

# Faserverbundleichtbau in der Großserie: Chancen und Herausforderungen für den Produktentwickler

Olaf Helms, Lothar Kroll

Im Luftfahrtbereich haben sich kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) wegen ihrer hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten längst als Konstruktionswerkstoffe etabliert. In der Großserienfertigung von Automobilkarosserien kommt diese Materialgruppe jedoch nur zögerlich zum Einsatz. Offensichtlich sprechen noch viele Argumente für den Einsatz von metallischen Werkstoffen: Denn auch Leichtmetalle und pressgehärtete Stähle ermöglichen immer höhere Leichtbaugrade, ohne dabei signifikante Kostensteigerungen zu generieren. Zudem sind Fertigungs- und Montageabläufe für Metallkarosserien etabliert und weitgehend frei von Entwicklungsrisiken.

Vor diesem Hintergrund erscheint es schwer, mit neuen Leichtbaumaterialien und den zugehörigen Bauweisen einen Durchbruch erzielen zu können. Dabei zeigt das Produktsegment der Supersportwagen schon deutlich, dass zusätzliche Leichtbaupotentiale durch beanspruchungsgerecht gestaltete und optimierte CFK-Strukturen für den Automobilbau eröffnet werden. Bislang lassen sich derartig optimierte CFK-Strukturen jedoch kaum wettbewerbsfähig in Großserie realisieren. An dieser Stelle ergeben sich Chancen und zugleich neue Herausforderungen für die Produktentwickler: Zum einen sind Faserverbundbauweisen zu erarbeiten, mit denen die Leichtbaupotentiale von CFK weitgehend ausgereizt werden. Zum anderen ist die automatisierte Fertigung bei hohen Taktraten zu ermöglichen. Die Lösung beider Teilaufgaben setzt den Einsatz geeigneter materialspezifischer Konstruktionsmethoden voraus.

## Tragwerksorientierte Gestaltsynthese

Bei der Gestaltung von mechanisch wirkenden Komponenten kommen vor allem zwei Arbeitsmethoden zur Anwendung: Funktionsflächenorientierte Gestaltsynthese und tragwerksorientierte Gestaltsynthese (Hufenbach, W.; Helms, O. 2013). Die häufig intuitiv eingesetzte funktionsflächenorientierte Gestaltsynthese eignet sich für den Entwurf von vielen Maschinenkomponenten aus isotropem Material, deren Hauptfunktion im Wesentlichen über die Funktionsflächen bestimmt wird (Abbildung 1). Hierzu zählen klassische Maschinenelemente wie etwa Zahnräder, Getriebewellen, Lager und Lagerböcke, Motorkomponenten, viele Hydraulik- und Pneumatik-Elemente, Dichtungssysteme sowie Verbindungselemente und Kupplungen.

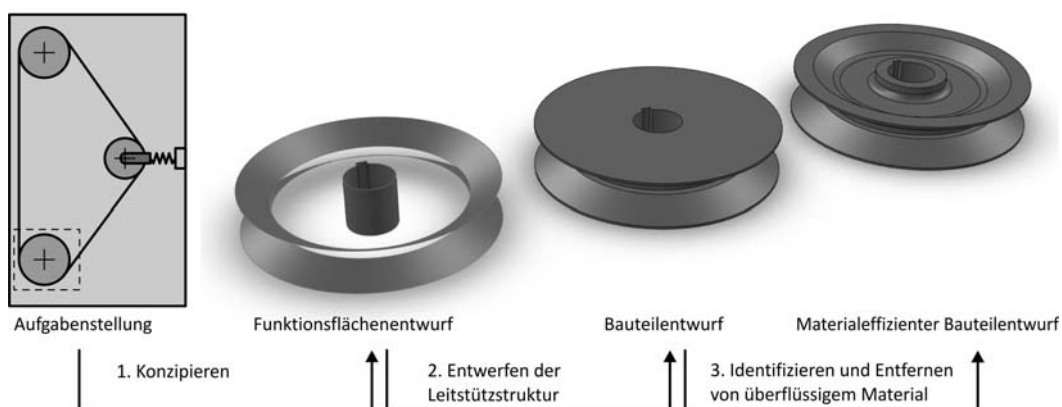


Abbildung 1: Vorgehen bei der funktionsflächenorientierten Gestaltsynthese am Beispiel einer Riemenscheibe

Zunächst werden die benötigten Funktionsflächen gestaltet und zueinander angeordnet, wobei oft eine kompakte, bauraumgerechte Anordnung angestrebt wird. Die Zwischenräume zwischen den Funktionsflächen werden dann mit Baumaterial gefüllt, womit die Leitstützstruktur erzeugt wird (vgl.

