



© Markus Steur | BGS

Leichte Werkstoffe können ein zentraler Baustein einer klimaneutralen Produktion sein. Kunststoffe können hier oftmals überzeugen. Allerdings müssen sie je nach Anwendung auch hohen Temperaturen und extremen Bedingungen standhalten. Hier bietet BGS mit der Strahlenvernetzung thermoplastischer Kunststoffe neue Möglichkeiten für den Leichtbau, denn mit diesem Veredelungsverfahren lassen sich auch herkömmliche Kunststoffe für anspruchsvolle Aufgaben qualifizieren.

BEDEUTUNG DER STRAHLENVERNETZUNG

Energiereiche ionisierende Gamma- und Betastrahlungen eignen sich dazu, etwa in der Sterilisationstechnik schädliche Mikroorganismen zu zerstören. Das ist allgemein bekannt. Weniger bekannt ist ihre Fähigkeit, die Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen zu verbessern. Wirken nämlich energiereiche Gamma- oder Betastrahlen auf Kunststoffbauteile ein, lösen sie im Material chemische Reaktionen aus, wobei sich

die Moleküle vernetzen – vergleichbar mit der Vulkanisation bei Kautschuken. Als unmittelbare Folge erhöht sich die Haltbarkeit beziehungsweise Belastbarkeit der behandelten Produkte.

Nach der Bestrahlung weisen die Kunststoffteile signifikant verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Hitzebeständigkeit, Stabilität, Kriechverhalten oder Abriebfestigkeit auf. Mit der Strahlenvernetzung erhalten die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften von Massen- und technischen Kunststoffen sozusagen ein Upgrading:

So haben sie nach der Behandlung Eigenschaften, die an das Eigenschaftsprofil von Hochleistungskunststoffen heranreichen und diese in bestimmten Anwendungen ersetzen.

AUTOREN



Dipl.-Ing. Sebastian Schmitz
ist Key Account Manager bei BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG in Wiehl.



Dr. Dirk Fischer
ist Leiter der Anwendungsentwicklung bei BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG in Wiehl.

Strahlenvernetzung veredelt Kunststoffe in der Serienproduktion

PHYSIKALISCHE STRAHLENVERNETZUNG

In der Technik werden in der Regel hochenergetische Betastrahlen für die physikalische Strahlenvernetzung verwendet. Um die gewünschten Materialeigenschaften zu erzielen, wird die Vernetzung der Kunststoffmoleküle mit einer exakt festgelegten Strahlendosis gesteuert. Betastrahlen sind beschleunigte Elektronen und werden durch Elektronenbeschleuniger erzeugt, die im Prinzip mit einer Braunschen Röhre vergleichbar sind: Eine Glühkathode emittiert Elektronen, die in einem Hochvakuum und unter Einfluss eines starken elektrischen Felds beschleunigt werden. In diesem zyklischen Wechselfeld erreichen die Elektronen in mehreren Stufen eine maximale Energie von 10 MeV (4,45^{e-19} kWh). Der aus dem Beschleuniger austretende Elektronenstrahl wird dann in einem magnetischen Wechselfeld so abgelenkt, dass er aufgefächert auf die zu bestrahlenden Produkte trifft, **BILD 1**.

Die Produkte laufen mithilfe einer automatisierten Transportanlage durch das Bestrahlungsfeld; der Bestrahlungsprozess dauert nur wenige Sekunden, wobei das Material die Strahlungsenergie absorbiert. Chemische Bindungen werden gespalten, es entstehen freie Radikale. Diese gehen im nächsten Schritt die gewünschte Molekularverbindung ein. Auf diese Weise entsteht ein extrem belastbares dreidimensionales Polymernetzwerk, **BILD 2**. Die Strahlenvernetzung eignet sich grundsätzlich für alle Kunststoffe, bei denen auch die chemische Vernetzung mittels radikalischer Initiatoren (zum Beispiel Peroxiden) möglich ist. Anders als bei den chemischen Vernetzungsverfahren findet die Strahlenvernetzung als physikalisches

Verfahren bei niedrigen Temperaturen statt. Die Qualität der Ergebnisse ist in einem hohen Maß reproduzierbar. Bei BGS Beta-Gamma-Service werden im Wesentlichen Polyethylen (PE), Polyamide (PA) und Polybutylenterephthalat (PBT) vernetzt; thermoplastische Elastomere (TPE) gewinnen mengenmäßig zunehmend an Bedeutung.

