. B. über eine variotherme Werkzeugtemperierung verspricht hier weiteres Optimierungspotenzial, das am IKV noch untersucht wird.

Temperaturabhängige elektrische Leitfähigkeit

Im Allgemeinen wird die elektrische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur gemessen. Vielfach müssen leitfähige Kunststoffbauteile aber ihre Funktion unter erhöhten Temperaturen ►

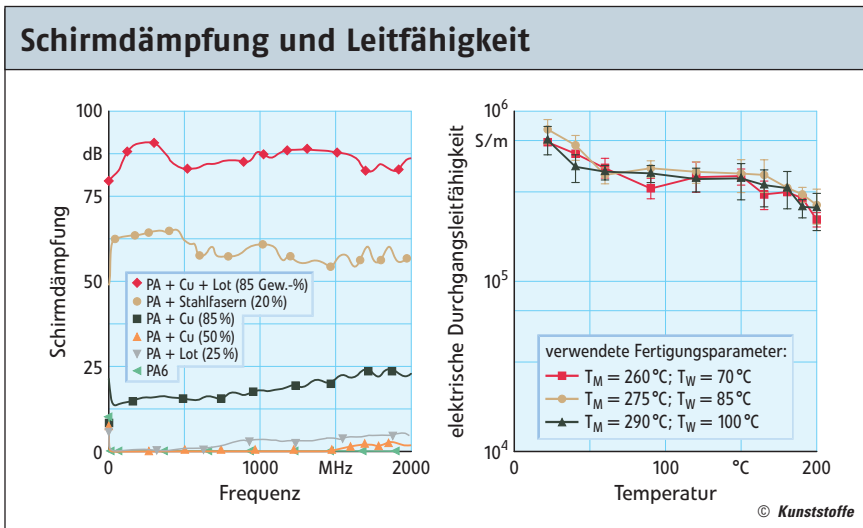


Bild 2. Die Schirmdämpfung des Hybridmaterials liegt im Bereich einer Metallplatte (links). Die elektrische Leitfähigkeit zeigt für unterschiedliche Prozesspunkte stets eine geringe Temperaturabhängigkeit (rechts)

erfüllen, zum einen aufgrund einer Erwärmung von außen (z. B. bei einem Einsatz im Motorraum), zum anderen aufgrund einer Erwärmung von innen (Verlustleistung unter Strombelastung). Problematisch sind hierbei die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Metall und Kunststoff, die zu einer Zerstörung der leitfähigen Metallkontakte führen könnten. Leitfähigkeitsmessungen in einer temperierten Kammer an mit unterschiedlichen Prozesseinstellungen gefertigten Proben belegen jedoch, dass die Bauteiltemperatur die erzielbaren Leitfähigkeitswerte des Metall/Thermoplast-Materials nur geringfügig beeinflusst. Nach einem leichten Absinken der Leitfähigkeit von Raumtemperatur bis zur Glasübergangstemperatur des Polymers verbleiben die Werte auf einem konstanten Niveau, bevor sie erst mit Erreichen des Erweichungsbereichs der Polyamidmatrix ab ca. 170 °C weiter zu sinken beginnen (Bild 2 rechts).

Stromtragfähigkeit abschätzbar

Sollen spritzgegossene Leiterstrukturen zur Leistungsübertragung eingesetzt werden, ist im Rahmen der Bauteilauslegung eine Abschätzung der resultierenden Bauteilerwärmung notwendig, um ein lokales Überhitzen und damit ein Bauteilversagen auszuschließen. Messungen an Probekörpern variierender Querschnittsfläche zeigen, dass die Höhe der Widerstandserwärmung stromstärken-, geometrie- und materialabhängig ist. Wird die Probe mit einem Gleichstrom zwischen 1 und 10 A belastet, stellt

sich nach einem anfänglich steilen Temperaturanstieg innerhalb weniger Minuten ein konstantes Temperaturniveau ein. Dieses liegt je nach Geometrie und Belastung zwischen Raumtemperatur und ca. 50 °C (Bild 5 links). Noch höhere Temperaturen werden nur bei kleinen Querschnitten unterhalb 5 mm² und gleichzeitig hohen elektrischen Belastungen erreicht. Um die Auslegung zu vereinfachen, wird als charakteristische Kennzahl zur Beschreibung der Stromtragfähigkeit die Stromdichte als Quotient aus Stromstärke und Querschnitt gebildet. Die gemessenen Endtemperaturen weisen dabei eine nahezu lineare Abhängigkeit von der Stromdichte auf (Bild 5 rechts), sodass dieser Kennwert sich zur Bauteilauslegung anbietet. Ummantelte Proben,

die einer realen Einbausituation entsprechen, erreichen aufgrund der schlechteren Wärmeabfuhr leicht erhöhte Temperaturen.

