

# Teil 4: Carbonfaserverstärkte Verbundwerkstoffe

## Einführung

---

Zuerst traten Carbonfasern in den 80er Jahren im Luftfahrtsektor in Erscheinung. Heutzutage werden im Flugzeugbau in allen Primärteilen carbonfaserverstärkte Verbundwerkstoffbauteile eingesetzt, einschließlich Flügel und Rumpf.

Ab den 90er Jahren eroberten diese Fasern dann nach und nach den Sportsektor und andere Branchen. Heute verbreitert sich das auf dem Markt erhältliche Carbonfasersortiment stetig, Carbonfasern sind inzwischen in unterschiedlichsten Massen Anwendungen und Marktnischen vertreten, bedingt durch zwei Faktoren:

- Einerseits ist ein bedeutender Preisrückgang zu verzeichnen und die Zahl der Zulieferer hat zugenommen.
- Andererseits ist die Nachfrage nach immer leichteren Produkten, die weniger Energie verbrauchen, stark gestiegen (im Automobil-, Luftfahrt-, Windkraft- und Elektroniksektor...).

Bei Verbundwerkstoffen dominieren heute bei weitem Glasfasern (85%), aber Carbonfasern erleben zurzeit ein kräftiges Wachstum. 72% der Epoxidmatrizen, 12% der Polyester- und 9% der Phenolmatrizen sind carbonfaserverstärkt.

## Die Industrielandschaft der Carbonfasern

---

Der Spezialist auf dem Carbonfasermarkt Ch. Red (Composites Prévisions & Consulting LLC) schätzt, dass Carbonfaserangebot die Nachfrage noch einige Jahre überschreiten wird. Denn der Markt verzeichnet neue Anbieter und die Produktivität der bestehenden Anlagen ist gestiegen; Gleichzeitig befinden sich bestimmte Abnehmermärkte in einer ungewissen Situation (Windkraftrotorblätter) und könnten noch weiter schrumpfen.

Die Zulieferer von Carbonfaser auf der Basis von PAN in Form von Dünnssträngen sind in nach ihrer Produktionskapazität absteigender Ordnung folgende: Toray Industries (Tokyo, Japan) – 31 %, Toho Tenax Co. Ltd. (Wuppertal, Germany) - 21%, Mitsubishi Rayon Co. Ltd. (Tokyo, Japan), Hexcel Inc. (Dublin, Calif.), Cytac Engineered Materials Inc. (Tempe, Ariz.) and Formosa Plastics Corp. and Formosa Plastics Corp.

Die Zulieferer von Fasern mit mehr als 24 000 Filamenten sind Zoltek Inc. (St. Louis, Mo.) – 53%, SGL Group (Wiesbaden, Germany) - 27 %, Toho, PR China, Toray und einige neue kleinere Produzenten aus China. Die gesamte Produktionskapazität für diesen Fasertyp liegt bei nur 50 % derjenigen für Dünnsstränge.

Die Neuankömmlinge auf dem Markt wie Hyosung (Südkorea), Sabic (Saudi-Arabien), DowAksa (Türkei), Alabuga Fiber (Russland) konzentrieren sich auf die Produktion von Industriefasern mit einem weniger hohen Modul: Denn diese Fasern sind für andere Märkte vorgesehen als die für High Tech und Elektronik, die ein schnelleres Wachstum erleben. Sie sind jedoch noch weit von den langjährigen Produzenten entfernt.

Mehrere neue Produktionseinheiten für Carbonfasern befinden sich in Planung, kurzfristig insbesondere in China. Diese beziehen sich meist auf Acrylfaserhersteller, die die PAN-Precursoren liefern.

Die weltweite Kapazität der Kohlenstofffaserproduktion lag 2012 bei 111.785 Tonnen. 2016 wird sie bei 156.845 t und 2020 bei 169.300 t liegen. Im Verhältnis zu den nominalen Kapazitäten stellt die reelle Produktion nicht mehr als einen Teil da, der 2012 bei geschätzten 60%, 2016 bei 68% und 2020 bei 72% liegt.

