

# DAS LETZTE GEHEIMNIS

## Design to Function vs. Robust Design im Maschinen- und Anlagenbau

Faserverbundwerkstoffe ermöglichen aufgrund ihrer Anisotropie konstruktive Freiheiten bei der Gestaltung, die andere Leichtbauwerkstoffe nicht aufweisen. Bei anforderungs- und materialgerechtem Design entfalten sie ihr enormes Potenzial besonders umfassend in Hybridbauweise. Letzte „Zutat“ bei der Gestaltung bestmöglicher Bauteile im Sinne von robustem Design ist jedoch die Erfahrung.



Bild: Cevotec



Bild: BMW Group



Bild: Airbus



Bild: LZS

Robustes Design, vielfach funktional: Helm, untere Tragflügelabdeckung, Carbon Core Karrosserie, Spant (li. o., li. u., re. o., re. u.)

Das Design von Bauteilen richtet sich in vielen Fällen nach den Auslegungslasten und dem zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren. Diese beiden Anforderungen werden unter dem Begriff „Design to Fiber“ bzw. „Design to Manufacturing“ zusammengefasst und beziehen sich ausschließlich auf die Faserverbundkomponente in einer auszulegenden Struktur.

Effektiver Leichtbau erfordert jedoch in vielen Fällen eine Mischbauweise aus verschiedenen Werkstoffen, um den Anforderungen an das mechanische und thermische Verhalten gerecht zu werden.

Eine häufig vorkommende Materialkombination ist etwa CFK und Metall. Die Metallkomponente dient hierbei meist zur Lasteinleitung bzw. -überleitung, während die CFK-Komponente die mechanischen und thermischen Lasten als inne-

re Formänderungsarbeit aufnimmt und dabei noch eine bestimmte Funktionalität erfüllt. Diese kann zum Beispiel eine Ausgleichsfunktion sein (Winkel, Axialversatz), die Kompensation von Wärmedehnungen oder auch die Integration von Sensorik als funktionale Schicht innerhalb des Mehrschichtverbundes.

### Design to Function

In diesen Fällen richtet sich die Auslegungsphilosophie nach dem „Design to Function“ und beinhaltet Gestaltungsrichtlinien, die sich auf alle beteiligten Werkstoffe und Funktionselemente beziehen. In diesen Gestaltungsrichtlinien werden in möglichst einfachen, skalierbaren Berechnungsvorschriften zum Beispiel die Variation der Laminatdicke, Form und Lage eingeklebter metallischer Interfaces oder

die Anforderungen an eine Beschichtung von Funktionsflächen beschrieben. Werden diese Richtlinien befolgt, entsteht ein hybrides Bauteil aus Metallelementen und Faserverbundkomponenten, das für den Auslegungszustand eine ideale Performance bietet.

Im Betrieb des Bauteils kommt es jedoch zu unterschiedlichen kumulierten, zum großen Teil statistisch ausgeprägten Lastfällen, die eine zeitabhängige Degradation der mechanischen Eigenschaften im Laufe des Bauteillebens nach sich ziehen. Hybride Bauteile wie Robotertragarme, Ausgleichskupplungen, Werkzeugspannfutter oder Hydraulikzylinder, die im industriellen Einsatz Stößen, Temperaturänderungen, aggressiven Medien oder Bedienerfehlern ausgesetzt sind, müssen daher auf eine andere Weise ausgelegt werden.

---

## Theoretisch optimal

---

Diese Designrichtlinien berücksichtigen das unterschiedliche Versagensverhalten der beteiligten Werkstoffe sowie insbesondere das Gesamtversagen im Werkstoffverbund. Die kraft- und formschlüssigen Pin-Verbindungen zum Beispiel können Metall und CFK sicher über eine lange Betriebsdauer verbinden und bieten ein abgestuftes Degradationsverhalten, das sich aus Faserbruch, Matrixbruch, Interfaceversagen Metall/CFK und aus Pinversagen zusammensetzt.

Beim Pressverband wirkt sich die hohe Festigkeit der Kohlenstofffaser positiv auf den übertragbaren Fugendruck aus, während ihre Sprödigkeit beim Einpressvorgang zu lokalen Schädigungen führt, die sich während des Betriebs des Bauteils immer mehr zu kritischen Schadensakkumulationen ausweiten und letztendlich zum Gesamtversagen des Bauteils an der Verbindungsstelle führen.

Die Beispiele Pinverbindung und Pressverband zeigen die Kritikalität des Übergangsbereiches CFK/Metall auf. Der kann zwar simulativ modelliert werden, weist aber in der Praxis ein zeitabhängiges Versagensverhalten auf, das sich am besten durch eine Initialschädigung verbunden mit einem instationären Schädigungswachstum beschreiben lässt.

---

## Tücken der Praxis

---

Dieses Schädigungswachstum führt meist zu lokalen Spannungsüberhöhungen an den Verbindungsstellen, die von der Metallkomponente ausgeglichen werden müssen, da die Faserverbundkomponente kaum plastisches Fließvermögen besitzt. Abhilfe kann hier eine Klebeschicht als Puffer zwischen den Werkstoffen schaffen, die auch Fertigungstoleranzen in bestimmten Grenzen ausgleichen kann.

Fertigungstechnisch stellen diese schadenstoleranten Verbindungsstellen eine Herausforderung dar, da nicht nur die Oberflächen sehr sorgfältig bearbeitet, sondern auch die Form- und Lagetoleranzen eingehalten werden müssen. Insbesondere bei flächenmäßig großen Körpern im Verhältnis zu geringer Wandstärke wie zum Beispiel



*Rotor des hybriden CFK / Metall Werkzeugspannfutters mit integrierter Luftabsaugung (BMBF-Forschungsprojekt MAI Span, Spitzencluster MAI Carbon)*

Antriebswellen und Schalenstrukturen, machen Fertigungstoleranzen insbesondere bei der Faserverbundkomponente einen erhöhten Nachbearbeitungsaufwand notwendig.

---

## Design to Robustness

---

Alle diese Aspekte, von der schrittweisen, zeitabhängigen Degradation der Steifigkeit der Verbindungsstelle bis hin zu den Ungenauigkeiten im Fertigungsverfahren, werden zusammengefasst unter dem Begriff „Design to Robustness“. Von den vier genannten Auslegungsphilosophien ist das Design to Robustness am schwierigsten umzusetzen. Dieser Ansatz ist zu einem großen Teil erfahrungsbasiert und lässt sich nicht mathematisch herleiten. Vielmehr ist die Quantifizierung des vorhandenen Wissens in einfach umzusetzende Designrichtlinien Voraussetzung für eine tragfähige, über lange Jahre einsatzfähige hybride Bauteilkomponente. Gelingt der Nachweis dieses Prinzips am Demonstrator, eröffnen sich für den Konstrukteur die eingangs erwähnten Möglichkeiten der Designfreiheit in vollem Umfang.

Weitere Informationen:

**Prof. Dr.-Ing. André Baeten,**  
Maschinenbau und Verfahrenstechnik,  
HS Augsburg,  
Telefon +49 (0) 821 / 55 86-31 76,  
andre.baeten@hs-augsburg.de,  
www.hs-augsburg.de/fmv



*Hybrides CFK/Metall-Werkzeugspannfutter mit integrierter Luftabsaugung in einer CNC Werkzeugmaschine (BMBF-Forschungsprojekt MAI Span, Spitzencluster MAI Carbon)*