

# EXTRA:

## Automotive

[FAHRZEUGBAU] [MEDIZINTECHNIK] [VERPACKUNG] [ELEKTRO&ELEKTRONIK] [BAU] [KONSUMGÜTER] [FREIZEIT&SPORT] [OPTIK]

# Brennstoffzellenfahrzeuge fit für den Einsatz machen

## Materialverbesserungen sorgen für zuverlässigere Brennstoffzellen

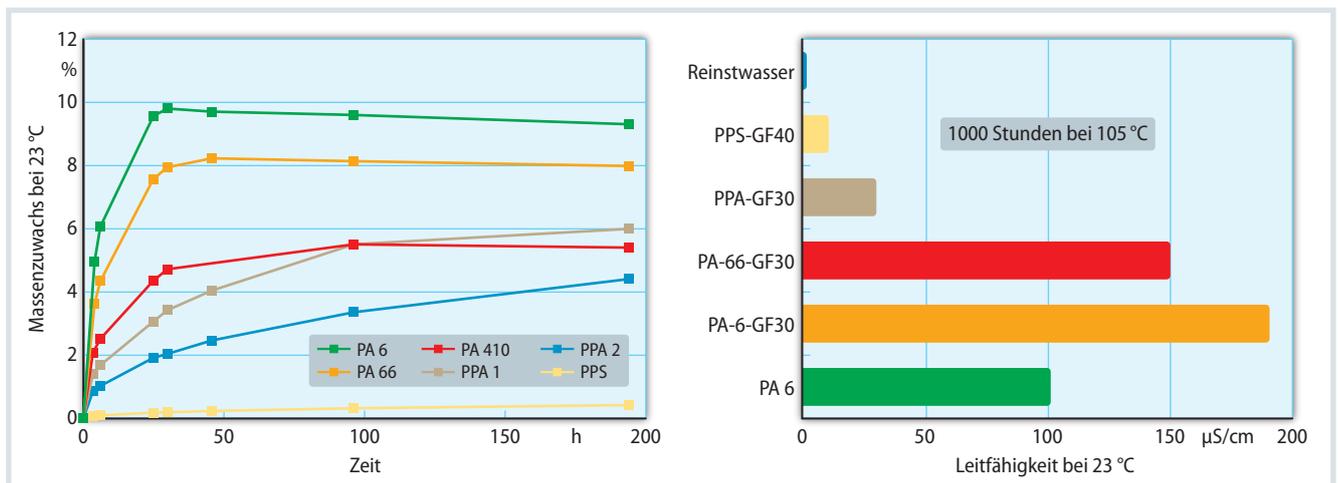
Neben dem rein batteriebetriebenen Elektroantrieb gilt die Brennstoffzelle als Alternative zum Verbrennungsmotor. Um sie in Serienreife zu bringen, sind allerdings noch Verbesserungen bei der Zuverlässigkeit der Zellen notwendig. Besonders bei der Ionenauslaugung und der Hydrolysebeständigkeit der bisher verwendeten Materialien besteht noch Nachholbedarf. Eine Möglichkeit dafür stellen speziell entwickelte PPS dar.

Fossile Brennstoffe tragen wesentlich zur Luftverschmutzung und zu Treibhausgasen bei. Die WHO schätzt, dass 25 % der Todesfälle aufgrund von Herzkrankungen, Schlaganfall und Lungenkrebs auf Luftverschmutzung zurückzuführen sind. CO<sub>2</sub> und andere Treibhausgase sind direkt für den Klimawandel verantwortlich – was zu einem höheren Interesse an erneuerbaren emissionsfreien Ressourcen führt. Die Transportindustrie ist ein großer Verursacher von Treibhausgasemissionen. Rund 4 % der jährlichen

Gesamtemissionen entfallen auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe in Kraftfahrzeugen. Alternativen für fossile Brennstoffe im Verkehrssektor – synthetische Kraftstoffe, reine Batteriefahrzeuge und Brennstoffzellen – weisen jedoch Einschränkungen auf und haben noch keine breite Marktakzeptanz gefunden. Bei Brennstoffzellen sind dafür beispielsweise noch wesentliche Verbesserungen bei technischen Materialien nötig, die die Herstellung zuverlässiger und effizienter Zellen ermöglichen.

