

Hingucker unter der Haube

Eigenschafts- und Kostenoptimierung in der Produktion von Motordesignhauben

Sichtbare Bauteile im Motorraum eines Fahrzeugs müssen neben technischen Anforderungen immer öfter auch Designansprüchen genügen. So soll eine Motorabdeckung attraktive und abwechslungsreiche Oberflächen bieten. Dass dies nicht nur mit Polyamid, sondern auch mit glasfaserverstärktem Polypropylen möglich ist, wurde an einem VW-Serienbauteil gezeigt.

Die Mobilität der Zukunft erfordert hohe Sicherheit, guten Komfort, weitreichende Energieeffizienz und umweltfreundliche Verfahren sowie Produkte. Derzeit werden viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten massiv von den gesetzlichen Emissionsrestriktionen bestimmt, mit deutlichem Schwerpunkt auf niedrigerem CO₂-Ausstoß. Dafür müssen die Fahrzeuge u.a. leichter werden, was

Werkstoffe mit geringer Dichte zu einer interessanten Alternative macht. Neben den technischen Anforderungen müssen designrelevante Bauteile auch mit neuen Materialien attraktive und abwechslungsreiche Oberflächen aufweisen.

Sichtbare Oberflächen, auch im Motorraum eines Fahrzeugs, werden immer öfter von Designern nach strengen Kriterien bewertet, um über Gestaltungs-

elemente den Charakter der Marke einfließen zu lassen. Motordesignabdeckungen gehören zu den wichtigsten optisch relevanten Bauteilen des Motorraums. Bei der Materialumstellung einer Motordesignhaube von Polyamid (PA)-Compound auf ein Polypropylen (PP)-Compound arbeiteten die Volkswagen AG, Wolfsburg, und die LyondellBasell Industries Holdings B.V., Rotterdam/Niederlande, zusammen (**Titelbild**). Im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts wurde für diese anspruchsvolle Anwendung eine Abdeckung hergestellt und getestet, die im Vergleich zum vorher verwendeten Material um 25% leichter, während der Produktion bis zu 32% energieeffizienter ist und niedrigere Materialkosten sowie eine verbesserte Geräuschkämpfung aufweist.

Anforderungen an den Kunststoff

Neben der Gewichtseinsparung bieten polymere Werkstoffe weitere Vorteile wie Designfreiheit und Funktionsintegration, wobei genau definierte Materialeigenschaften erfüllt werden müssen. Für Designer und Produktentwickler bedeuten die daraus resultierenden divergierenden Produkthanforderungen ein komplexes Spannungsfeld. Eine exzellente Designqualität und eine hochwertige Verarbeitung führen dazu, dass vor allem dem Endkunden der Unterschied zwischen hochwertigem Kunststoff und billigem Plastik sichtbar gemacht wird.

Diese Ziele konnten in dem gemeinsamen Projekt mit dem glasfaserverstärktem PP-Compound Hostacom ERG 393F (Hersteller: LyondellBasell) erreicht



Anhand einer Motorabdeckung wurde gezeigt, dass das glasfaserverstärkte PP-Compound Hostacom ERG 393F mit dem Serienmaterial PA technisch und optisch mithalten kann. Außerdem ist es günstiger und energieeffizienter in der Verarbeitung (© LyondellBasell)

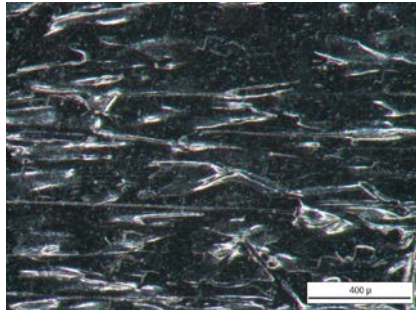
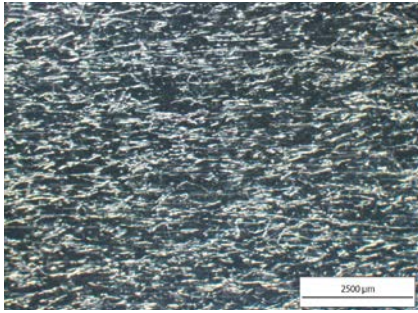


Bild 1. REM-Aufnahmen von herkömmlichen glasfaserverstärkten PP-Compounds zeigen die durch hervorstehende Fasern raue und unregelmäßige Oberfläche. Da auch die Motorabdeckung mittlerweile als Sichtbauteil gilt, musste dies vermieden werden (© LyondellBasell)

werden. Entgegen marktüblicher Compounds zeigt dieses Material keine bzw. deutlich weniger die typischen Glasfaserschlieren an den Bauteiloberflächen. Diese optische Eigenschaft öffnet ein neues Anwendungsgebiet im Automobilbereich: Strukturmaterialien für den Sichtbereich.