Matthiesen, S. 2002). Sofern Leichtbau oder Materialeffizienz eine Rolle spielen, können abschließend noch überflüssige Materialmengen identifiziert und entfernt werden. Dabei kann auch eine rechnergestützte Topologieoptimierung vorteilhaft zum Einsatz kommen.

Für Strukturbauteile ist diese funktionsflächenorientierte Bauteilsynthese weniger geeignet. Sofern die Hauptfunktion eines Bauteils oder einer Baugruppe in der Übertragung von Kräften und Momenten über größere Strecken besteht, ist zumeist die Anwendung der tragwerksbezogenen Gestaltsynthese zu empfehlen (Abbildung 2), um eine genauere Strukturauslegung vorzubereiten. Diese tragwerksbezogene Vorgehensweise funktioniert für Strukturen aus isotropem oder auch orthotropem Material.

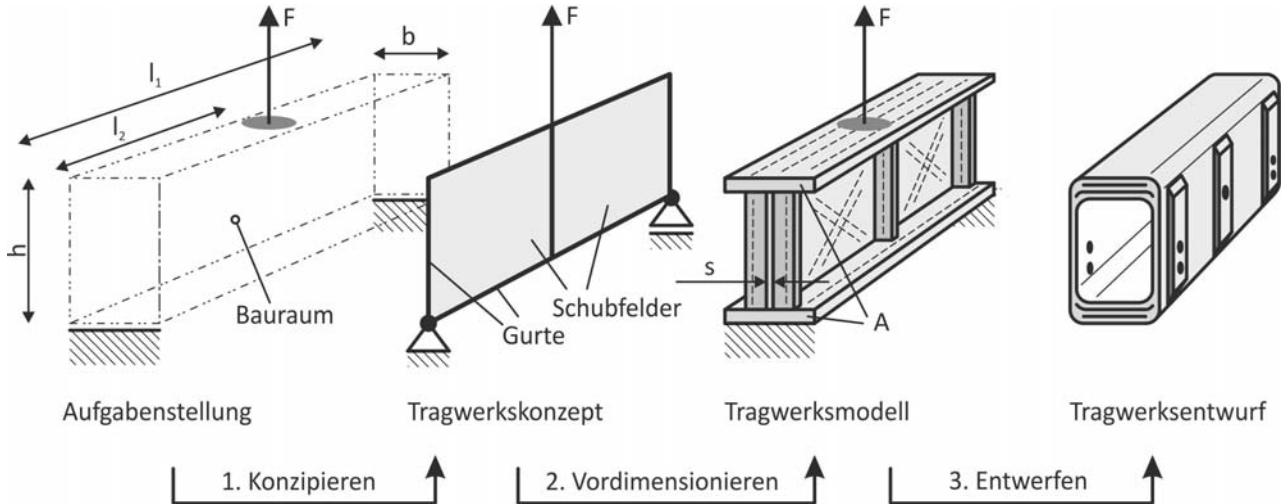


Abbildung 2: Vorgehen bei der tragwerksbezogenen Gestaltsynthese am Beispiel eines Biegeträgers