Einbindung in elektronische Baugruppen

Im Spritzgießprozess hergestellte, elektronische Kunststoffteile müssen vielfach weitere Elemente integrieren, wie beispielhaft anhand des Widerstands und der LED in Bild 3 deutlich wird. Zudem benötigen die Bauteile zumeist definierte Kontakte zu ihren benachbarten Komponenten, um eine einfache Montage zu erlauben. Diese können durch das Einlegen metallischer Kontaktpins, Anlöten, das Einpressen erwärmter Kontaktpins oder ähnliche Verfahren realisiert werden. Wesentlich ist, dass eine gute Leitfähigkeit über die Kontaktstelle gesichert ist und die Kontaktierung nicht aufgrund von füllstoffarmen Randschichten, wie sie von den Oberflächen gefüllter Kunststoffe bekannt sind [6], deutlich verschlechtert wird. Versuche mit Drähten unterschiedlicher Längen und Materialien, die entweder seitlich oder frontal umspritzt wurden, zeigen, dass ab einer Mindestlänge von ca. 5 mm die Leitfähigkeit über die Drähte im Bereich der Durchgangleitfähigkeit des Hybridmaterials liegt. Eine Längsumströmung führt schon bei geringen Drahtlängen zu höheren Werten als eine Querströmung. Ebenso zeigen Kupferdrähte aufgrund ihrer besseren Lötbarkeit mit der Metalllegierung bessere Übergangswerte als Stahl. Eine einfache Kontaktierung ist somit gewährleistet.

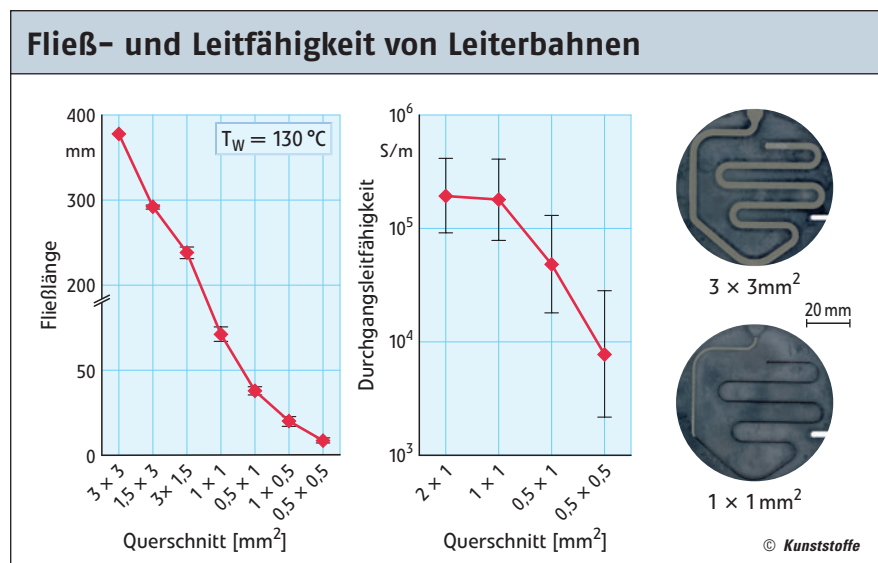


Bild 4. Die realisierbaren Fließweglängen und Leitfähigkeiten steigern sich mit zunehmendem Leiterbahnquerschnitt