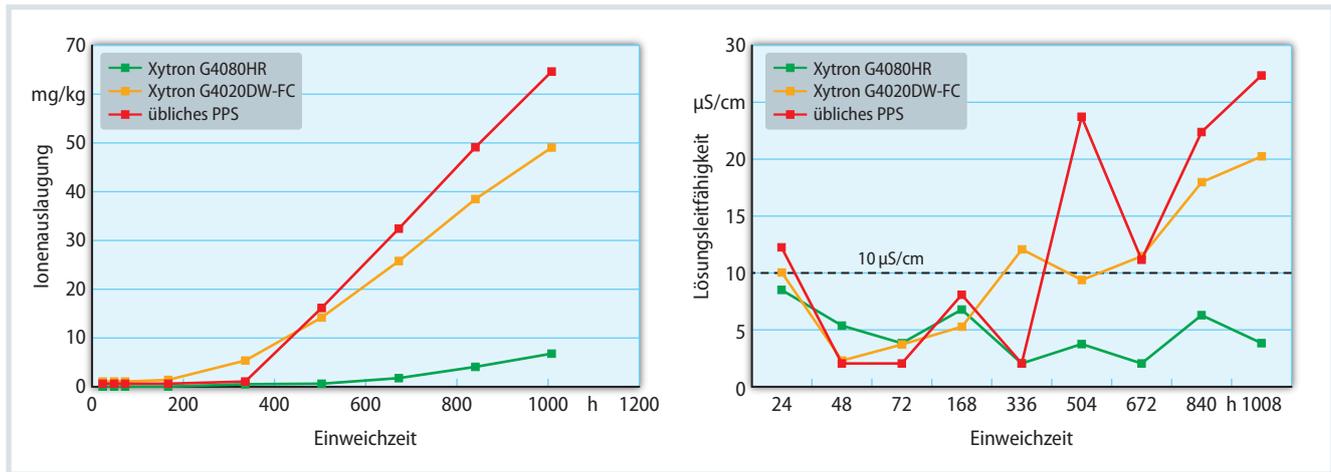
Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen erzeugen Brennstoffzellen auf Wasserstoffbasis reines Wasser als einziges Nebenprodukt. Zusätzlich übertrifft ihre Effizienz die von Verbrennungsmotoren. Bei gegebener Eingangsleistung können Brennstoffzellen die 2,3-fache Reichweite eines Diesel- oder Benzinmotors bieten.

Die Größe des weltweiten Wasserstoffmarkts betrug 2019 Schätzungen zufolge 117 Mrd. USD und soll bis 2027 voraussichtlich um durchschnittlich 4,3 % pro Jahr wachsen [1]. Wasserstoff kann



**Bild 1.** PPS zeigt im Vergleich zu PA 6, PA 66 und PPA die geringste Feuchtigkeitsaufnahme (links) und Ionenauswaschung (rechts)

Quelle: DSM; Grafik: © Hanser



**Bild 2.** Xytron G4080HR weist im Vergleich zu anderen 40 % glasfaserverstärkten PPS-Verbindungen die niedrigste Ionenauswaschung (links) und Lösungsleitfähigkeit (rechts) auf. Eine Lösungsleitfähigkeit von 10 µS/cm als Indiz für eine geringe Ionenauswaschung wird als ideales Niveau angesehen, um eine lange Zellebensdauer zu gewährleisten. Quelle: DSM; Grafik: © Hanser

entweder aus fossilen oder erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden, wobei die Vergasung fossiler Brennstoffe die aktuell vorherrschende Produktionsweise ist. Die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung erneuerbarer Energiequellen würde die Erzeugung von Treibhausgasen während des gesamten Brennstoffzellenbetriebszyklus eliminieren. Das Beratungsunternehmen Wood Mackenzie prognostiziert, dass sich die kumulierte installierte Kapazität für die Produktion von grünem Wasserstoff in der nächsten Zeit um das Zwölfwache erhöhen wird – von 253 MW in den Jahren 2000 bis 2019 auf 3205 MW bis 2025.

### Brennstoffzellen sind ideal für den Transportbereich

Im Verkehrssektor ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs langfristig die einzige Lösung für die Herausforderung steigender Emissionen. Wasserstoff-Brennstoffzellen sind die effizienteste Technologie für Fahrzeuge mit einem hohen täglichen Fahrbedarf – wie Busse, Lastwagen, Züge und auch für Schiffe.

