

# Additiv gefertigtes Dachrahmensegment mit lokaler G-Faserverstärkung

In der Fahrzeugkarosserie konnten sich additiv gefertigte Strukturen auf Polymerbasis aufgrund unzureichender mechanischer Eigenschaften bislang nicht durchsetzen. Anhand der Konzeptstudie für ein Dachrahmensegment stellen Audi und Cikoni nun einen Ansatz vor, der die additive Fertigung mit einer Carbonfaserverstärkung kombiniert.

## Autoren



DIPL.-ING.  
WOJCIECH BRYMERSKI  
ist Fachreferent für faserverstärkte Kunststoffe und Leichtbau bei der Audi AG in Neckarsulm.



DR.-ING.  
JAN-PHILIPP FUHR  
ist Geschäftsführer und Leiter CFK-Simulation und Materialmodellierung bei der Cikoni GmbH in Stuttgart.



DR.-ING.  
FARBOD NEZAMI  
ist Geschäftsführer und Leiter Produktinnovationen und Faserverbundtechnologie bei der Cikoni GmbH in Stuttgart.

Durch additive Fertigungsverfahren lassen sich Bauteile einfach und schnell realisieren. Aus diesem Grund gilt diese Technologie aktuell als Wegbereiter für die Fertigung individueller Bauteile oder Komponenten mit einem hohen Maß an Funktionsintegration. Kein anderes Verfahren ermöglicht die Herstellung derart komplexer Bauteilgeometrien ab Stückzahl eins ohne eine hierfür erforderliche Werkzeugbeschaffung. Die vergleichsweise hohen Kosten pro Kilo-

Leichtbau und mechanischer Performance erfordert, dabei jedoch gleichzeitig wirtschaftlichen Anforderungen genügen muss. Gängige Polymerwerkstoffe für die additive Fertigung weisen zwar eine geringe Dichte auf, sie sind aber zugleich limitiert in puncto Steifigkeit und Festigkeit. Endlosfaserverstärkte Schmelzschicht (Fused Deposition Modeling, FDM)-Werkstoffe sind äußerst kostenintensiv und ermöglichen dennoch nur eine mechanische Verstärkung in der

---

Mit dem Verfahren lassen sich Funktionsprototypen schnell und werkzeugfrei realisieren.

---

gramm Bauteilgewicht relativieren sich aufgrund des wegfallenden Werkzeuginvests und der möglichen Nutzung von zusätzlichem Gestaltungspotenzial, vor allem bei kleinen Stückzahlen oder Nullserien.

Eine Herausforderung stellt jedoch die Umsetzung eines Bauteils in additiver Fertigung dar, das zusätzlich ein hohes Maß an

Druckebene, nicht jedoch eine dreidimensionale Versteifung des Bauteils. Metallische Werkstoffe für die additive Fertigung bieten hohe mechanische Eigenschaften in alle Raumrichtungen, sind aber aufgrund der hohen Dichte für Leichtbauanwendungen ungeeignet und auch wirtschaftlich herausfordernd.

Das von Cikoni vorgestellte Verfahren AdditiveCarbon stellt eine vielversprechende Antwort auf ein derartiges Anforderungsprofil dar. Dahinter verbirgt sich ein hybrider Denk- und Gestaltungsansatz, bei dem die Vorteile der additiven Fertigung mit den Vorteilen des 3-D-Wickelns von Endlosfasern kombiniert werden. Die additive Fertigung wird als formgebendes Verfahren mit hoher Gestaltungsfreiheit bei minimalem Werkstoffeinsatz genutzt, während die Carbonfaser die angestrebte mechanische Performance des Bauteils sicherstellt und dabei verschnittarm und mit maximalem Nutzungsgrad direkt von der Rolle sowie ohne zusätzlichen Werkzeugeinsatz verarbeitet wird. Das Verfahren wurde in einer Konzeptstudie für einen Dachrahmen des Audi RS5 Coupé mit einem Faserverbundkunststoff (FVK)-Dach in Leichtbauweise eingesetzt, die nachfolgend vorgestellt wird.

### Simulation als Ausgangspunkt

Das vorgestellte Gestaltungs- und Herstellungsverfahren soll dabei nicht nur als Option für eine Kleinserienfertigung betrachtet werden, sondern dient auch als Möglichkeit zur schnellen und werkzeugfreien Realisierung von Funktionsprototypen und Derivaten. Damit öffnet sich ein breites und nachhaltiges Einsatzgebiet für zukünftige Anwendungen im Karosseriebau.