Damit eine problemlose Verarbeitung gewährleistet wird, ist die gute Fließfähigkeit des Materials eine der Schlüsseleigenschaften. Zusätzlich weist Hostacom ERG 393F eine gute Wärmealterungsbeständigkeit auf, die für die Anwendung im Motorraum erforderlich ist. Andere mechanische Anforderungen orientieren sich an denen des Serienmaterials und bestehen in einer guten Schlagzähigkeit, die aufgrund der notwendigen Montage und Demontage des Bauteils gefordert ist, aber auch in einer ausreichenden Steifigkeit. Hostacom ERG 393F weist hierbei ein sehr gut ausgewogenes Leistungsvermögen zwischen Steifigkeit und Zähigkeit auf.

Bei der Materialauswahl wurden verschiedene Werkstofftypen in Erwägung gezogen. Nach dem Screening zeigte sich, dass das PP-GF20 Hostacom ERG 393F die besten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächengüte und Verarbeitung zeigt und die Anforderungen an Wärmealterungsbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften erfüllt.

Polyamid zuverlässig ersetzen

Als Referenz für die wichtigen Eigenschaften liegt PA-Compound als häufigster Serien-Werkstoff für diese Anwendung zugrunde. Im ersten Vergleich der Datenblatt-Werte sowie durch das allgemeine Materialverständnis wird klar, dass PP im Vergleich zu PA deutlich frü-

her erweicht (niedrigerer Schmelzpunkt, PP ca. 160 °C, PA6 ca. 220 °C), bei zunehmender Temperatur eine geringere mechanische Festigkeit aufweist und gegenüber Alterung an warmer Luft empfindlicher reagiert. Letzteres ist für dieses Bauteil der wichtigste Faktor, da die Designhaube über längere Zeit konstant erhöhten Temperaturen standhalten muss, die das Bauteil belasten.

Aus bisherigen Erfahrungen mit anderen Bauteilen hat sich gezeigt, dass PP über längere Zeit bei bis zu 110 °C einsetzbar ist, wobei auch Spitzentemperaturen bis 130 °C bei entsprechend mechanischer Auslegung oder geringer Belastung des Bauteils verkraftet werden können. Mechanisch unbelastete Bauteile, die nur der Belastung durch ihr Eigengewicht bzw. Beschleunigung durch Motor-/Fahrzeug-Bewegung ausgesetzt sind, sind eher mit einem PP realisierbar, als mechanisch hoch belastete Komponenten. Aber selbst für stark beanspruchte Komponenten werden mittlerweile PP-Compounds eingesetzt, beispielsweise für das Saugrohr einiger Multi-Point-Injection (MPI)-Motoren.

Gemäß den aktuellen Standards bei VW muss die Alterungsbeständigkeit eines Materials über mindestens 1000 h bei 150 °C (Warm-Umluft-Ofen) nachgewiesen werden. Wichtigstes Kriterium nach Alterung ist ein weiterhin integres Bauteil. Die PP-typischen Zersetzungerscheinungen (Degradation des Polymers, starke Verfärbung) dürfen nicht auftreten. Da die Motordesignhaube ein Bauteil mit optischen Ansprüchen ist, darf nach Alterung keine oder nur eine geringe, allerdings gleichmäßige Verfärbung sichtbar sein. Polyamide neigen beispielsweise nach der Alterung zu einer leichten bräunlichen bis gräulichen »

Bild 2. Die Motor-designhaube aus nicht-optimiertem PP-Compound im Anlieferungszustand (rechts) zeigt eine deutliche Degradierung des Polymers nach 500h Wärmealterung (links)



Färbung. PP-Typen zeigen, wenn die Stabilisierung entsprechend ausgelegt ist, dieses Verhalten nicht.

Neben diesen Anforderungen spielt auch die Änderung der mechanischen Eigenschaften nach Alterung eine Rolle. Diese sollte über die Fahrzeuglebensdauer so gering wie möglich ausfallen, um auch bei regelmäßigem Handling des Bauteils durch Wartungsarbeiten eine Haltbarkeit zu gewährleisten.