Es gibt einige Hundert Handlessorten von Carbonfaser, 80-90% davon sind "Standard"-Fasern, die restlichen 10-20% sind Hoch- oder Zwischenmodulfasern.

Hinsichtlich der Nachfrage rechnet man mit einem Wachstum des gesamten Carbonverbundwerkstoffmarktes von 14,6 Milliarden \$ im Jahr 2012 auf 36 Milliarden \$ bis zum Jahr 2020, wobei von einem durchschnittlichen Wachstum von 13% pro Jahr ausgegangen wird, was einer Nachfrage von 110 000 t Carbonfaser entsprechen würde. Dies erklärt die oben erwähnte Überkapazität. Diese Situation kann also dazu beitragen, die Preise wettbewerbsfähig zu halten.

## Die Anwendungsbranchen

---

Eine kürzlich durchgeführte Studie von Lux Research prognostiziert, dass das größte Wachstum des Carbonverbundwerkstoffmarktes (Fasern, Nano-Röhrchen, Graphen) im Windkraftsektor zu erwarten ist, gerechnet wird mit einem Wachstum von 16% pro Jahr bis 2020 und mit einer Verdoppelung innerhalb der nächsten 5 Jahre. Die vielversprechendsten Branchen sind die Luft- und Raumfahrt, die Windenergie und der Automobilbau. Der Öl- und Gasmarkt wächst im Vergleich hingegen mit 5% pro

Jahr nur langsam - bedingt durch den Konservatismus dieses Marktsegments. Die Sportausstattungsbranche ist zwar vom Umfang her weniger bedeutend, die Kunden sind jedoch bereit, für Hochleistungsprodukte entsprechende Preise zu bezahlen.

## Luft- und Raumfahrt

Bauteile für die Luft- und Raumfahrt sind nach wie vor die Erfolgsgeschichte für die Anwendung von Verbundwerkstoffen aus Hochmodulcarbonfasern, ersetzen sie doch hier insbesondere das Aluminium.

Im Militärssektor besteht eine Nachfrage nach zahlreichen, höchst unterschiedlichen Produkten - für Helikopter, Satelliten, Raketen, Düsenflugzeuge... - mit entsprechend hohen Anforderungen an die Materialien: Die Temperaturen liegen in Extrembereichen und die Umgebungsbedingungen sind höchst unterschiedlich, reichen von der Strahlungsbelastung für Raumfahrzeuge bis hin zu ozeanischen Jetstreams, denen Düsenflugzeuge ausgesetzt sind. Die erzielten Fortschritte wurden - und werden weiterhin - auf die zivile Luftfahrt übertragen.

Dank widerstandsfähiger und rigiderer Fasern und leitfähigerer Harze haben sich duroplastische Verbundwerkstoffe in den strukturellen Bauteilen - Rumpf, Flügel, Substrukturen - durchgesetzt. 50% der Strukturbauteile des Boeing 787 und des A350XWB bestehen aus Verbundwerkstoffen, gegenüber nur 8% bei der Vorgängergeneration. Verbundwerkstoffe werden auch für die Flügel, die Flugwerke und andere Bestandteile in Flugzeugen aller Größen, in Fluggeräten und Dronen eingesetzt.

Die Nachfrage nach Carbonfaser dürfte sich im Luft- und Raumfahrtsektor für das Jahr 2015 auf mehr als 13 000 t belaufen, wovon 60% auf die zivile Luftfahrt entfallen.

Die Entwicklung in der Luft- und Raumfahrtindustrie ist in vollem Gange und die Zukunft der Verbundwerkstoffe ist dort für die Zukunft gesichert. Die Wachstumsrate enthält jedoch einen Unsicherheitsfaktor, der mit den Verspätungen und Kostenüberschreitungen zusammenhängt, die wiederum zu Auftragsrücknahmen führen könnten, die die Nachfrage nach Verbundwerkstoffen in nicht unerheblichen Umfang betreffen könnte.