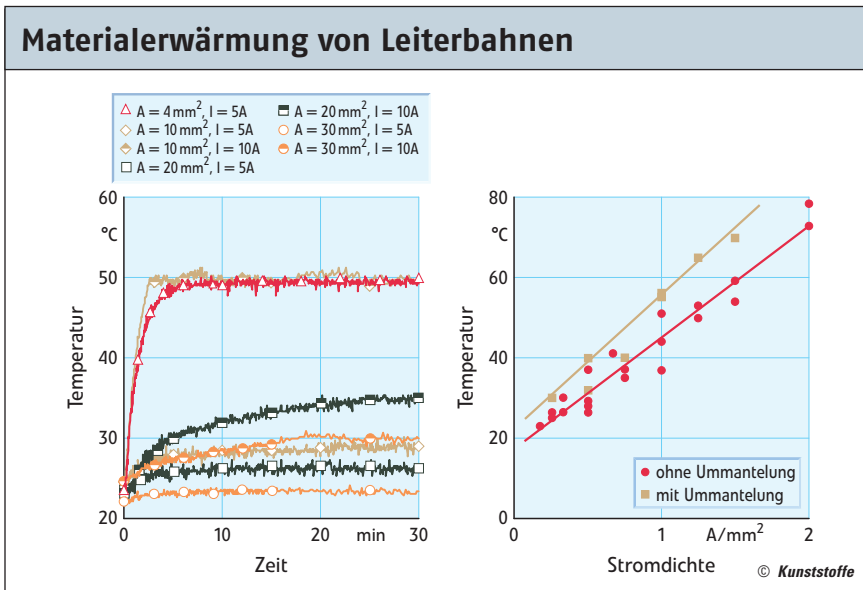


Bild 5. Unter Bestromung findet eine querschnitts- und belastungsabhängige Materialerwärmung statt, die über die Stromdichte abgeschätzt werden kann

Erhöhte Wirtschaftlichkeit durch Materialrecycling

Neben der Funktionalität treten auch Wirtschaftlichkeits- und Umweltschutzaspekte zunehmend in den Vordergrund

der Materialauswahl. Gerade bei einem technologisch anspruchsvollen Material bietet sich ein Recycling an. Häufig werden granulierte Produktionsabfälle zu einem gewissen Anteil dem Neumaterial beigemischt [7]. Voraussetzung hier-

für ist aber, dass die wesentlichen Materialeigenschaften auf einem definiert hohen Niveau verbleiben. Gerade bei festen Füllstoffen in verstärkten Kunststoffen besteht die Gefahr, dass die Füllstoffe und damit das elektrisch leitfähige Netzwerk beim Recycling geschädigt werden. Versuche an Proben, die mehrfach zu 100 % regranuliert und wiederverarbeitet wurden, zeigen, dass die elektrische Leitfähigkeit, aber auch die mechanischen Eigenschaften über die Produktzyklen nur geringfügig abfallen und nach ca. sechs Recyclingzyklen auf einem konstant hohen Niveau verbleiben (Bild 6). Die Ursache für diese gute Konstanz der Hybridmaterial-eigenschaften ist zum einen die Duktilität der Kupferkurzfaser, die gegenüber einer Verkürzung der Faserlänge relativ unempfindlich sind. Zum anderen hat gerade die niedrig schmelzende Metalllegierung den Vorteil, in jedem Plastifizierschritt erneut aufzuschmelzen und sich während der Dosier- und Einspritzphasen wieder neu in der Kunststoffmatrix ordnen zu können, sodass sich das leitfähige Netzwerk selbst regenerieren kann. ▶

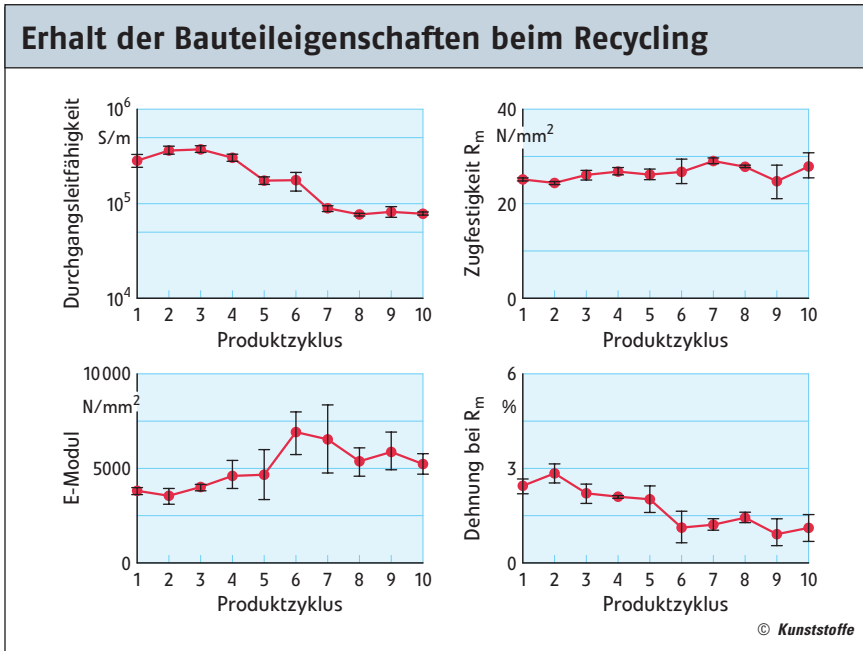


Bild 6. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften bleiben selbst nach mehrmaligem Recycling auf einem hohen Niveau

