

Stringergeometrie mit Deck-  
schichten aus kohlenstoffa-  
serverstärktem Kunststoff  
(CFK) und Kern aus Poly-  
methacrylimid-(PMI)-Hart-  
schaumstoff im Querschnitt



## PMI-Hartschaum.

Leichtbaulösungen  
sind heutzutage in  
vielfältigen Anwen-

dungsgebieten gefragt. Doch selten ist „Leichtbau

um jeden Preis“ gefordert. Vielmehr kommt es in der Regel darauf an, eine

Balance zwischen Herstellkosten, Prozesssicherheit und Bauteilgewicht zu erreichen.

# Die leichte Balance

FELIX GOLDMANN

Bei vielen Anwendungen gewinnt das Thema Leichtbau zunehmend an Bedeutung. Nicht nur im Flugzeugbau, sondern auch bei Sportgeräten, in der Automobilindustrie, für hoch beschleunigte Komponenten im Maschinenbau und in vielen weiteren Einsatzbereichen kommen deswegen immer mehr Faserverbundstrukturen zum Einsatz.

Je nach den an das Bauteil gestellten Anforderungen in Bezug auf Geometrie, Lastfall und Auslegungskriterium bieten sich bei endlosfaserverstärkten Kunststoffen unterschiedliche Bauweisen an: Wird ausschließlich eine hohe Festigkeit gefordert, sind häufig monolithische Strukturen geeignet. Sind hingegen eine gute Steifigkeit und exzellente Biegeeigenschaften sowie eine hohe Beul- und Knickstabilität gefragt, erweisen sich in aller Regel Sandwichbauteile als optimal. Man unterscheidet hier zwischen Vollsandwich, Hautsandwich und mit Stringern versteiften Schalenbauweisen. **Tabelle 1** zeigt schematisch die erwähnten Varianten.

Der Kernwerkstoff ist so ausgelegt, dass er die Schubspannungen zwischen den Deckhäuten in Richtung Sandwichebene und die Druckspannungen senkrecht zur Sandwichebene überträgt. Üblicherweise übernimmt der Kernwerkstoff bei diesen Bauweisen die Aufgabe eines tragenden Strukturelements. Bei der erwähnten Stringerbauweise wird eine dünne monolithische Schale lokal mit Versteifungselementen versehen, um in erster Linie die Beulbeständigkeit zu verbessern. Dieses

ARTIKEL ALS PDF unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110476

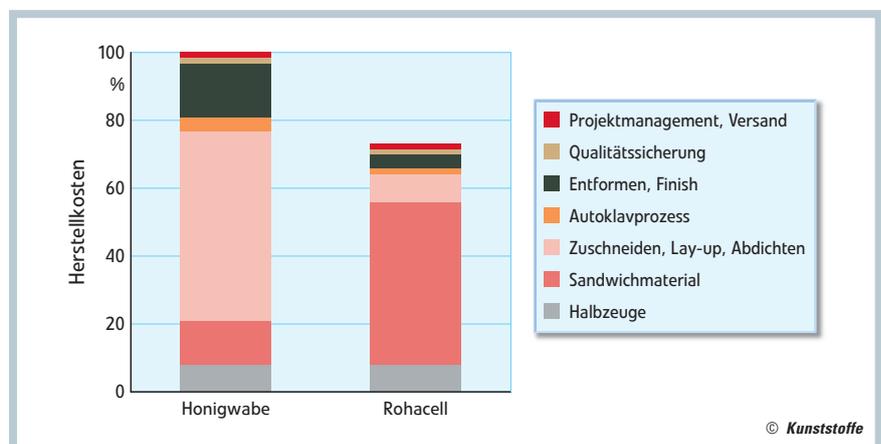


Bild 1. Einsparpotenzial der schaumgefüllten Stringerbauweise gegenüber Honigwabensandwich

Prinzip ist zum Beispiel in der Druckklotte des Airbus A340 realisiert. Die Versteifungswirkung verursacht dabei zu einem großen Teil die A-förmige monolithische Struktur. Aus diesem Grund ist es möglich, bei dieser Bauweise den Kern als reines Fertigungshilfsmittel zu betrachten.

## Ganzheitliche Auslegung

Neben einem optimierten Bauteilgewicht kommt es ebenfalls darauf an, die Kosten für Rohstoffe, Halbzeuge, Fertigungsprozess und Nacharbeit im Blick zu behalten. Gefragt sind Systemlösungen, die diese Faktoren berücksichtigen und gleichzeitig ein Maximum an Leichtigkeit mit optimierter Steifigkeit sowie Festigkeit kombinieren.