Nach der Strahlenvernetzung können Kunststoffe unter Bedingungen eingesetzt werden, denen sie ansonsten nicht standhalten würden. Die Strahlenvernetzung findet grundsätzlich nach der Formgebung statt – das Spritzgießen, Extrudieren, Blas- oder Thermoformen nimmt wie gewohnt der Hersteller mit den üblichen Rohstoffen vor. Welches Eigenschaftsspektrum sich erzielen lässt, hängt vom jeweiligen Basispoly-

mer ab. Für einige Kunststoffe sind spezielle Additive erforderlich. Die Zugabe dieser Vernetzungsadditive kann bei der Herstellung des Kunststoffgranulates (Compoundieren) oder unmittelbar vor der Formgebung (zum Beispiel als Masterbatch) erfolgen. Die Additive ermöglichen oder verbessern die Vernetzbarkeit und können die Eigenschaftsprofile des Kunststoffs weiter optimieren. Zum Einsatz kommen die aus der Kunststoff- und Kautschukindustrie bekannten Vernetzungshilfen, wie zum Beispiel TAIC. Zur Beurteilung der erzielten Eigenschaftsveränderungen werden im Anschluss an die Bestrahlung spezielle Werkstoffprüfungen durchgeführt.

In **BILD 3** sind technisch relevante Kunststoffe in einer Leistungspyramide

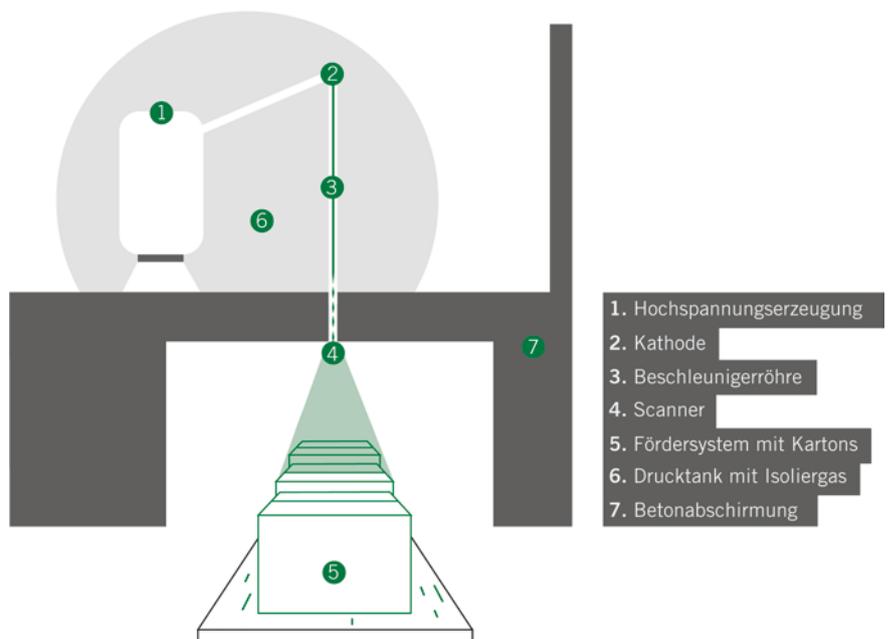


BILD 1 Schematischer Aufbau eines Elektronenbeschleunigers (© BGS)

	Bezeichnung	Vernetzungsadditiv	
		Ja	Nein
Thermoplaste	Polyethylen PE (LLDPE/LDPE/MDPE/HDPE/ UHMWPE)		X
	Polyamid PA (PA6, PA66, PA11, PA12)	X	
	Polybutylenterephthalat (PBT)	X	
	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	X	
	Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer (ETFE)	X	
	Polypropylen PP (Homo-/Copolymere)	X	
	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVAC)		X
	Polyvinylchlorid PVC (Weich-PVC beziehungsweise PVC-P)	X	
	Poly lactide (PLA)	X	
Thermoplastische Elastomere	Thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis (TPE-O beziehungsweise TPO)	X	
	Thermoplastische Polyesterelastomere (TPE-E beziehungsweise TPC)		X
	Thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis (TPE-U beziehungsweise TPU)	X	
	Thermoplastische Polyamidelastomere (TPE-A beziehungsweise TPA)		X
	Polyurethane (PUR)	X	
Elastomere	Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	X	
	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuke (EPDM)		X
	Silikonkautschuk		X

TABELLE 1 Strahlenvernetzbare Polymere (© BGS)

dargestellt. Basis sind preiswerte Masenkunststoffe oder technische Kunststoffe, die mithilfe der Strahlenvernetzung die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften von Hochleistungskunststoffen erreichen können, die sich in dieser Darstellung in der Pyramidenspitze versammeln.