Fazit

Die Untersuchungen bestätigen ein hohes Einsatzpotenzial des Metall/Thermoplast-Hybridmaterials für industrielle Anwendungen, bei denen eine rationelle Massenproduktion und eine hohe elektrische Leitfähigkeit von Integrativbauteilen gefordert werden. Selbst starke Ströme können durch das Material sicher übertragen werden. Hierbei erweist sich neben der hohen Materialleitfähigkeit auch deren geringe Temperaturabhängigkeit als wesentlich. Allerdings ist auf eine ausreichende Dimensionierung und angepasste Prozessführung zu achten, um eine gute Fließfähigkeit zu garantieren.

Auch eine einfache Anbindung in ein elektronisches Gesamtsystem ist möglich. Die Möglichkeiten der Kontaktierung sind Gegenstand aufbauender Untersuchungen am IKV. ■

DANK

Die Untersuchungen sind Bestandteil des Forschungsvorhabens 15258 N der Forschungsvereinigung Kunststoffverarbeitung, das im Programm zur Förderung der „Industriellen Gemeinschaftsforschung“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) finanziert wird. Für die finanzielle Unterstützung gilt beiden Institutionen unser Dank.

Unser Dank gilt ebenfalls den Firmen Siemens, Arburg, KraussMaffei, A. Schulman, Ticona, Deutsches Metallfaserwerk, HEK sowie der FHTW Berlin (FB1, Hochfrequenztechnik), die durch wertvolle Hinweise sowie Bereitstellung von Materialien, Maschinen und sonstigen Mitteln diese Arbeiten unterstützen.

LITERATUR

- 1 Mair, H. J.; Roth, S.: Elektrisch leitende Kunststoffe. Hanser, München 1989
- 2 Pfeiffer, B.: Überblick leitfähige Kunststoffe. OTTI Konferenz, Elektrisch leitfähige Kunststoffe, Regensburg 2007

- 3 Michaeli, W.; Pfefferkorn, T.: Kunststoffe mit leitender Funktion. Kunststoffe 97 (2007) 8, S. 87–91
- 4 Michaeli, W.; Pfefferkorn, T.: Novel Metal/Polymer Blends for Highly Conductive Applications. SPE Conference ANTEC, Cincinnati, Ohio 2007
- 5 Drummer, D.; Dörfler, R.: Leuchtendes Beispiel. Kunststoffe 97 (2007) 11, S. 64–67
- 6 Hong, C.-M., Kim, J., Jana, S.: The effect of shear-induced migration of conductive fillers on conductivity of injection molded article. SPE Conference ANTEC, Nashville, Tennessee 2003
- 7 Wolters, L.; Marwick, J. v.; Regel, K.; Lackner, V.; Schäfer, B.: Kunststoff-Recycling. Grundlagen, Verfahren, Praxisbeispiele. Hanser, München 1997

DIE AUTOREN

PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. WALTER MICHAELI, geb. 1946, ist Inhaber des Lehrstuhls für Kunststoffverarbeitung an der RWTH Aachen und Leiter des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV)

DIPL.-ING. TOBIAS PFEFFERKORN, geb. 1977, ist seit 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter des IKV und leitet die Arbeitsgruppe Sonderwerkstoffe/Werkzeugtechnik in der Abteilung Spritzgießen; pfefferkorn@ikv.rwth-aachen.de

SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL

From Development through to Application

CONDUCTIVE PLASTICS. Innovative metal/thermoplastic hybrid materials have a high potential for enhancing the range of functions and integration density of electronic components. If they are to be extensively used in industry, they must fulfill comprehensive economic and technological requirements.

NOTE: You can read the complete article in our magazine **Kunststoffe international** and on our website by entering the document number **PE104323** at www.kunststoffe-international.com