Die Aufgabenstellung für Tragwerkskonstruktionen umfasst mindestens eine Bauraumdefinition und eine Spezifikation der Lasten, die durch den Bauraum zu übertragen sind. In einer Konzeptphase werden Tragwerkselemente wie etwa Balken, Stäbe, Gurte und Schubfelder derart angeordnet, dass die strukturmechanische Aufgabe erfüllt werden kann. Die Tragfunktionen der einzelnen Tragwerkselemente ist dabei überschaubar gehalten, so dass eine relativ einfache Bestimmung der jeweiligen Schnittlasten möglich ist. Zudem lassen sich derartigen Tragwerkselementen unmittelbar beanspruchungsgerechte Faserorientierungen zuweisen (Abbildung 3). Damit sind die Voraussetzungen für die Vordimensionierung geschaffen, bei der die benötigten Querschnittsflächen für die Tragwerkselemente ermittelt werden. Der Zusammenhalt der einzelnen Tragwerkselemente wird zunächst als ideal angenommen. In weiteren Entwurfsschritten sind entsprechend dieser Annahme tragfähige Verbindung zwischen den Tragwerkselementen zu schaffen. Bei Faserverbundstrukturen bietet es sich häufig an, mehrere Tragwerkselemente in integralen Bauteilen zusammenzufassen.

Tragwerkselement	Stab	Balken, Rahmen	Gurt	Schubfeld
Lasten	Zug/Druck	Zug/Druck, Torsion, Biegung, Querkraft	Zug/Druck	Querkraft
Faserorientierung	0°	0°, ±45°	0°	±45°
Skizze				

Abbildung 3: Tragwerkselemente für die Tragwerkskonzeption

Diese tragwerksbezogene Gestaltsynthese führt bei relativ klar definierten strukturmechanischen Aufgabenstellungen auf effiziente Weise zu beanspruchungsgerechten Konstruktionen und bei Bedarf zu hohen Leichtbaugraden. Geeignete Anwendungsfelder zeigt Abbildung 4.

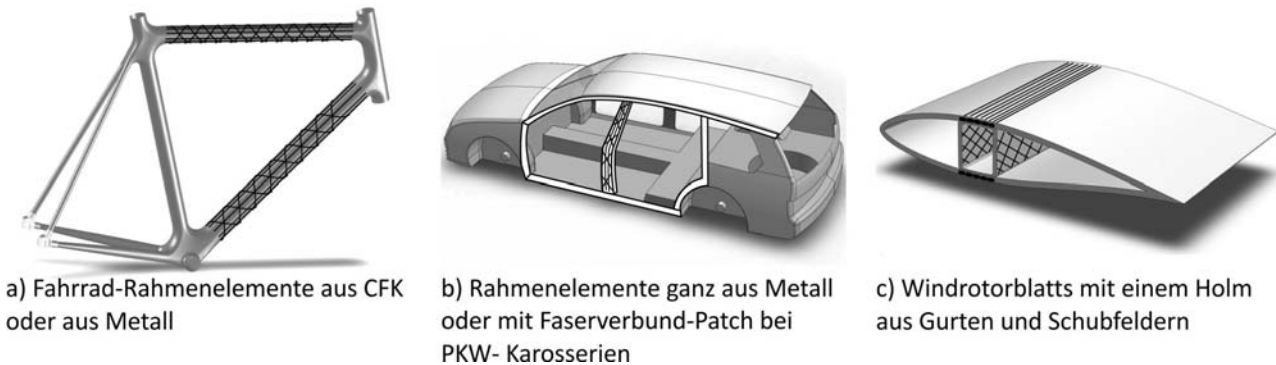


Abbildung 4: Anwendungsfelder für die tragwerksorientierte Gestaltsynthese: Klar definierte strukturmechanische Aufgabenstellungen

Etwas komplizierter wird die Bauteilgestaltung, wenn nicht nur Tragfunktionen sondern auch Verkleidungs- oder Einhausungsfunktionen zu realisieren sind. Hierbei bieten sich unterschiedlich Funktionsintegrationsgrade an (Abbildung 5). In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entstanden bei mehreren Automobilherstellern Sportwagen mit Gitterrohrrahmen, die mit dünnwandigen Schalenbauteilen verkleidet wurde. Die Hauptlasten von Fahrwerk, Antrieb und Bremsanlage wurden von der Rahmenstruktur übertragen. Die weniger tragfähige Verkleidung musste lediglich die vom Fahrtwind erzeugten Strömungskräfte aufnehmen (a). In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts setzten sich selbsttragende Karosserien durch, die aus einer Vielzahl an Blechbauteilen gefügt wurden (b).