TABELLE 1 gibt eine Übersicht über strahlenvernetzbare Polymere.

THERMISCHE EIGENSCHAFTSVERBESSERUNGEN

Thermoplastische Materialien werden bei der Strahlenvernetzung thermoelastisch. Durch die Vernetzungsreaktion entsteht ein Netzwerk, das die Fließfähigkeit des Kunststoffs unterbindet – bei höheren Temperaturen verhält sich das Material wie ein Elastomer. Die verbesserte Temperaturbeständigkeit und die bei erhöhten Temperaturen deutlich verbesserten mechanischen Kennwerte sind wesentliche Kennzeichen der Strahlenvernetzung. Wie in BILD 4 dargestellt, fallen bei unvernetztem

PA66 die Moduln oberhalb der Kristallit-schmelztemperatur praktisch auf Null.

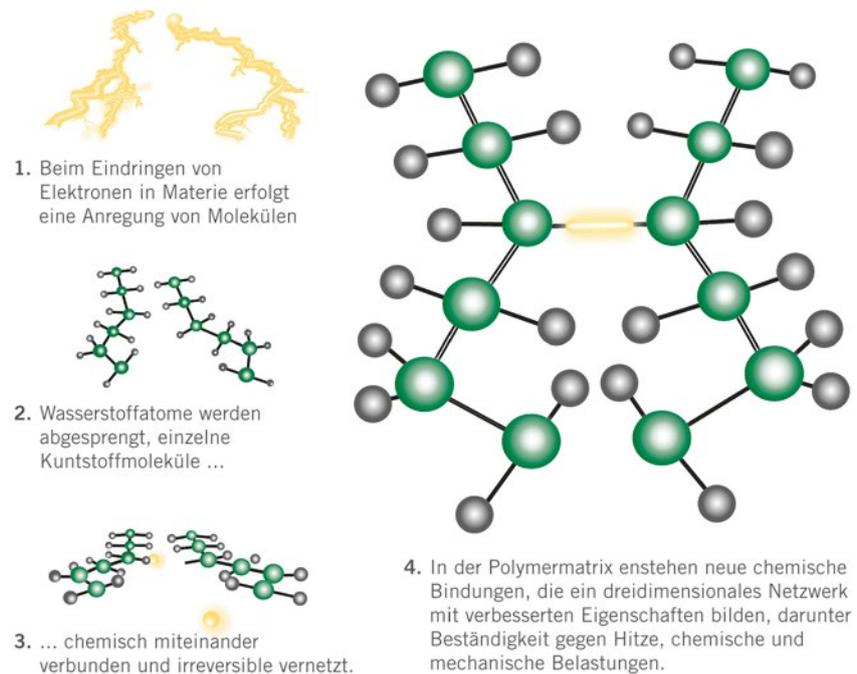


BILD 2 Vernetzung von Makromolekülen (© BGS)

Dagegen gewährleisten die wesentlich höheren Moduln eines vernetzten Kunststoffs eine ausreichend hohe Festigkeit auch bei Temperaturen von mehr als 350 °C. Zusätzlich verringert sich der thermische Ausdehnungskoeffizient. Ein vernetztes PA66 weist einen um 20 °C verbesserten Temperaturindex auf (5000 h; 60 % Abfall der Bruchdehnung).

MECHANISCHE EIGENSCHAFTSVERBESSERUNG

Die Strahlenvernetzung verbessert die mechanische Festigkeit verstärkter Kunststoffe schon bei Raumtemperatur. Hierzu trägt vor allem die bessere Ankopplung der Füllstoffe an die Polymermatrix bei, die durch eine Aktivierung der Grenzflächen verursacht wird. Auch die Schweißnahtfestigkeit an vibrationsgeschweißten Bauteilen sowie die Verbundfestigkeit zwischen Materialkombinationen (zum Beispiel Polymer/Polymer und Polymer/Metall) werden durch die Strahlenvernetzung erhöht. Die Anforderungen an die Werkstoffe für Getriebe und Gleitkomponenten, wie Zahnräder, Lager- und Gleitbuchsen, haben sich deutlich erhöht. Strahlenvernetzte Bauteile können hier eine wirtschaftliche Alternative zu metallischen Werkstoffen oder teuren Polymeren (PEEK, PAI etc.) sein.