Neben den Anforderungen bei Wärme und nach Wärmealterung sind auch die Tieftemperatureigenschaften von Interesse. Eine mangelnde Kälteflexibilität kann zu einer Zerstörung des Bauteils bei Demontage in Niedertemperaturumgebung führen. Des Weiteren soll in kalter Umgebung bei einem Kontakt der Abdeckung mit mechanischer Schlagbelastung (beispielsweise ein fallengelassener Schraubenschlüssel bei geöffneter Motorhaube) kein Bruch eintreten. Ein Kugelfalltest soll diese Kälteflexibilität bewerten, je nachdem ob Weißbruch an den Bauteilen entsteht bzw. die Probe bricht. Bei Letzterem könnte auch das

spätere Bauteil beim Handling in der Kälte brechen.

Schließlich zeigen Dauerfahrversuche ob sich PP für diese Anwendung eignet. Hier wird analysiert, an welchen Aggregaten und in welcher Fahrzeugkombination die Temperaturen am Bauteil potenziell am höchsten ausfallen und gleichzeitig, ob diese von einem PP durch die gesteckten Rahmenbedingungen bewältigt werden können. Diese Tests finden in einer Warmlandumgebung mit permanent erhöhter Umgebungstemperatur statt, um eine maximal mögliche Belastung zu simulieren und für die allgemeine Anwendung eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten.

Oberfläche von Motordesignhauben

Motorabdeckungen sind Designbauteile die eine hohe Oberflächenqualität aufweisen müssen. Durch den Faseranteil in Kunststoffcompounds werden typischerweise Glasfasern an der Oberfläche sichtbar (**Bild 1**). Es ist bekannt, dass die

Glasfasern bei zunehmender Wärmealterung der PP-Matrix stärker sichtbar werden. Hostacom ERG 393F weist hier eine sehr gute Oberflächenqualität auf. An genarbten Strukturen sind die typischen Glasfaserbestandteile nicht und selbst auf glänzenden Oberflächen nur gering sichtbar (**Titelbild**).

Zur Labor-Validierung sind verschiedene PP-Compounds ausgewählt worden, die in den Eigenschaften mit dem aktuell in Serie befindlichen Material für viele Designhauben verglichen wurden:

- PA6-MD30 (30 % Talkumanteil – zurzeit in Serie eingesetzt),
- PP-Compound (20 % Glasfaser; 10 % Talkum),
- PP-Compound (Hostacom, 20 % GF),
- PP-Compound (Hostacom, 30 % GF),
- PP-Compound (Hostacom, 40 % GF).

Die mechanischen Materialeigenschaften der PP-Compounds liegen erwartungsgemäß unterhalb derer des Serienmaterials, sind aber für den Anwendungsfall durchaus ausreichend. In einem ersten Versuch sind die mechanischen Eigenschaften an Zugprüfkörpern unter Normalbedingungen und nach Wärmealterung ermittelt worden. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Materialien bis auf eine Ausnahme keine ausreichende Wärmealterungsstabilisierung aufwiesen. Die Stabilität hat ab etwa 500h Wärmelagerung rapide abgenommen, was zu einer vollständigen Degradation des Polymers und somit zum Bauteilversagen geführt hat (**Bild 2**). Die nicht ausreichend stabilisierten PP-Typen sind den Gegebenheiten angepasst und erneut geprüft worden. In dieser optimierten Charge ist nur noch ein Material ausgefallen, das ursprünglich für Innen-

Eigenschaften	Norm	Einheit	Hostacom ERG 393F Black	
			Vor Wärmelagerung	Nach Wärmelagerung 1000 h / 150°C
Zug-E-Modul (bis Bruch)	ISO 527/1+2	[N/mm ²]	4400	5400
Streckspannung	ISO 527/1+2	[N/mm ²]	70	-
Streckdehnung	ISO 527/1+2	[%]	3,1	-
Zugfestigkeit	ISO 527/1+2	[N/mm ²]	69,7	76,9
Bruchspannung	ISO 527/1+2	[N/mm ²]	68,7	76,8
Bruchdehnung	ISO 527/1+2	[%]	3,5	2,6
Biege-E-Modul	ISO 178	[N/mm ²]	4300	5400
Biegespannung bei 3,5% Dehnung	ISO 178	[N/mm ²]	97	0
Biegedehnung bei Biegefestigkeit	ISO 178	[%]	4,8	3,1
Biegefestigkeit	ISO 178	[N/mm ²]	102,1	114,8
Charpy-Kerbschlagzähigkeit 23 °C	ISO 179/1eA	[kJ/m ²]	9,4	9,5