Abbildung 5: Unterschiedliche Strukturintegrationsgrade bei Karosserien

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie Karosserien in Faserverbund-Leichtbauweise vorteilhaft aufgebaut werden können. Zu berücksichtigen ist dabei, dass Endlosfaser-Kunststoff-Verbunde lediglich in Faserrichtung exzellente spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten bieten. Dementsprechend sind die Faserverstärkungen einem schlüssigen Tragwerkskonzept entsprechend beanspruchungsgerecht zu platzieren und auszurichten. Denn als „Füllmaterial“ sind vor allem Kohlenstofffasern zu teuer und zu schwer. Noch werden Bauteile vielfach mit Quasi-isotropen Laminataufbauten ausgeführt. Derartige Lösungen bieten nur selten geldwerte Vorteile gegenüber metallischen Bauweisen.

Bei der Lösungsfindung bringt womöglich ein Blick auf die alte Gitterrohrrahmen-Bauweise eine geeignete Inspiration. Denn mit Rahmenelementen (auch: Space-Frame) können sehr beanspruchungs- und faserverbundgerechte Karosseriestrukturen gestaltet und ausgelegt werden. Eine räumliche Trennung von Rahmentragwerk und Verkleidung ist heute unerwünscht, da hierfür in PKW zumeist keine Bauräume zur Verfügung stehen. Jedoch bieten Faserverbund-Fertigungsprozessketten grundsätzlich sehr gute Strukturintegrationsmöglichkeiten. Dabei wird ein erheblicher Teil der Wertschöpfung im Rahmen des Preforming erreicht. Beim Preforming lassen sich unterschiedliche Faserverstärkungen für unterschiedliche Trag- und Verkleidungsfunktionen zusammenführen und in ein Großbauteil integrieren (c). Zum Beispiel können relativ leichte und preiswerte Naturfaserverstärkungen für die Verkleidungsfunktionen eingesetzt werden, während integrierte Rahmenelemente mit Kohlenstofffasern realisiert werden. Darüber hinaus lassen sich Lasteinleitungspunkte gezielt verstärken. Derartige Bauweisen bieten den Vorteil, dass die relativ teuren Kohlenstofffasern nur dort zum Einsatz kommen, wo diese tatsächlich zur Lastübertragung benötigt werden (Abbildung 6).