Brennstoffzellen bieten gegenüber reiner Batterietechnologie folgende Vorteile:

- Betankungszeiten und Reichweiten vergleichbar mit Verbrennungsmotoren;
- keine schwere zusätzliche Batterieladung;
- Die Leistung ist nur begrenzt wetterabhängig.

Im Schwertransport sind Batteriegewicht, Reichweite und hohe Ladezeiten klare Nachteile eines reinen batteriebetriebenen Antriebs. Bei höheren Kapazitäten steigt das Batteriegewicht erheblich an, wodurch die reine Batterietechnologie für den Transportsektor weniger geeignet ist und zu hohen Kosten pro Kilogramm transportiertem Gewicht führen würde. Anstatt schwere Batterien in den Fahrzeugen zu transportieren, kann die benötigte Energie über Brennstoffzellen direkt an Bord erzeugt werden. Während bei Batterien außerdem geopolitische Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit von Rohstoffen wie Lithium und Kobalt bestehen, kann Wasserstoff regional produziert werden und bereits existierende LKW-Tankstellen lassen sich leicht auf Wasserstofftankstellen für Brennstoffzellenfahrzeuge umstellen.

### Thermoplaste unerlässlich für hohe Leistung und Zuverlässigkeit

Unter den Brennstoffzellentechnologien wird die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) immer beliebter. Sie bietet ein sehr gutes Gleichgewicht zwischen Effizienz und Emissionen bei sowohl niedriger Betriebstemperatur, kurzer Anlaufzeit als auch der Fähigkeit, mit reinem Wasserstoff und normaler Umgebungsluft als Oxidationsmittel zu arbeiten. Brennstoffzellensysteme für Nutzfahrzeuge, die oft länger als 15 000 Stunden in Betrieb sind, müssen sehr robust sein. Das erfordert sorgfältige Überlegungen bei

der Materialauswahl, Konstruktion, Herstellung und Qualitätskontrolle.

Technische Thermoplaste sind aufgrund ihrer einfachen Verarbeitbarkeit, ihres geringen Gewichts und ihrer intrinsischen elektrischen Isolierung ideal für Brennstoffzellensysteme. Der ständi- ➤

## Die Autoren

**Dr. Tamim P. Sidiki** ist Global Marketing Director Mobility bei DSM Engineering Materials. Er arbeitet seit 2007 für das niederländische Unternehmen und leitet das Marketing im Mobility-Segment; tamim.sidiki@dsm.com

**Yu Bin** ist Global Advanced Engineering Manager für Elektrofahrzeuge bei DSM Engineering Materials. Von Shanghai aus konzentriert er sich hauptsächlich auf den elektrischen Antriebsstrang; bin.yu@dsm.com

**Dr. Robert Janssen** ist Principal Scientist am DSM Advanced Science Center für funktionale Materialeigenschaften; rob-r.janssen@dsm.com