Tabelle 1. Ergebnisse vor und nach Wärmelagerung des ausgewählten PP-GF Hostacom ERG 393F Black. Die mechanischen Materialeigenschaften liegen zwar unterhalb des Serienmaterials, sind aber für den Anwendungsfall ausreichend (Quelle: LyondellBasell)

raum-Anwendungen entwickelt wurde, zeitgleich aber im Anlieferungszustand eine nicht ausreichend gute Optik aufweist.

Abschließend haben sich zwei Werkstofftypen bei der Laborprüfung als besonders interessant herausgestellt: ein 30% glasfaserverstärktes PP-Compound und das Hostacom-Material. Letzteres nahm aufgrund der sehr guten Oberflächenqualität, Wärmestabilisierung (**Tabelle 1**), der erhöhten Kälteflexibilität und der weltweiten Verfügbarkeit (Produktion in NAFTA, EU, Asien) früh die Favoritenrolle ein. Mit diesem Material sind weitere Versuchsbauteile gefertigt und Dauerfahrversuche erfolgreich durchgeführt worden.

Experimentelle Untersuchung der Abformbarkeit beim Spritzgießen

Die Firma Weber GmbH & Co. KG, Dillenburg, ist ein langjähriger Zulieferer von Volkswagen, der sich auf die Herstellung von Motordesignhauben spezialisiert hat. Im Rahmen des Projekts wurde es seitens Weber ermöglicht, eine vollständige Abformbarkeitsprüfung von diversen PP-Typen mit vorhandenem Serien-Equipment zu untersuchen. Für alle Spritzgießversuche kam eine Maschine Typ Demag D 500-5 sowie das Serienspritzgießwerkzeug inkl. der zugehöri-

gen Peripherie, wie Temperiergeräte, Handling etc., zum Einsatz.

Als Objekt für die Untersuchungen wurde die Designhaube von einem Audi gewählt, die mit einer anspruchsvoll designten Kontur und der Vermischung von mehreren Fließfronten als komplex eingestuft wird. Außerdem sind die Herstellung der Abdeckung mit mehreren Angüssen, verschiedene Narbentypen (fein bis grob) und deren Übergänge sowie scharfe Konturen und Freischnitte zusätzliche Herausforderungen. Durch die großen sichtbaren Flächen dürfen keine Schlieren entstehen, was bei der gewählten Geometrie bereits Werkzeugauslegung und Spritzgießparameter beeinflusst.

Das Spritzgießwerkzeug besteht aus einer Kavität mit Heißkanalumlenkung, Kaltkanalverteiler und Punktanguss. Die Werkzeugtemperierung verlief über sieben Temperaturzonen mittels zwei Temperiergeräten, wobei als Heizmedium Wasser genutzt wird. Die Temperiergeräte wurden über die Maschinensteuerung angeschlossen.

Das Spritzgießwerkzeug wurde für ein PA-Compound ausgelegt. Das Angussystem erfüllt die Anforderungen an reproduzierbare Produktion, wie z.B. das Einspritzvolumen während der Kavitätsfüllung, eine homogene Temperaturführung und kurze Fließwege. Von gro- »

Die Autoren

Dr. Branislav Zlatkov ist im Bereich Produktinnovation bei der Volkswagen AG tätig.

Daniel Scholz ist für die Qualitätssicherung, Werkstofftechnik Polymere, Fahrwerk/Aggregate bei der Volkswagen AG zuständig.

Alistar James arbeitet im Bereich Fahrzeugintegration Antrieb bei der Volkswagen AG.

Bernd Laue ist für die Technologieentwicklung Werkstoffe & Verfahren bei der Audi AG zuständig.

Markus Thurmeier befasst sich mit der Entwicklung faserverstärkter Kunststoffe/Leichtbau bei der Audi AG.

Dr. Dieter Langenfelder betreut das Product Development Generic bei der Basell Polyolefine GmbH.

Dr. Erik Licht ist Manager Business Development, PP Compounds Europe bei Basell Deutschland GmbH.