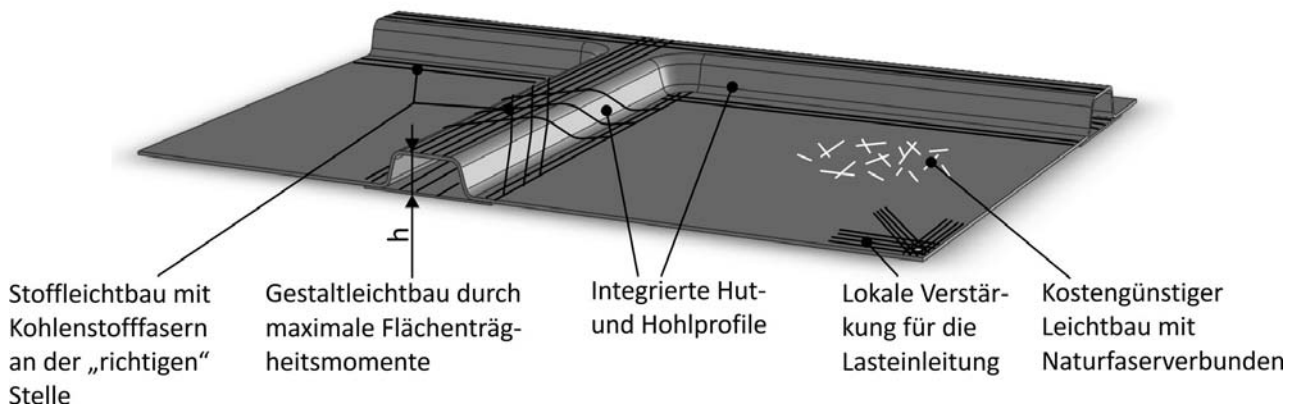


Abbildung 6: Mögliche Strukturintegration bei Faserverbund-Karosseriebauteilen

Fahrzeugbauteile in beanspruchungsgerechter Mischverbundbauweise müssen jedoch nicht nur gestaltet und ausgelegt sondern auch in großer Serie hergestellt werden können. Die Bereitstellung von bauteilspezifischen Verstärkungshalbzeugen mit lastpfadgerechten und endkonturnahen Architekturen ist dafür ein wichtigster Baustein. Ein kontinuierlich wachsendes Spektrum an textilen Produktionslösungen bietet hierfür vielfältige Möglichkeiten.

### Endkonturnahe und lastpfadgerechte Verstärkungshalbzeuge

Mit Hilfe neuartiger Verstärkungshalbzeuge sollen vor allem zwei Aufgaben gelöst werden:

1. Bislang entstehen automobile CFK-Strukturen überwiegend aus klassischen Flächenhalbzeugen wie etwa UD- oder Multiaxial-Gelegen. Diese Halbzeuge werden mit konstanter Bahnbreite und konstantem Textilaufbau hergestellt. Beim Preforming erfolgt der Zuschnitt gemäß Bauteilkontur, wobei ein erheblicher Teil der eingesetzten Halbzeuge (bis zu 50%) als Verschnitt abfällt. Dieses Verschnittmaterial lässt sich zwar zu Recycling-Vliesen aufbereiten, jedoch werden damit die hohen CFK-typischen Materialeigenschaften nicht mehr erreicht. Daher soll der Faserverschnitt mit den neuen bauteilspezifisch hergestellten Flächenhalbzeugen minimiert werden.
2. Klassische Flächenhalbzeuge bieten kaum Möglichkeiten zur beanspruchungsgerechten Bauteilverstärkung. Aus gleichmäßig hergestellten Flächenhalbzeugen entstehen zumeist Schichtverbunde mit konstantem Aufbau über die gesamte Fläche des jeweiligen Schalenbauteils. Der Lagenaufbau wird zumeist für den höchstbeanspruchten Bauteilbereich dimensioniert. Ein großer Teil der verbauten Kohlenstofffasern kann also kaum zur strukturmechanischen Funktion beitragen. Neue lastpfadgerechte Halbzeugen stellen somit erhebliche Kosten- und Gewichtseinsparungen in Aussicht.

Am Fraunhofer-IWU in Chemnitz werden in Zusammenarbeit mit dem Textilmaschineninstitut Cetex zwei Lösungsansätze zur Großserienfertigung von bauteilspezifischen Verstärkungshalbzeugen verfolgt: Ein erster Ansatz greift das in der Luftfahrtindustrie bewährte Tape-Legen auf. Klassische Tape-Legeanlagen bringen jedoch bislang nicht die im Serienautomobilbau geforderte Produktivität. Zudem sind die in der Luftfahrt verarbeiteten, relativ schmalen Slit-Tapes für Automobilanwendungen zu teuer. Daher arbeiten aktuell einige Institute und Unternehmen an technologischen Anpassungen. Abbildung 7 zeigt den Chemnitzer Ansatz, bei dem ein Naturfaser-Flächenhalbzeug als Basismaterial zur Anwendung kommt. Mit Hilfe einer angepassten Tape-Legeanlage werden auf dem Basismaterial passend zur Bauteilbeanspruchung Abschnitte von Kohlenstofffaser-Bändern in Produktionsrichtung parallel aufkaschiert.