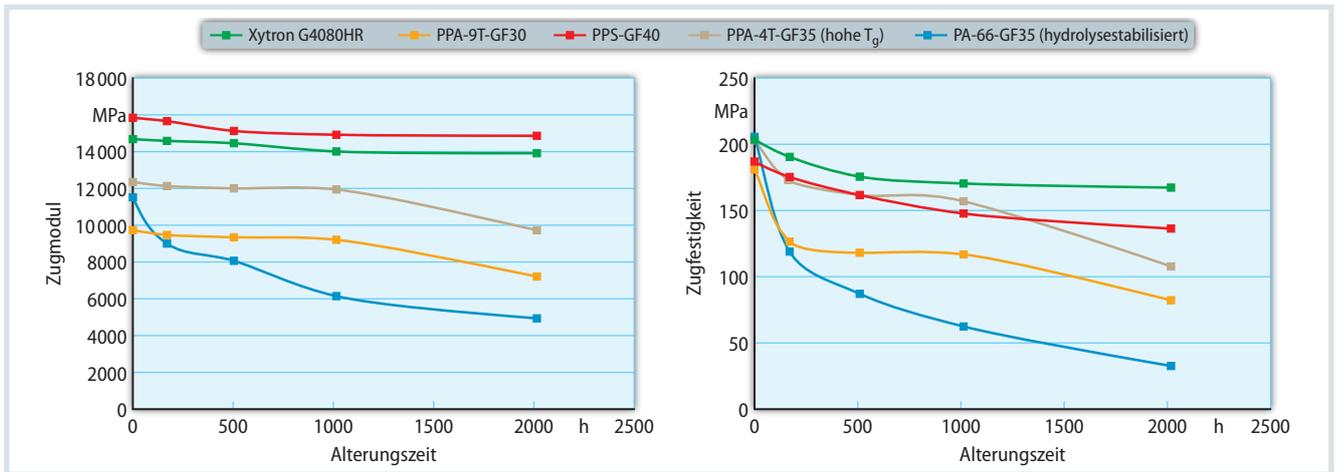
## Service

### Literatur & Digitalversion

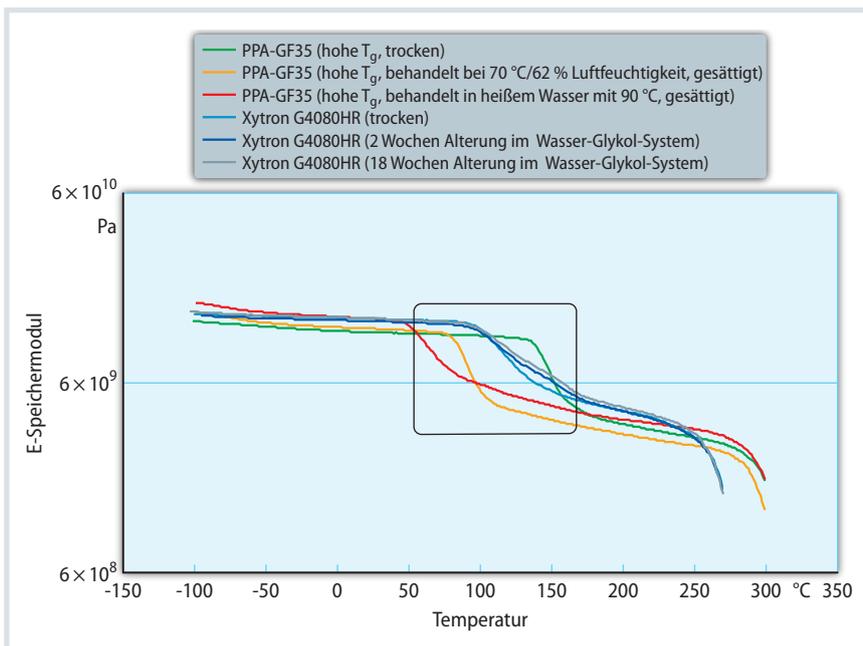
- Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

### 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)



**Bild 3.** Vergleich des Zugmoduls (links) und der Zugfestigkeit (rechts) verschiedener Polymerverbindungen: Die Alterungsbeständigkeit der beiden PPS ist höher als die des PA und der beiden PPA Quelle: DSM; Grafik: © Hanser



**Bild 4.** Vergleich des DMTA-Speichermoduls (E-Modul) zwischen PPA mit hoher T<sub>g</sub> und PPS in verschiedenen Stadien (trocken wie geformt, nach Feuchtigkeitsaufnahme bis zur Sättigung und nach hydrolytischer Alterung) Quelle: DSM; Grafik: © Hanser

ge, direkte Kontakt mit Gasen und Flüssigkeiten in Brennstoffzellensystemen führt allerdings zur Hydrolyse thermoplastischer Komponenten, was deren mechanische Festigkeit erheblich beeinträchtigt. Darüber hinaus kann die verursachte Ionenauswaschung aus den Kunststoffen zu Membrankontamination und Verstopfung, Nadellochbildung, Korrosion der bipolaren Platten, einer Verringerung der Isolation im Wärmemanagementsystem sowie zu Verformung und Kriechen der Komponenten an der Dichtungsgrenzfläche führen. Der Nettoeffekt auf das Brennstoffzellensystem ist eine