Das betrachtete Bauteil stellt eine Strukturkomponente des Audi-RS5-Coupé-FVK-Fahrzeugsdachs mit hohem Leistungs- und Leichtbauanspruch dar, Bild 1 und Bild 2. Die Zielsetzung ist ein geringeres Bauteilgewicht im Vergleich zur Referenzstruktur bei gleicher Funktion. Den Ausgangspunkt für den Designprozess stellt insofern auch das Simulationsmodell der dimensionierenden Vergleichslastfälle der Referenzbaugruppe dar, Bild 3. Aus den so ermittelten Zielsteifigkeiten, dem verfügbaren Bau- raum sowie der Vorgabe einer gleichen Bauteilperformance bei geringerem Gewicht lassen sich nun mittels Struktursimulation und numerischer Optimierung die erforderliche Anzahl an Verstärkungswicklungen ermitteln. Weiterhin liefert die Simulation deren



BILD 1 Prototyp des Dachrahmens, umgesetzt in AdditiveCarbon (© Cikoni)



BILD 2 Betrachtete Referenzbaugruppe mit Dachrahmen links und rechts (© Audi)

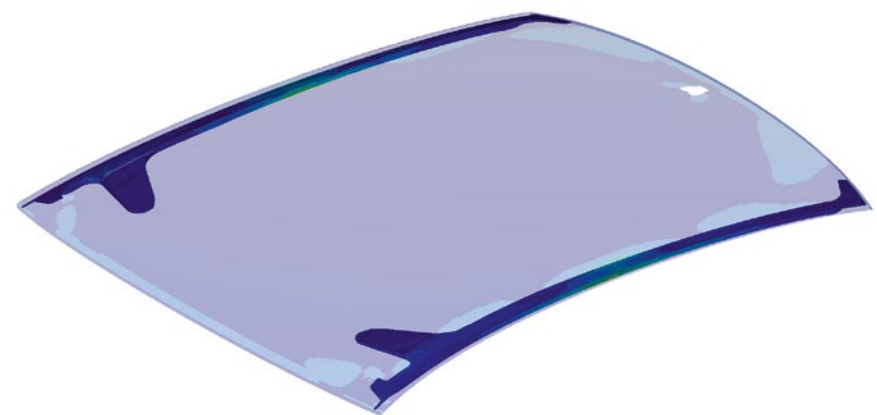


BILD 3 FEM-Modell der Referenzbaugruppe als Ausgangspunkt der Bauteildimensionierung (© Audi)

Orientierung und parallel dazu das zur Ver- fügung stehende Volumen für die additive Fertigung und dessen ideale Verteilung.

Für eine hohe Prognosegüte in der Struk- tursimulation von endlosfaserverstärkten

Bauteilen ist darauf zu achten, dass die rich- tigen anisotropen Materialkennwerte und eine geeignete Modellierungsmethode der Verstärkungslagen zum Einsatz kommen. Hierbei unterscheidet sich die Vorgehens-

weise für die Simulation von lokal applizierten Fasersträngen im 3-D-Wickeln in einigen Details von derjenigen bei flächig applizierten Faserhalbzeugen, wie zum Beispiel Gewebe oder Gelege.

### Freiheitsgrade und Randbedingungen

Die eigentliche konstruktive Aufgabe besteht darin, das Volumen für die additive Fertigung bestmöglich zu nutzen und den Grundkörper des Bauteils entsprechend der

Grundkörper anlegen, was wiederum mechanische Nachteile bedeutet. Hierzu ist die Generierung geodätischer Pfade erforderlich, **Bild 4** (oben).

Bei der Konstruktion sind weitere Randbedingungen zu beachten, die sich von der Gestaltung eines klassischen FVK-Bauteils mit flächiger Verstärkung unterscheiden. So sollten die 3-D-Wickelpfade derart geplant werden, dass der Carbonfaseroving möglichst kontinuierlich gelegt werden kann, da jede Unterbrechung eine Schwachstelle in der Bauteilfestigkeit darstellen würde.

Das deutlich unterschiedliche Steifigkeits- und Festigkeitsniveau der eingesetzten Materialien für Grundkörper und Verstärkung macht es erforderlich, dass die Lasteinleitung stets möglichst unmittelbar in die Carbonfaser erfolgt. Dies kann beispielsweise durch das Legen von Schlaufen um Inserts realisiert werden, **Bild 5**. Andernfalls bleibt ein Großteil des Potenzials der Faserverstärkung ungenutzt. Die diesen Prämissen folgende Gestaltung der additiv gefertigten Komponente für den betrachteten Dachrahmen kann **Bild 4** unten entnommen werden.

## Der Grundkörper fungiert aus mechanischer Sicht wie ein Sandwichkern.

verfahrensspezifischen Randbedingungen zu gestalten. Hier können die Vorteile der additiven Fertigung voll ausgeschöpft werden, da Hinterschnitte oder Hohlräume weniger restriktiv umgesetzt werden können. Der Grundkörper sollte neben der stützenden Wirkung im Idealfall auch der Führung und der exakten Positionierung der Carbonfaserstränge dienen. Um das mechanische Potenzial der Fasern voll zu nutzen, sollte der Wickelgrund in Faserrichtung stets konvex geformt sein, damit Fasern nicht frei im Raum verlaufen. Dies würde die Belastbarkeit bei Druck- oder Biegebelastung deutlich reduzieren.