Als Kernwerkstoff für die Sandwichbauweise kommen unterschiedliche Materialien in Frage. Am häufigsten werden Honigwabenstrukturen und polymere Hartschaumstoffe eingesetzt. Seltener finden auch Faltschalenkerne, Metall-

schäume oder natürliche Materialien wie Balsaholz Verwendung. Mit Blick auf die Fertigungskosten erweisen sich Schaumkerne aus Kunststoff meist als die attraktivste Alternative. Die Gründe hierfür sind insbesondere prozessgetrieben: Bauteile mit Schaumkern können häufig in einem Schritt gefertigt werden (Co-Curing). Dies reduziert den Layup-Aufwand erheblich und ermöglicht eine effiziente Fertigung mit einem Maximum an Prozesssicherheit. Im Gegensatz dazu müssen bei Sandwichbauteilen mit Wabenkern oder durch monolithische Strukturen verstärkte Schalen die Versteifungselemente üblicherweise in einem zusätzlichen Schritt gefertigt und anschließend aufgeklebt werden. Damit sind zwangsläufig Maßungenaugigkeiten vorhanden, die vor dem Fügen der Einzelteile ausgeglichen werden müssen. Der bei dieser sogenannten Differenzialbauweise gegenüber der Integralbauweise vergrößerte Fertigungsaufwand überwiegt die möglichen Einsparungen durch

Bauweisenkonzept	Skizze	Steifigkeit	Gewicht	Layup-Aufwand	Fügeaufwand
Vollsandwich		++	+	++	++
Hautsandwich		+	++	+	0
Profilversteifung		+	+	0	+

Legende: ■ Rohacell ■ Deckschicht, z.B. CFK ++ = sehr gut; + = gut; 0 = befriedigend

Tabelle 1. Sandwichbauweisen im Überblick

günstigere Halbzeuge häufig deutlich. Zudem ist bei der Verwendung von Wabenkernen das Auffüllen der an den Kanten und im Bereich von Bohrungen geöffneten Wabenzellen durch eine sogenannte Pottingmasse erforderlich. Dies vergrößert sowohl den Fertigungsaufwand als auch das Bauteilgewicht. **Bild 1** zeigt das Einsparpotenzial eines in schaumgefüllter Stringerbauweise integral gefertigten typischen Luftfahrtbauteils im Vergleich zu einer herkömmlichen Sandwichbauweise mit Wabenkern. Dargestellt sind die anteiligen Kosten der verschiedenen Posten an den Gesamtherstellkosten. Die Kosten für Sandwichmaterial sind beim Schaumsandwich sehr viel höher, können aber durch erhebliche Einsparungen an Arbeit bei der Vorbereitung des Sandwichaufbaus und durch Reduktion der Nacharbeit mehr als kompensiert werden.

Außerdem lassen sich durch Verwendung von Hartschaumstoffkernen erstklassige Oberflächenqualitäten realisieren, da der Kern keine inhomogene Struktur hat, die sich auf der Bauteiloberfläche abzeichnen kann (sog. Telegraphing-Effekt bei Honigwaben). Weist der Schaumstoff zudem noch hervorragende mechanische Eigenschaften und thermische Stabilität auf, wie der hier betrachtete Polymethacrylimid-(PMI-)Hartschaumstoff (Hersteller: Evonik, Typ: Rohacell), sind Wirtschaftlichkeit und geringes Bauteilgewicht optimal miteinander vereinbar.

Eigenschaft		Rohacell 51 RIST	Rohacell 71 RIST	Rohacell 110 RIST
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	52	75	110
Druckfestigkeit	[MPa]	0,8	1,7	3,6
Zugfestigkeit	[MPa]	1,6	2,2	3,7
Schubfestigkeit	[MPa]	0,8	1,3	2,4
Zug-E-Modul	[MPa]	75	105	180
Schubmodul	[MPa]	24	42	70
Bruchdehnung	[%]	3,0	3,0	3,0
Wärmeformbeständigkeit	[°C]	205	200	200

Tabelle 2. Typische Werkstoffeigenschaften für die nominelle Dichte am Beispiel des PMI-Typs Rohacell RIST

**Tabelle 2** gibt einen Überblick über die typischen Werkstoffeigenschaften des Schaumstoffs.

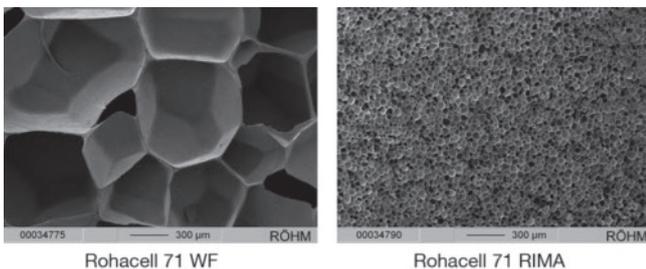
Zu beachten ist weiterhin, dass durch erhöhte Aushärtetemperaturen in vielen Fällen die Zykluszeit reduziert werden kann. Es werden dadurch höhere Produktionsraten erreicht, die oft die höheren Halbzeugkosten für einen Kernwerkstoff mit besserer Prozessbeständigkeit mehr als wettmachen.