Verringerung der Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

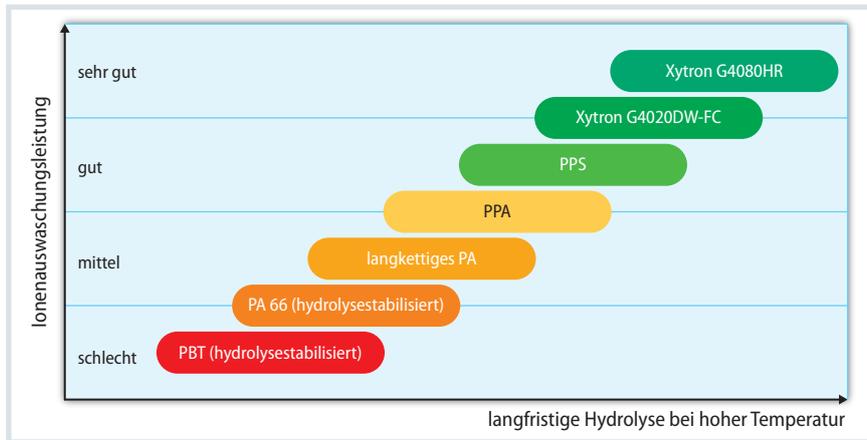
Insbesondere zeigt sich, dass Kationskationen wie Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> und Fe<sup>2+</sup>, die aus den Materialien der Brennstoffzellen stammen, von der Membran aufgenommen werden und durch diese wandern. Sie sammeln sich an der Kathode und ersetzen als Folge der Elektroneutralität lokal die Protonen. Diese starke Unterdrückung der Protonenkonzentration in der Nähe der Kathode verringert das von der Brennstoffzelle erzeugte Potenzial, das sogenannte Nernstpotenzial, erheblich. Zusätzlich erhöht sich dadurch

das kathodische Aktivierungspotential stark. Darüber hinaus führt im schlimmsten Fall eine übermäßige Ionenauswaschung auch zur Bildung von Nadellochern in der Membran und infolgedessen zu einem Wasserstoffübergang zur Kathode.

All diese Probleme reduzieren die Brennstoffzelleneffizienz und die Lebensdauer erheblich. DSM Engineering Materials hat spezielle Materialien mit einer sehr hohen Reinheit entwickelt, die die Ionenauswaschung intrinsisch reduzieren und die mechanische Leistung stark verbessern, selbst in extremen hydrolytischen Umgebungen.

### Hohe Hydrolysebeständigkeit notwendig

Brennstoffzellensysteme arbeiten typischerweise bei Temperaturen von 70 bis 90 °C in annähernd hundertprozentiger Luftfeuchtigkeit und unter mild-sauren Bedingungen. Das kann die Materialeigenschaften stark verschlechtern und insbesondere die langfristigen mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise die Kriechfestigkeit beeinträchtigen. Komponenten, die aus Materialien mit geringer Hydrolysebeständigkeit hergestellt sind, neigen an der Dichtungsgrenzfläche zu Verformungen und Undichtigkeiten. Um die Leistung von Brennstoffzellenkomponenten zu verbessern, hat DSM Hochleistungskunststoffe entwickelt und bietet zusätzlich umfangreiche Simulationstools zur Vorhersage der langfristigen Hydrolyseleistung der Materialien selbst unter extremen Bedingungen an. »



**Bild 5.** Im Vergleich zu anderen Materialien behält Xytron G4080HR seine mechanischen Eigenschaften während der langfristigen hydrolytischen Alterung deutlich länger. Auch die Ionenauswaschung ist geringer Quelle: DSM; Grafik: © Hanser

Dafür wurde eine vollständige Material- und Simulations-Plattform auf Basis der Polyphenylensulfide (PPS) Xytron PPS geschaffen. Dadurch ist die Auswahl des passenden Materials möglich, um eine geringe Ionenauswaschung und eine sehr hohe Hydrolysebeständigkeit zu erhalten.

### *Ionenwaschung vermeiden*

Alle Polyamide (PA) absorbieren eine bestimmte Menge an Feuchtigkeit, die Glasfasern angreift und die Grenzflächenchemie verschlechtert, was in Konsequenz zu einer erhöhten Ionenauswaschung führt. Die Feuchtigkeitsabsorption verringert auch die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ), wodurch die Dimensionsstabilität und die Kriechbeständigkeit bei hohen Temperaturen verringert werden. Im Gegensatz dazu nehmen PPS kaum Feuchtigkeit auf (Bild 1). Die unpolare Molekülstruktur des teilkristallinen Kunststoffes ermöglicht eine sehr gute chemische Beständigkeit, eine geringe Ionenauswaschung und zusätzlich eine verbesserte Dimensionsstabilität.