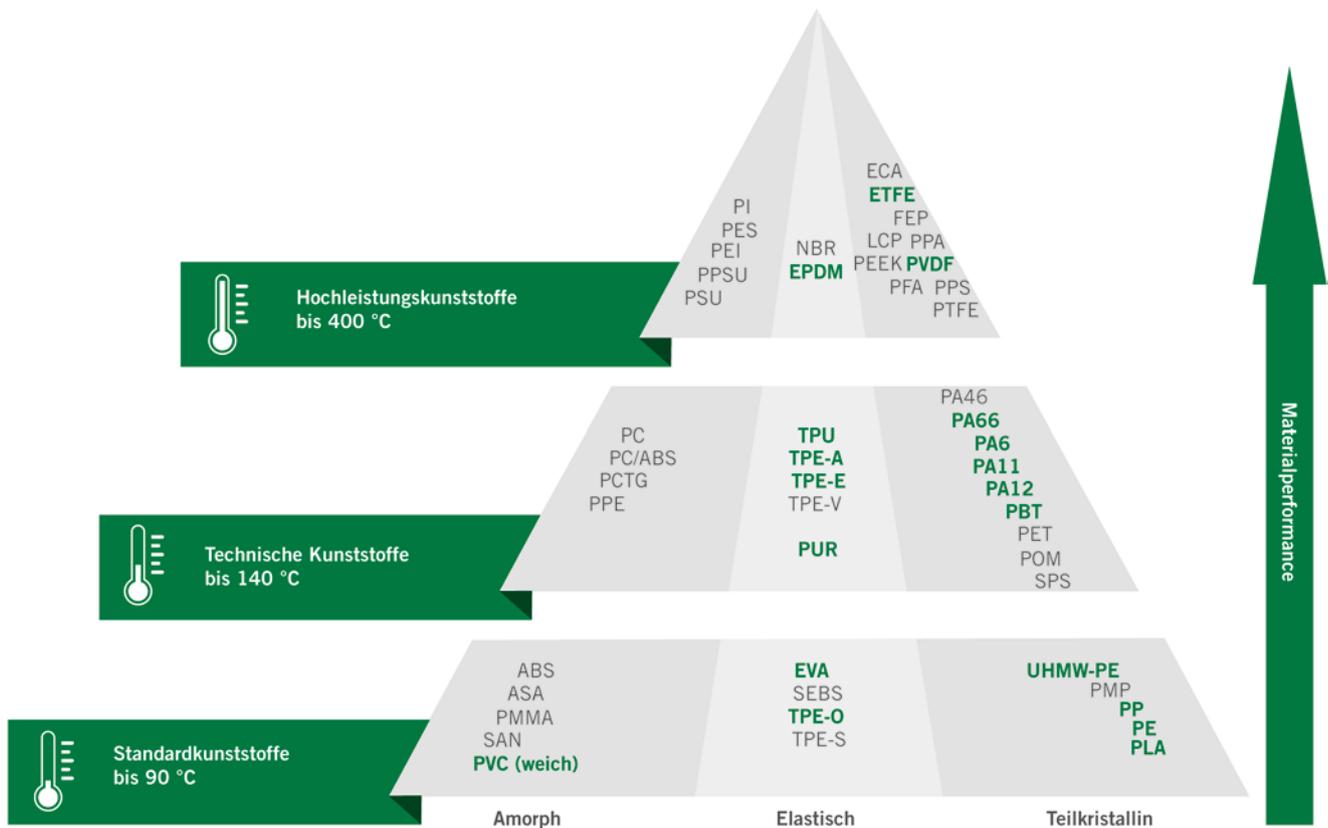


BILD 3 Upgrading durch Strahlenvernetzung: Die farblich markierten Polymere eignen sich für die Strahlenvernetzung (© BGS)

TRIBOLOGISCHE EIGENSCHAFTSVERBESSERUNG

Ein wichtiges Auswahlkriterium für Maschinenelemente aus Kunststoff ist deren Reibungs- und Verschleißverhalten. Bei immer höheren Einsatztemperaturen verkürzen Reibung und Verschleiß die Lebensdauer von Gleitlagern und Zahnrädern. In der Regel weisen die herstellungsbedingt an der Oberfläche von Kunststoffbauteilen erhöhten amorphen Anteile im Material ein ungünstiges Verschleißverhalten auf. Gerade diese amorphen Bereiche sind jedoch besonders gut strahlenvernetzbar, wodurch sich wesentlich höhere Gleitgeschwindigkeiten bei gleichzeitig reduziertem Verschleißkoeffizienten erzielen lassen. Beispielsweise hat unvernetztes Polyamid bei einer Belastung durch Reibung eine Einsatzgrenze von 120 °C. Die Strahlenvernetzung verhindert ein Aufschmelzen des Werkstoffs und erhöht die Dauereinsatztemperatur um bis zu 100 °C bei gleichzeitig verringerter Verschleißrate. Zahnräder aus strahlenvernetztem Kunststoff können somit

Bauteile aus Metall ersetzen und sind dabei wesentlich leichter.