Mark Nowag arbeitet als Customer Project Manager VW Group bei der Basell Deutschland GmbH.

Klaus Klemm ist Customer Project Manager Generic bei Basell Deutschland GmbH.

Dank

Für die Unterstützung während der Versuchsdurchführung möchten wir uns bei der Firma Weber GmbH & Co. KG, Dillenburg, bedanken. Herrn Franz Peter, Leiter Anwendungstechnik, möchten wir besonderen Dank für den operativen Beitrag bei der Findung von optimalen Prozessparametern aussprechen.

Service

Digitalversion

➤ Ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2867611

English Version

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

Über Bedeutung war es, den Füllvorgang so zu gestalten, dass das Material ohne Einfallstellen und Bildung von Fließfronten die Kavität ausfüllen kann. Das Serien-Spritzgießwerkzeug enthielt zwei Einspritzpunkte. Die Angüsse waren so ausgelegt, dass diese beim Entformungsvorgang automatisch vom Spritzgießbauteil getrennt wurden. Zur Regelung der Spritzgießmaschine (Umschaltung auf Nachdruck) kam die volumenabhängige Einstellung zum Einsatz. Zusammenfassend war der Spritzvorgang so gestaltet, dass möglichst keine Abweichungen am Versuchsfeld gegenüber der Serienproduktion auftreten.

Der Ablauf wurde wie folgt festgelegt:

- Mittels Qualitätstabelle aus der Spritzgießmaschine wurden die Verarbeitungsparameter definiert, die während der Versuche aufgenommen wurden und in der Qualitätstabelle abgespeichert werden sollen.
- Auf der entsprechend eingerichteten Spritzgießmaschine wurden 50 qualitativ und optisch hochwertige Motordesignhauben hergestellt, abgemustert, fertig bearbeitet und protokolliert.
- Bei dem Materialwechsel wurde die ganze Materialzufuhrkette überprüft und sichergestellt, dass keine Verwechslung des Materials stattfinden kann bzw. dass die Plastifiziereinheit gereinigt wurde.
- Nachdem die optimale Qualität (frei von Einfallstellen, keine Schlieren) erreicht wurde, fanden mit dem neuem Material die Versuche wie vorher statt.
- Anschließend erfolgten die Validierung der Massekonstanz, Verzugsgrad, Schwindung und optische Beurteilung.

Nach einer ersten Bewertung entsprach das Kunststoff-Compound Hostacom ERG 393F (PP-GF20) allen Anforderungen.

Weniger Energie bei der Verarbeitung

Das PP-Compound füllte die Werkzeugkavität problemlos, die sichtbare Oberfläche wies jedoch regelmäßig, aber unterschiedlich stark Einfallstellen bzw. Schlieren auf. Die Prozessführung war aufgrund gelegentlicher optischer Fehler nicht reproduzierbar. Aus diesem Grund wurde einer der beiden Einspritzpunkte durch eine Blende verschlossen, sodass das Einspritzen nur noch durch einen Anguss stattfand. Dadurch ließen sich die optischen Anforderungen erreichen. Eine asymmetrische Abkühlung des Formteils und die Nachdruckzeit begründeten beispielhaft einen leichten Verzug. Dies wurde aber nicht als kritisch bewertet.

Weitere Fragestellungen waren die Schwindung nach dem vollständigen Abkühlen und wie sich die unterschiedliche Materialschwindung auf die Maßänderungen der Motordesignhaube auswirkt. Einerseits handelt es sich bei PA- und PP-Compounds um unterschiedliche Thermoplaste mit spezifischen Prozessparametern und abweichenden Materialeigenschaften in Bezug auf Schwindung und Verzug. Andererseits war es fraglich, wie sich nur ein Einspritzpunkt auswirken wird. Nach der Abformung und Abkühlung wurden die Abmessungen mit einer Bauteilprüflehre kontrolliert, wobei sich zeigte, dass sich die Entkopplungselemente problemlos montieren bzw. demontieren ließen. Es traten keine Auffälligkeiten auf, die ein Versagen bei der Anbindung der Motordesignhaube am Motor verursachen könnten.