DSM hat bei der Entwicklung der PPS-Compounds darauf geachtet, die Grenzflächenchemie zwischen Glasfasern und den Polymeren zu verbessern. Auf diese Weise wird die Bindung zwischen Kunststoff und Glasfasern gestärkt und die Ionenauswaschung auf ein Niveau reduziert, das weit unterhalb alternativer PPS-Kunststoffe liegt. Die Ionenauswaschung des hochperformanten Xytron G4080HR wurde im Vergleich zu Standard Xytron G4020DW-FC und marktüblichen PPS-Verbindung

getestet. Xytron G4080HR mit der speziellen Polymer-Glasfaser-Grenzflächentechnologie zeigt die geringste Ionenauswaschung und damit einhergehend die geringste elektrische Leitfähigkeit in der Flüssigkeitslösung (Bild 2).

Die Hydrolysebeständigkeit ist wie erwähnt entscheidend für die hohe mechanische Integrität von Brennstoffzellenkomponenten, die rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Im Allgemeinen zeigen PPS-Verbindungen im Vergleich zu PA eine bessere langfristige mechanische Leistung. Aber auch im Vergleich zu anderen PPS weist Xytron G4080HR eine höhere Zugfestigkeit (Bild 3) auf und bietet bessere mechanische Eigenschaften, was die Zuverlässigkeit von Teilen mit langer Nutzungsdauer erhöht.

### *PPS statt PA für Brennstoffzellen*

Nach 3000 Stunden künstlicher Alterung bei 135 °C bleibt das PPS dennoch sehr stabil und zeigt keine  $T_g$ -Verschiebung (Bild 4). Im Gegensatz dazu benötigen Polyphthalamide-Verbindungen (PPA) mit hoher  $T_g$  und einem Glasfaseranteil von 35 % nicht einmal 250 Stunden, um eine völlige Feuchtigkeitssättigung zu erreichen. Selbst PPAs mit der höchsten Hydrolysebeständigkeit und  $T_g$  zeigen immer noch eine starke  $T_g$ -Verschiebung von 149 auf lediglich 68 °C, was zu einer Erweichung und einer signifikanten Verringerung der Dimensionsstabilität und der Kriechbeständigkeit führt.

Bei Temperaturen von 90 °C und bei einer Luftfeuchtigkeit von 100 % – den

erwähnten typischen Arbeitsbedingungen für ein Brennstoffzellensystem – sind PA nach den ersten hundert Betriebsstunden vollständig mit Feuchtigkeit gesättigt. Zusätzlich zum Erweichen besteht deshalb die Gefahr eines hydrolytischen Abbaus.

### *10000 Stunden Messdaten*

Bei Brennstoffzellenteilen aus PA kommt es außerdem zu einer Dimensionsausdehnung. Eigenschaften wie Kriechfestigkeit, mechanische Festigkeit und Elastizitätsmodul fallen ebenfalls ab, was zu einer Verformung der Komponenten führt. Brennstoffzellensysteme mit solchen Bauteilen sind aufgrund von Kriechen und Verformung an den Dichtungsgrenzflächen einem sehr hohen Ausfallrisiko ausgesetzt. Nach systematischer Untersuchung verschiedener Polymere in einer Hochtemperatur-Hydrolyselösung hat DSM über 10000 Stunden Messdaten erfasst. Xytron G4080HR übertrifft andere Polymere hinsichtlich der Hydrolysebeständigkeit deutlich und behält am stärksten seine mechanischen Eigenschaften in Wasser und Wasser-Glykol-Systemen (Bild 5).

### *Höhere Zuverlässigkeit auch bei 15000 Stunden Dauerbetrieb*

Wasserstoff ist die wettbewerbsfähigste Kraftstoffquelle für den Transportsektor. Damit sind Fahrzeuge möglich, die im Betrieb keine Emissionen verursachen und die Umwelt nur gering belasten. Dadurch können sie entscheidend zu einer klimaneutralen Gesellschaft beitragen. PEMFC lassen sich in der gesamten Transportbranche verwenden.

Bei Nutzfahrzeugen, die in der Regel mehr als 15000 Stunden fahren, erhöhen Hochleistungskunststoffe für Brennstoffzellen deren Zuverlässigkeit deutlich. Mit seiner sehr guten chemischen Beständigkeit, Dimensionsstabilität und Hydrolysebeständigkeit sowie seiner geringen Ionenauswaschung ist PPS sehr gut für Brennstoffzellensysteme geeignet. Neben passenden Materialien bietet DSM ebenfalls Konstruktionsunterstützung mit speziellen Prognose- und Modellierungsoptionen an, um Hersteller dabei zu unterstützen, potenzielle Ausfälle in Brennstoffzellensystemen zu vermeiden. ■