CHEMISCHE EIGENSCHAFTSVERBESSERUNG

Die Vernetzung von Kunststoffen verringert die Löslichkeit beziehungsweise die Quellung durch Lösungsmittel deutlich. Dies wird beispielsweise zur Bestimmung des Vernetzungsgrads durch den Extraktionsversuch genutzt. Der so

ermittelte Gel-Wert korreliert direkt mit dem Vernetzungsgrad: Nimmt der Vernetzungsgrad zu, sinkt gleichzeitig der Quellungsgrad. Gleichmaßen verbessert die Strahlenvernetzung die Beständigkeit gegen aggressive Medien (zum Beispiel Bremsflüssigkeit oder Elektrolyte) und Hydrolyse. Dies zeigt sich beispielsweise in verbesserter Spannungsrisssbeständigkeit und deutlich reduziertem Festigkeitsabfall nach Einwirkung von Lösungsmitteln.

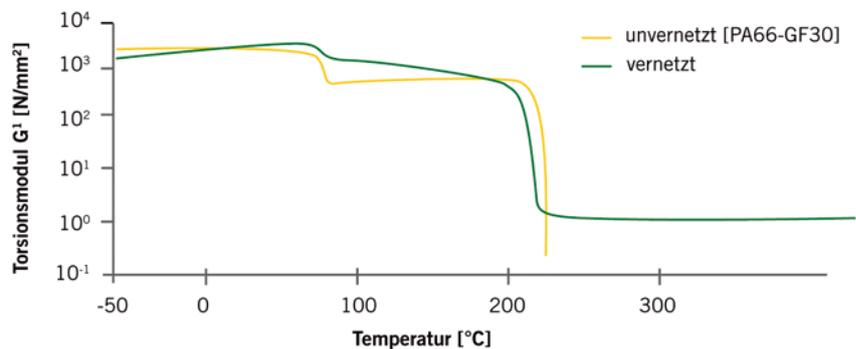


BILD 4 Wärmeformbeständigkeit von strahlenvernetztem PA66 (© BGS)

Werkstoff	Spritztemperatur	Werkzeugtemperatur
PEI	350–400 °C	135–170 °C
PES	330–380 °C	120–170 °C
PPS	300–370 °C	125–160 °C
PEEK	360–400 °C	150–210 °C
PA-X*	240–290 °C	60–100 °C

*Strahlenvernetzbares PA

TABELLE 2 Verarbeitungstemperaturen unterschiedlicher Polymere (© BGS)

WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE DER STRAHLENVERNETZUNG

Ein direkter Vergleich der Beschaffungskosten von Hochleistungskunststoffen und strahlenvernetzten Polymeren zeigt ein deutliches Einsparpotenzial. Je nach Höhe der Beschaffungskosten für den jeweiligen Hochleistungskunststoff kann die Substitution durch ein strahlenvernetztes Material zu erheblichen direkten Einsparungen führen. Noch deutlicher wird das Einsparpotenzial, wenn neben den Aufwendungen für das Granulat auch die Prozesskosten für die Herstellung der Bauteile betrachtet werden. Gegenüber Hochleistungskunststoffen zeichnen sich strahlenvernetzbar Compounds vor allem durch ihre einfachere Verarbeitung aus. Insbesondere die geringeren Verarbeitungstemperaturen strahlenvernetzbarer Polymere im Vergleich zu Hochleistungskunststoffen und der gegenüber Thermosets geringe Aufwand für die Nachbearbeitung wirken sich positiv auf die Herstellkosten aus, wie aus **TABELLE 2** anhand eines strahlenvernetzten Polyamids hervorgeht.