Der Grundkörper fungiert aus mechanischer Sicht dabei wie ein Sandwichkern und trägt mit zunehmender Bauhöhe signifikant zur Verbesserung der Biegesteifigkeit bei. Dazu muss der Kern eine ausreichende Eigensteifigkeit aufweisen, was trotz einer insgesamt geringen Wandstärke durch die Integration von Rippen erreicht wurde. Gleichzeitig können Hilfselemente für den 3-D-Wickelprozess, Umkehrpunkte sowie Inserts für die spätere Anbindung an angrenzende Bauteile integriert werden. Der Verlauf der Führungselemente muss konstruktiv so ausgeführt werden, dass er dem natürlichen Ablagepfad der räumlich gewickelten Fasern folgt. Andernfalls können sich die Faserstränge nicht störungsfrei am

Zudem muss eine Vorgehensweise zur Gestaltung von Kreuzungspunkten und den damit einhergehenden Dickensprüngen definiert werden, die sich verfahrenstechnisch nicht verhindern lassen.

### Realisierung von Funktionsprototypen

Für die Umsetzung von Prototypen, **Bild 1** und **Bild 5**, wurden mehrere aus Polyamid(PA)-12 gedruckte Grundkörper im Selektiven-Lasersinter(SLS)-Verfahren angefertigt und für den anschließenden Wickelprozess vorbereitet. Dieser wurde im Rahmen der Konzeptstudie nicht automatisiert durchgeführt, obgleich die Gestaltung des



**BILD 4** Generierung der Wickelpfade (oben) und Umsetzung der Struktur in additiver Fertigung (unten) (© Cikoni)



BILD 5 Detailsicht eines wickeltechnisch eingebundenen Lastenleitungs punkts (© Cikoni)

Bauteils bereits unter Berücksichtigung einer vollständigen Automatisierbarkeit des Wickelprozesses durchgeführt wurde. Aufgrund der konstruktiv realisierten exakten Führung der Faserstränge auf dem additiv gefertigten Bauteil ergeben sich abgesehen von der Fertigungsdauer keine Nachteile aus einer manuellen Herstellung.

Zur Sicherstellung einer konstanten Qualität sowie eines gleichbleibenden Faservolumengehalts kamen vorimprägnierte Fasern, sogenannte Towpregs, mit einem Epoxidharzsystem zum Einsatz. Aufgrund der eingesetzten Towpregs und

dass sich durch eine Konsolidierung mittels Vakuumsack oder einer elastischen wiederverwendbaren Membran eine gleichmäßigere Oberflächenbeschaffenheit realisieren lässt, sofern dies für den Einsatzzweck erforderlich ist.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen der Konzeptstudie zwischen Audi und Cikoni erfolgreich aufgezeigten Ergebnisse zur Herstellung eines Leichtbaudachrahmens mittels Additive-

aus dem Konstruktionsmodell abgeschätzten Gesamtgewicht.

Die optimale Gestaltung einer in diesem Verfahren hergestellten Komponente weicht deutlich von anderen Verfahren ab. Die hierzu gewonnenen methodischen Erkenntnisse werden zukünftig anhand weiterer geeigneter Komponenten der Karosseriestruktur eingesetzt, um weitere Potenziale des Verfahrens zu identifizieren. Dabei werden unter anderem der durchgehend automatisierte Prozessablauf von der additiven Fertigung bis zum fertig umwickelten dreidimensionalen Bauteil sowie ein teilautomatisierter Entwicklungsdurchlauf basierend auf einer modularen und regelbasierten Entwurfsmethodik adressiert.

Aus gesamtheitlicher Sicht werden derzeit zudem Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt, um geeignete Bauteile, Stückzahlenszenarien und Materialkombinationen aus ökonomischer Sicht einzugrenzen. Dabei können auch Varianten mit verlorenen Kernen sowie der Einsatz von Naturfasern zur Verbesserung des Nachhaltigkeitsaspekts interessante Prozessalternativen darstellen. ◀

## Die Lastenleitung erfolgt möglichst unmittelbar in die Carbonfaser.

einer nahezu vollständig konvexen Wickeloberfläche ist eine Konsolidierung während der Aushärtung für die mechanischen Eigenschaften nicht zwingend erforderlich. Durchgeführte Versuche zeigen jedoch,

Carbon konnten im Hinblick auf die Qualität und die geforderten Fertigungstoleranzen positiv überzeugen. Das finale Bauteilgewicht entspricht der Zielsetzung und liegt nur wenige Gramm neben dem