### Der richtige Schaumkern-Werkstoff

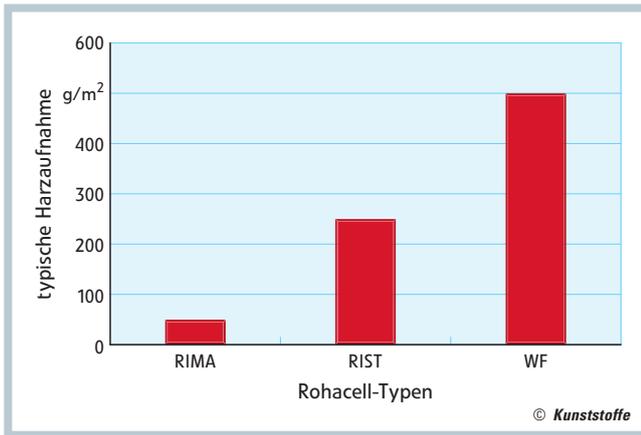
Neben den oben genannten Eigenschaften sind zum Erreichen der bestmöglichen Bauteilqualität noch weitere Merkmale wichtig. Hierzu zählen unter anderem die Kriechbeständigkeit gegen die

im Aushärtungsprozess auftretenden Drücke und Temperaturen, die Porenstruktur und die Zellgröße. Bei diesen Charakteristika ist es von besonderer Bedeutung, den verwendeten Schaumtyp an die vorliegenden Prozessbedingungen und die Art der Sandwichbauweise anzupassen.

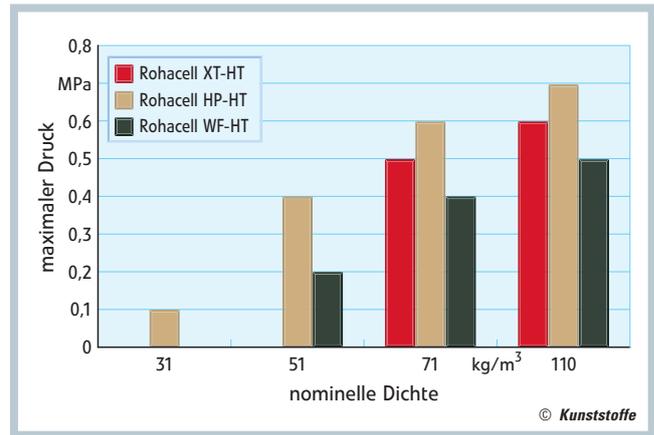
Aus Prozessdruck, Härtetemperatur, Prozessdauer und zulässigem Kriechwert können Typ und Dichte des prozesseitig optimalen Kernwerkstoffs abgeleitet werden. Generell gilt: Je höher die Schaumqualität, desto geringere Dichten sind erforderlich, um den Prozessbedingungen widerstehen zu können. In Bezug auf die Porenstruktur bietet ein möglichst hoher Grad an Geschlossenheit den Vorteil, dass das Deckschichtharz lediglich in die bei der spannenden Formgebung des Kerns geöffneten Zellen an der Oberfläche eindringt. So entsteht eine zuverlässige Verbindung zwischen Kern- und Hautlagen, ohne dass Harz in die Tiefe des Kerns eindringt und so überflüssiges Bauteilgewicht generiert. Alle Rohacell-Schäume besitzen eine 100 %-ig geschlossene Zellstruktur (**Bild 2**). Zudem weist das Produkt eine homogene und isotrope Struktur



**Bild 2.** REM-Aufnahmen der Zellstrukturen der PMI-Schaumstoffe Rohacell WF und RIMA



**Bild 3. Vergleich typischer Oberflächenharzaufnahmen unterschiedlicher Rohacell-Typen in Abhängigkeit von der Zellgröße**



**Bild 4. Von Rohacell HP ertragbare Prozessdrücke im Vergleich zu anderen Rohacell-Typen (nach Heißtemperatur-Behandlung) bei 180°C über einen Zeitraum von 2 h**

**Kontakt**

Evonik Röhm GmbH  
 D-64293 Darmstadt  
 TEL +49 6151 18-6380  
 → [www.evonik.com](http://www.evonik.com)  
[www.rohacell.com](http://www.rohacell.com)

tur auf, was für die meisten Anwendungen ebenfalls von Vorteil ist.