Geringerer Energieverbrauch, kürzere Zykluszeiten sowie geringere Werkzeugkosten bei einer längeren Standzeit haben einen direkten Einfluss auf die Herstellkosten der Bauteile. Der größte Nutzen der Strahlenvernetzung kann ausgeschöpft werden, wenn das strahlenvernetzte Material schon zu Beginn des Entwicklungsprozesses eingeplant wird und nicht erst durch einen Substitutionsprozess zur Anwendung kommt.

ANWENDUNGEN IM AUTOMOBILBAU

Kunststoffe werden als Rohstoffe in der Automobilindustrie immer wichtiger.

Gleichzeitig unterliegen die Materialien hohen thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchungen. Hier bietet sich die Strahlenvernetzung als Lösung an, um so das Einsatzspektrum kostengünstiger und bereits eingeführter Materialien (zum Beispiel PA) zu erweitern. Dies hilft, Rohstoffkosten zu sparen und ermöglicht gleichzeitig, die steigende Vielfalt an Rohstoffen einzugrenzen. Sind die Kunststoffe zusätzlich neben hohen Temperaturen beispielsweise aggressiven Medien oder hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, verbessert die Strahlenvernetzung das Alterungsverhalten. Auch thermoplastische Elastomere, deren Einsatz häufig durch unzureichende Druckverformungsreste beschränkt ist, können durch Strahlenvernetzung so optimiert werden, dass sie die hohen Anforderungen im Fahrzeugbau erfüllen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind beispielsweise Elastomerdichtungen, die im Zwei-Komponenten-Spritzguss hergestellt und anschließend strahlenvernetzt werden. Eine geeignete Werkstoffkombination vorausgesetzt, werden das Gehäuse und die eingespritzte TPE-Dichtung in einem Arbeitsgang vernetzt.

Befestigungselemente wie Schrauben und Muttern, Halterungen oder Klipps aus Metall lassen sich durch strahlenvernetztes Polyamid substituieren. Die große Anzahl solcher Befestigungselemente im und am Fahrzeug ermöglicht in diesem Bereich eine Gewichtsreduktion um einen Faktor >5. Das trägt sowohl zu Einsparungen beim Gesamtgewicht als auch bei den Herstellungskosten (Metallbearbeitung versus Spritzguss) bei. Denkbar sind zudem tragende Karosseriebauteile zum Beispiel aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen.

Multimaterialbauweisen sollen die an sie gestellten Anforderungen bei minimalem Gewicht erfüllen. Thermoplastische Organobleche werden dabei auch in der Großserie wichtiger. Strahlenvernetzte Bauteile, die fester sind und eine höhere Wärmeformbeständigkeit aufweisen, beschleunigen die Prozesse einer 3-D-Thermo-Umformung.

Die Temperaturentwicklung in LED-Scheinwerfern ist aufgrund der kompakten Bauweise und der Leistungselektronik höher als in herkömmlichen Scheinwerfersystemen. Das Anforderungsprofil an Gehäusebauteile und vor allem an die Reflektoren ändert sich deutlich – und ist mittels der Strahlenvernetzung erfüllbar.

Elektrofahrzeuge verfügen zum Teil über 800-V-Akkus, die sich mit bis zu 350 kW an Schnell-Ladestationen laden lassen. Beim Einsatz von Gleichstrom kann die Stromstärke dabei bis zu 500 A betragen. Ebenso erfordert der Energietransfer vom Akku zum Antrieb Kabelsysteme mit großen Leiterquerschnitten und temperaturbeständigen Isolationswerkstoffen, die mittels Strahlenvernetzung preiswert hergestellt werden können.

ZUSAMMENFASSUNG

Stetig wachsende Anforderungen an einen niedrigen Kraftstoffverbrauch, geringere Emissionen und eine bessere CO₂-Bilanz fordern leichte Werkstoffe. Kunststoffe überzeugen oft mit ihrem Leichtbaupotenzial, müssen aber je nach Anwendung hohen Temperaturen und extremen Bedingungen widerstehen. Um herkömmliche Kunststoffe für entsprechende Aufgaben zu qualifizieren, eignet sich die sogenannte Strahlenvernetzung.

Durch Strahlenvernetzung lassen sich die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften von Massenkunststoffen und technischen Kunststoffen mittels Betastrahlen derart verbessern, dass sie die Qualität von Hochleistungskunststoffen annehmen und diese ersetzen können. Kunststoffkomponenten erreichen signifikant verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Hitzebeständigkeit, Stabilität, Kriechverhalten und Abriebfestigkeit. Darüber hinaus sorgen sie für eine deutlich geringere Geräuschemission und benötigen keine Schmiermittel.