Die in der Luft- und Raumfahrt verwendeten Verbundwerkstoffkomponenten sind meist große Bauteile (z. B. von 10 Metern), was die Konstrukteure vor besondere Herausforderungen stellt:

- Verformungen durch thermische Einflüsse;
- Deformierungen in der Gewebestruktur bei der Fertigung;
- Schwierigkeiten bei der Vermessung großer Strukturteile, die relativ flexibel sein können
- Probleme bei der Handhabung während der Montage der Strukturen;
- Rentabilitätsprobleme, die die Verfahren der Faserlegung betreffen

Obwohl diese Probleme immer besser gelöst werden können, gibt es hier durchaus noch Spielraum für Weiterentwicklungen. Diese Entwicklungen betreffen:

- Die multifunktionalen Werkstoffe: Strukturmaterialien, thermische Leiter, mit einer Widerstandsfähigkeit in unterschiedlichen Umgebungen;
- die Verkürzung der Aushärtungsdauer;
- die Beschleunigung der Entwicklung und Markteinführung;
- die Zertifizierung und Qualifizierung der Werkstoffe;
- die Testverfahren.

Duroplastische Verbundwerkstoffe sind auf Anwendungen in Innenräumen beschränkt. Allerdings sind sie aufgrund ihrer hohen Tenazität (hohe Widerstandsfähigkeit gegen Bruch oder Rissausbreitung) für den Leichtbau geeignet. Ihre Einsetzung braucht wenig Zeit und sie sind äußerst robust. Sie bieten gute FST-Eigenschaften (Entflammbarkeit, Rauchdichte, Giftigkeit) und sind recycelbar. Deshalb wird weiterhin an der Entwicklung von Strukturkomponenten wie an Vorderkantenteilen des Flügels aus Polyphenylsulfon oder Trennwänden aus Polyetherimid + Carbon gearbeitet.

## Automobilbau

Im Jahre 2050 wird es weltweit 2,5 Milliarden Fahrzeuge geben, das heißt, es werden pro Jahr 100 000 Autos produziert.

Die diesbezügliche Umweltherausforderung ist also beträchtlich. In Europa soll bis 2015 eine Reduzierung der Emissionen auf 125 g/km und bis 2020 auf 95 g/km erreicht werden. Wir wissen, dass eine Gewichtsreduzierung von 10% eine Einsparung von 7% des Verbrauchs ermöglicht. Im Zeitraum 2015-2020 müssen also 200 Kg/pro Fahrzeug eingespart werden.

Verringerung des Kraftstoffverbrauchs, Reduzierung der Treibhausgasemissionen, des Rohstoffverbrauchs... Verbundwerkstoffe stehen bei diesen Entwicklungen in der ersten Reihe, mit den Vorreitern Deutschland und Japan. Gewichtseinsparungen von 50-60% sind durch den Ersatz von Stahl bei Elektro-Fahrzeugen möglich, und 30% durch den Ersatz von Aluminium durch Carbonfaserverbundwerkstoffe.

Der Automobilbau hat einen erheblichen Bedarf an Verbundwerkstoffen. Um die Ziele zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2020 zu erreichen, rechnet das japanische Unternehmen Teijin mit einem Anteil an Carbonverbundwerkstoffen von 5-7% bei allen neuen Fahrzeugen.

Die geringen Gewinnmargen der Automobilindustrie und die langen Entwicklungsprozesse haben die Einführung von Carbonverbundwerkstoffen im Automobilbau verzögert, aber für die kommenden Jahre ist hier ein beträchtliches Wachstum von 17% pro Jahr zu erwarten. Neue Entwicklungen wie die Elektro- und

Hybridfahrzeuge bieten nun die Chance, zahlreiche Komponenten neu zu konzeptionieren.