Die ideale Wahl der Zellgröße hängt von der Viskosität des verwendeten Harzsystems und von den Anforderungen an das Bauteil ab. So ist bei der Verarbeitung von Prepregs, deren Harzsystem häufig eine hohe Viskosität aufweist, gewöhnlich eine verhältnismäßig grobe Zellstruktur gewünscht. Diese vereinfacht das Eindringen des Harzes in die Oberflächenporen und ermöglicht so eine form- und stoffschlüssige Verbindung zwischen Schaum und Faserverbund. Wird ein Infusionsprozess angewendet, bei dem die Viskosität der Matrix üblicherweise deutlich niedriger liegt, so ist eine kleinere Zellgröße für eine zuverlässige Füllung der angeschnittenen Zellen an der Schaumoberfläche ausreichend. In diesem Fall kann durch die Wahl eines angepassten Schaumtyps die Menge des an der Oberfläche aufgenommenen Harzes und somit das Bauteilgewicht verringert werden. **Bild 3** zeigt die typische Harzaufnahme verschiedener PMI-Schäume (Typ: Rohacell) in Abhängigkeit von der Zellgröße.

Ein weiterer Punkt, der bei der Auswahl des Kernwerkstoffs Beachtung finden sollte, ist die Verträglichkeit mit dem eingesetzten Harzsystem. Viele Schaumstoffe sind mit bestimmten Harzen chemisch unverträglich, was zum Kollabieren oder zur Zersetzung des Schaums während des

Prozesses führen kann. Der PMI-Hartschaum ist aufgrund seiner chemischen Struktur mit allen gebräuchlichen Matrixsystemen kombinierbar, zum Beispiel mit warm- und kalthärtenden Epoxidharzen, ungesättigten Polyesterharzen und Vinylesterharzen. Zudem ist er in hochwärmeformbeständigen Ausführungen erhältlich, die den Einsatz einer thermoplastischen Matrix ermöglichen.

### Schaumkern als Fertigungshilfsmittel

In einigen Fällen dient der Schaumkern lediglich als Fertigungshilfsmittel für die einfache und günstige Erzeugung der gewünschten Sandwichstruktur in einem Schuss und verbleibt nach der Aushärtung der Deckschichten im Bauteil. Dies kommt beispielsweise bei der im Flugzeugbau verbreiteten Stringerbauweise sowie bei verschiedenen Anwendungen im Sportgerätebereich vor. Das **Titelbild** zeigt ein Beispiel für den Querschnitt einer Stringergeometrie.

Oft ist die Verwendung eines verlorenen Kerns sogar unvermeidbar. Denn die üblichen Verfahren zur Erzeugung hohler Faserverbundkörper, wie das Schlauchblasverfahren oder die nachträgliche Entfernung eines wiederverwendbaren Kerns aus der Bauteilstruktur, sind aus wirtschaftlichen und/oder technischen Gründen nicht immer sinnvoll darstellbar.

Wird der Schaum lediglich als verllorener Kern betrachtet und sein Beitrag zu den mechanischen Bauteileigenschaften vernachlässigt, kommt es darauf an, dass der Kern die im Prozess auftretenden Lasten erträgt und gleichzeitig zu einer möglichst geringen Erhöhung des Bauteilgewichts führt. Speziell auf dieses Anforderungsprofil hat Evonik den neuen PMI-

Schaumtyp Rohacell HP zugeschnitten. Bereits bei einer nominellen Dichte von 31 kg/m³ ist er in der Lage, einem Druck von 0,1 MPa (1 bar) bei einer Temperatur von 180°C zu widerstehen. Bei geringeren Härtetemperaturen ist ein entsprechend höherer Prozessdruck möglich. Zudem verfügt er über eine sehr feine Zellstruktur, die die an der Oberfläche aufgenommene Harzmenge auf ein Minimum reduziert. **Bild 4** vergleicht die von Rohacell HP bei 180°C und verschiedenen nominellen Dichten ertragbaren Drücke mit anderen Rohacell-Typen.

Aufgrund der genannten Eigenschaften wird das endgültige Gewicht eines Sandwichbauteils bei der Verwendung des neuen Hartschaumtyps als verllorener Kern oft im Vergleich zu einer hohlen Struktur nur marginal erhöht. Dabei kann jedoch die Wirtschaftlichkeit dank eines effizienteren Fertigungsprozesses signifikant gesteigert werden, auch wenn die reinen Halbzeugkosten zunächst zunehmen (s. **Bild 1**). ■

### DER AUTOR

M. ENG. FELIX GOLDMANN, geb. 1982, ist als Business Development Manager im Bereich Rohacell für die Evonik Röhm GmbH, Darmstadt, tätig; [felix.goldmann@evonik.com](mailto:felix.goldmann@evonik.com).

### SUMMARY

#### A DELICATE BALANCE

PMI RIGID FOAM. Lightweight solutions are sought for many applications today, but rarely is it a matter of „lightweight at any cost“. Instead, a balance of manufacturing costs, process reliability and part weight is usually the rule.

Read the complete article in our magazine

**Kunststoffe international** and on [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)