In der **Tabelle 2** sind die wichtigsten Verarbeitungsparameter vom Serienmaterial PA-Compound und dem vorgeschlagenem PP-Compound dargestellt. Deutlich sichtbar ist der geringere Energiebedarf von PP beim Urformen, was durch die gute Fließfähigkeit, die trotzdem noch niedriger ist, als die von PA6, und der niedrigeren Energieaufnahme beim Aufschmelzen des Granulats be-

Verarbeitungsparameter	Einheit	Polyamid PA6-MD30	Hostacom ERG 393F, GF20
Schneckendurchmesser	[mm]	80	80
Zahl der Einspritzpunkte		2	1
Schließkraft	[kN]	4600	3800
Massetemperatur Düse	[°C]	315	250
Massetemperatur Zylinder	[°C]	290 - 310	220 – 250
Werkzeugtemperatur	[°C]	60	40
Heißkanaltemperatur	[°C]	310	230
Dosierzeit	[s]	16,5	18
Staudruck	[bar]	50	50
Max. Spritzdruck	[bar]	1135	710
Forminnendruck	[bar]	253	166
Einspritzzeit	[s]	5,5	4,2
Einspritzarbeit	[Ws]	3113	2138
Zykluszeit	[s]	36	38
Nachdruck	[bar]	500	250
Material Vortrocknung	[h/°C]	4/80	keine
Teilgewicht ohne Anguss	[g]	495,3	364,9

Table 2. Vergleich der Verarbeitungsparameter zwischen Polyamid und der neu entwickelten PP-GF-Type. Unter anderem am Einspritzdruck, der Schließkraft und der Temperierung zeigt sich der niedrigere Energiebedarf in der Fertigung (Quelle: LyondellBasell)

gründet wird. PP erlaubt ausreichend lange Fließwege, was hier auch bestätigt wurde, da das ganze Volumen durch einen Anspritzpunkt in der Kavität durchgeströmt wurde.

Weiterhin sieht man, dass trotz eines einzelnen Einspritzpunkts der maximale Spritzdruck im Vergleich zu PA um etwa 400bar niedriger ausfällt. Aus dieser Erfahrung könnte man ableiten, dass der Einspritzdruck bei zwei Einspritzpunkten weiter sinken könnte. Dies hätte zur Folge, dass die Schließkraft noch geringer ausfallen könnte, was die Fertigungskosten direkt beeinflusst. Rein energetisch gesehen bringt der Wechsel von PA zu einem PP-Compound eine Energiebedarfsentlastung von etwa 32%, was für eine Produktionsserie von 1000000 Motordesignhauben pro Jahr eine signifikante Ersparnis bedeutet.

Die Zykluszeiten sind für beide Materialien ähnlich, hätten aber bei PP noch Optimierungspotenzial, was jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung war. Ebenso könnte die Verarbeitungstemperatur noch gesenkt werden. Anzumerken ist auch, dass sich PP im Gegensatz zu PA nicht hygroskopisch verhält, wodurch auf eine vollständige Materialtrocknung verzichtet werden kann.

Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe dieser Untersuchung wurde gezeigt, dass in einem für die Verarbeitung

von PA ausgelegtem Spritzgießwerkzeug problemlos Bauteile aus glasfaserverstärktem PP-Compound herstellbar sind. Trotz der unterschiedlichen Materialschwindungen stellte sich heraus, dass die Anbindung der Designhaube am Motor möglich ist. Es wurde aufgezeigt, dass die PP-Matrix aufgrund der geringeren Materialdichte einen Gewichtsvorteil von etwa 25% erreichen kann, was den CO₂-Ausstoß reduziert. PP weist zudem im Vergleich zu PA eine um etwa zweifach höhere akustische Dämpfung auf.

Die Herstellungskosten werden durch den geringeren Materialbasispreis pro kg, die geringere Dichte und den verminderten Energiebedarf gesenkt. In Dauerfahrversuchen bei Otto-Motoren (gewählt wegen den maximal möglichen Einsatztemperaturen von PP) wurde ein positives Ergebnis erzielt und damit ein industrieller Einsatz möglich gemacht.

Obwohl PP für den gewählten Anwendungsfall sehr attraktiv erscheint, müssen die Temperaturen, die sich in jedem Motorraum je nach Fahrzeug und Aggregat entwickeln, genauestens betrachtet werden, damit die Beständigkeits-temperaturen von PP nicht überschritten werden. Die in diesem Projekt gesammelten Erfahrungen in Anbetracht der thermischen Rahmenbedingungen können folglich keinesfalls pauschalisiert werden, sondern müssten für jedes Projekt erneut validiert werden. ■