Eine entscheidende Etappe für die nachhaltige Einführung von carbonfaserverstärkten Verbundwerkstoffen im Automobilbau wurde mit der Markteinführung des BMWi3 eröffnet. Die Fahrgastkabine dieses vollelektrischen Fahrzeugs besteht aus carbonfaserverstärktem Verbundwerkstoff. Das Fahrzeug soll in einer Stückzahl von 30 000 pro Jahr produziert werden und ist das Ergebnis einer Partnerschaft von BMW und der SGL Group, die eine spezielle Produktionseinheit für diese Anwendung errichtet hat.

Der Erfolg dieser Produktion hängt von der Entwicklung der Verbundwerkstoffe für die Fahrzeugserienproduktion ab (mehrere zehntausend pro Jahr). In jedem Fall müssen die Konzeptionierung und die Verfahren neu überdacht werden und es muss eine Automatisierung der Produktion angestrebt werden.

- Um gute mechanische Widerstandseigenschaften zu gewährleisten ist eine Kontrolle der Faserausrichtung, der Bearbeitung der Vorformen und ihrer Einbringung in die Werkzeuge erforderlich. Die bisher angewandten Verfahren erfolgten größtenteils manuell, waren langsam und schwierig zu automatisieren.
- Die anzuwendenden Verfahren (RTM, Kompression), die in die automatisierten Produktionslinien für Großserienproduktion integriert werden sollen, sind unter diesem Gesichtspunkt zu optimieren. Die Zykluszeiten, die die Dauer der Imprägnierung, der Polymerisierung und der Aushärtung umfassen, müssen verkürzt werden.

So haben sich die deutschen Maschinenbauer Dieffenbacher und KraussMaffei zusammengeschlossen, um automatisierte Linien für das Hochdruck-RTM-Verfahren (HP-RTM) zu entwickeln. Diese Systeme bestehen aus einer Produktionseinheit für Präformen, einer Formpresse und einer Einheit für die Endbearbeitung. Firmen wie BMW, Audi und Daimler haben sich bereits damit ausgestattet.

Globe Machine Manufacturing (US) hat eine abgedichtete Hochgeschwindigkeits- out-of-autoclave-Presse entwickelt. Die Zyklusdauer beträgt 17 Minuten. Sie funktioniert von 0,2 bis 25 Bar bei 5,5 MPa/min und von 43°C bis 288°C bei direkter Erwärmung und bis 482°C bei indirekter Erwärmung.

Plasan entwickelt Verbundwerkstoffe für die Corvette Stingray 2014. Der Carbonprepreg wird in das Werkzeug eingelegt und mit einem 12,7 mm starken Silikonfilm versiegelt. Das Werkzeug wird in einer abgedichteten Kammer von der Globe Presse beladen, dann wird ein durch Druckluft erzeugter Druck angewendet (< 10 Bar), um den im Werkzeug erhitzten Prepreg zu komprimieren.

Quickstep Composites (US) nutzt ein automatisiertes Harzinfusionsverfahren mit Schnellpolymerisation. Das "resin spray transmission" (RST) genannte Verfahren beginnt mit der Aufbringung eines Harzes in das offene Werkzeug. Eine Carbonpräform wird dann auf das besprühte Werkzeug gegeben. Dieses wird geschlossen und das Werkstück wird polymerisiert. Das Gerät ist mit

einer Schnellheiz- und Kühlvorrichtung ausgerüstet (30 °C bis 40 °C/min). Die Zykluszeit beträgt 10 Minuten, die Kosten für das Werkzeug sind gering, die Automatisierung ist problemlos und die so produzierten Werkstücke sind erstklassig.

- Die Zyklusdauer der zurzeit hergestellten Harze ist meist zu lang und damit nicht für die Massenproduktion geeignet. Die Zulieferer arbeiten daran, die Werkstoffe zu verbessern, um so die Sättigungsgeschwindigkeit der Präformen und die Vernetzungsdauer zu verkürzen. So konnten die Systeme Epikote/Epikure von Momentive ihre Aushärtungszeiten von 90 Minuten im Jahre 200 auf 30 Minuten 2009 verkürzen. Heute liegen sie bei 3-5 Minuten und sollten 2015 2 Minuten erreichen. Die Viskosität der Harze ist ebenfalls ein bedeutender Faktor, da der Faseranteil in den Strukturteilen bei 50% oder höher liegt, was die Imprägnierung schwierig macht.
- Die in der Luft- und Raumfahrt angewendeten Kontrollverfahren müssen entsprechend angepasst werden, ebenso wie die Entwicklungsverfahren (insbesondere hinsichtlich der Stoßfestigkeit).

## Windenergie

Der rasant wachsende Windenergiesektor ist mit einem Anteil von 60% am Gesamtmarkt der größte Anwender der Zukunft und liegt somit vor dem Luft- und Raumfahrtsektor.

Seit 7-8 Jahren erlebt der durch die Volatilität der Erdölpreise und die Zustimmung der Öffentlichkeit voran getriebene Windkraftsektor ein rasantes Wachstum; und es ist damit zu rechnen, dass dies in den kommenden Jahre so bleibt. Man weiß, dass die Windenergieproduktion in 20 Jahren um das 115-fache wachsen wird.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit werden die Turbinen immer größer und leistungsfähiger werden müssen. Die durchschnittliche Größe der Rotoren hat sich von 25 Meter Durchmesser auf 80 Meter entwickelt, einige Modelle messen sogar 123 Meter für 5,0 MW, mit einem Gewicht von 17700 Kg pro Rotorblatt. Heutzutage werden 40 000 Rotorblätter pro Jahr hergestellt.

2019 könnten 82 000 Rotorblätter produziert werden, mit einem Carbonverbundwerkstoffanteil von 6%.

Die Anlagen mit längeren Rotorblättern mit einem größeren Wirkungsbereich produzieren mehr Energie zu geringeren kWh-Kosten. Sie können auch geringere Windgeschwindigkeiten ausnutzen, womit sie auch für die Installation in der Nähe der städtischen Ballungsräume geeignet sind. Gleichzeitig rechnet man mit einer Lebensdauer der Windkraftanlagen von 25 Jahren bei einem geringen Wartungsaufwand, insbesondere bei den Off-Shore-Anlagen, wo dieser sich besonders schwierig gestaltet.

Die Bauteile müssen demnach immer strengeren Anforderungen entsprechen; sie werden in Serienproduktion mit immer höheren Qualitätsstandards hergestellt. Diese Anforderungen betreffen die Präzision, die Zuverlässigkeit und die Qualitätskontrolle

und durchziehen die gesamte Wertschöpfungskette bis hin zu den Zulieferern der Werkstoffe.

Die Windkraftträder bestehen aus Polyesterverbundwerkstoff oder aus glas- oder carbonfaserverstärktem Epoxid mit einem Schaumkern aus PVC, PET, SAN oder Balsa, verklebten Verbindungen und einer Polyurethanbeschichtung sowie Metallkonduktoren.

Jedes KW benötigt 10 Kg Material an Rotorblättern, also 75 t für eine Turbine von 7,5 MW.

Diese Branche hat 2012 15 000 t Carbonfaser verbraucht und könnte 2016 23 000 t und 2020 37 000 T erreichen. Diese Zahlen sind trotzdem weniger optimistisch als die von Fachleuten in den vergangenen Jahren prognostizierten. Selbst wenn der Druck erneuerbare Energien einzusetzen steigt und die gesetzlichen Auflagen immer strenger werden, kann die Politik der öffentlichen Hand bezüglich Subventionierung und Entwicklungsstrategien (Off-Shore-Windparks...) einen entscheidenden Einfluss auf den Verbundwerkstoffmarkt ausüben.

## Kostensenkung für den Einsatz von Carbonfasern

---

Bis vor Kurzem kamen die ausgezeichneten Eigenschaften von Carbonfasern aufgrund ihres hohen Kostenaufwands lediglich dem High Tech Markt oder Nischenmärkten zugute. Die technischen Innovationen bei der Herstellung von Carbonfasern und die Entwicklung neuer Precursoren sollten sich in den kommenden Jahren auf die Kosten auswirken.

Vier Bereiche sind zurzeit Gegenstand von Untersuchungen:

- Carbonfasern werden heutzutage durch die Carbonisierung eines Acrylfaserprecursors (PAN) produziert. Diese PAN-Fasern bestimmen 50% des Herstellungspreises von Carbonfasern und Ihre Kosten sind an die Erdölkosten gekoppelt. Die Produktionskosten für Carbonfasern steigen also. Alternativen sind demnach gefragt. Eine aus Lignin hergestellte Faser hätte einen Herstellungspreis von 30% - und ist damit 50% günstiger als eine PAN-Faser. Entwicklungen am Oak Ridge National Laboratory zu einer aus einem neuen Precursor hergestellten Carbonfaser, nämlich Polyethylen, könnten für Unruhe an den Märkten sorgen. Mit einem Mehrkomponentenverwebungsverfahren und der entsprechenden Zuliefererindustrie ist es den Forschern gelungen, Filamente von 0,5 bis 20 µm herzustellen. Die Filamentbündel werden danach einem Sulfonierungsverfahren unterzogen, durch das sie zu unschmelzbaren Fasern mit bestimmten Funktionalitäten zusammengefügt werden. In einer Hochtemperaturcarbonisierungsbehandlung werden dann bestimmte Komponenten eliminiert, die in einen gasförmigen Zustand übergehen und eine Carbonmatrix hinterlassen.

- Weitere Forschungen setzen auf andere Behandlungsverfahren: Die Konversion von PAN-Fasern durch thermische Stabilisation durch Diffusion und Oxidation braucht Zeit, verbraucht viel Energie und ist kostenintensiv. Eine "einfache" Beschleunigung der Oxidation könnte den Preis für Carbonfasern senken.
- Die Plasma- und mikrowellenunterstützte Technologie (Microwave Assisted Plasma, MAP) soll die Carbonisierungsöfen der herkömmlichen Verfahren langfristig ersetzen. Dieses Verfahren könnte die Konversion der Fasern beschleunigen.
- Die Oberflächenbehandlung und die Kompatibilisierung haben nur geringe Auswirkungen auf die Kosten, jedoch bedeutende Auswirkungen auf die Leistung. Die entsprechenden 'Formatting'-Verfahren sollen entwickelt werden, um kostengünstige Fasern nutzen zu können.

Der Polyolefine-Precursor in Verbindung mit neuen thermischen Behandlungsverfahren (Oxidation unter atmosphärischem Plasma, Carbonisierung unter Mikrowellen) könnte den Preis für Carbonfaser von 21,2 \$/Kg 2012 auf 10,5 \$/Kg in der Pilotphase 2017 senken.

## Schlussfolgerung

---

Carbonfaser - Verbundwerkstoffe haben insgesamt gute Aussichten, selbst wenn sich die Marktentwicklung aufgrund einiger Ungewissheiten nicht genau vorhersagen lässt.

Zahlreich sind die Innovationen, sowohl bei den Fasern und Verstärkungen als auch bei thermoplastischen und duroplastischen Matrizen, ebenso bei den Herstellungsverfahren und den Entwicklungstools.

Die sich bereits abzeichnende Kostensenkung bei Carbonfasern wird sich also beschleunigen und neue vielversprechende Marktsegmente erschließen.

F. Monfort-Windels  
Sirris

*Dieser Artikel ist Teil einer Serie von technischen Beiträgen für Unternehmen, die ihre Kenntnisse auf dem Gebiet der Verbundwerkstoffe erweitern möchten. Er wurde im Rahmen des +Composites-Projekts ([www.pluscomposites.eu](http://www.pluscomposites.eu)) produziert.*

Copyright bei den Partnern des +Composites Projekts