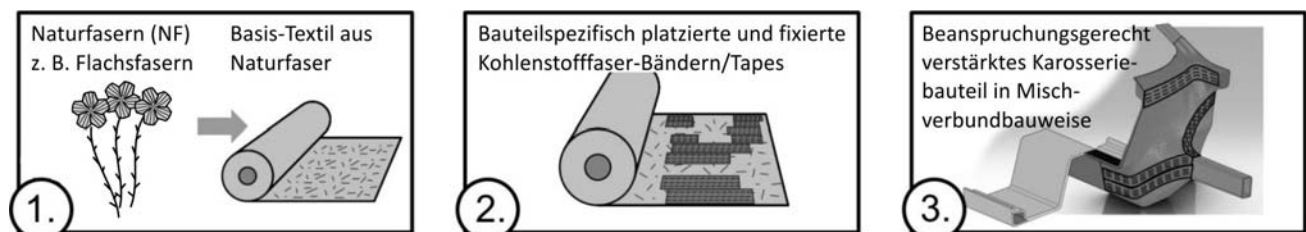


Abbildung 7: Chemnitzer Ansatz zur ressourceneffizienten Herstellung von beanspruchungsgerechten Fahrzeugstrukturen in Mischverbund-Bauweise

Ein zweiter Ansatz zur Herstellung von lastpfadgerechten Verstärkungshalbzeugen besteht im seitlichen Versetzen von Kettfäden. Dabei dient ebenfalls ein Textil aus preiswerteren Fasern (z. B. Naturfaser-Gelege,

Recyclingfaservlies) als Basismaterial. Auf dieses Basismaterial werden Kohlenstofffaserstränge lastpfadgerecht aufkaschiert oder aufgenäht (Abbildung 8).

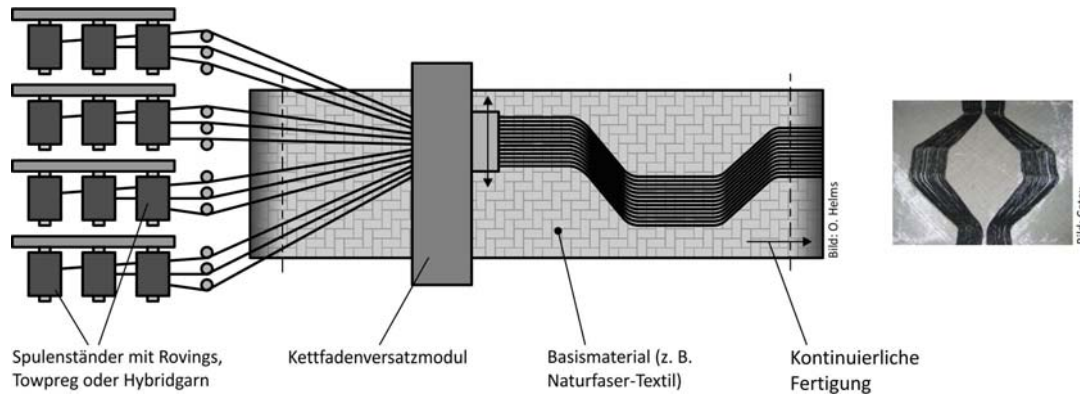


Abbildung 8: Herstellung von Kettfadenversatz-Halbzeugen

## Interaktiver Entwurf

Die neu errungenen Freiheiten bei der Gestaltung von Verstärkungshalbzeugen und Fertigungsprozessen führen auch zu neuen Aufgaben in der Produktentwicklung. Mehr als bei klassischen Metallkonstruktionen muss bei Faserverbundstrukturen die Fertigungsprozesskette und ihre Zwischenprodukte mitgestaltet werden: Vom eingesetzten Material über Verarbeitungsschritte bis hin zum fertigen Produkt. Schnell stellt sich dem Entwickler die Frage, in welcher Reihenfolge die verschiedenen Bausteine zu erarbeiten sind. Einen bewährten Fahrplan zeigt Abbildung 9. Deutlich wird, dass die Bauteilgestaltung interaktiv mit der Material- und der Prozessentwicklung verknüpft ist. Da die Funktionserfüllung Priorität hat, beginnt der Arbeitsablauf bei der Konzeption des Tragwerks. Die ersten Arbeitsschritte greifen die tragwerksbezogene Gestaltsynthese auf. Mit dem vordimensionierten Tragwerksmodell werden schon erste Materialfestlegungen getroffen. Schon beim Einstieg in die Entwurfsphase kommen Überlegungen zum Aufbau der Halbzeuge und zur Fertigungstechnik hinzu (Hufenbach, W.; Helms, O. 2011).

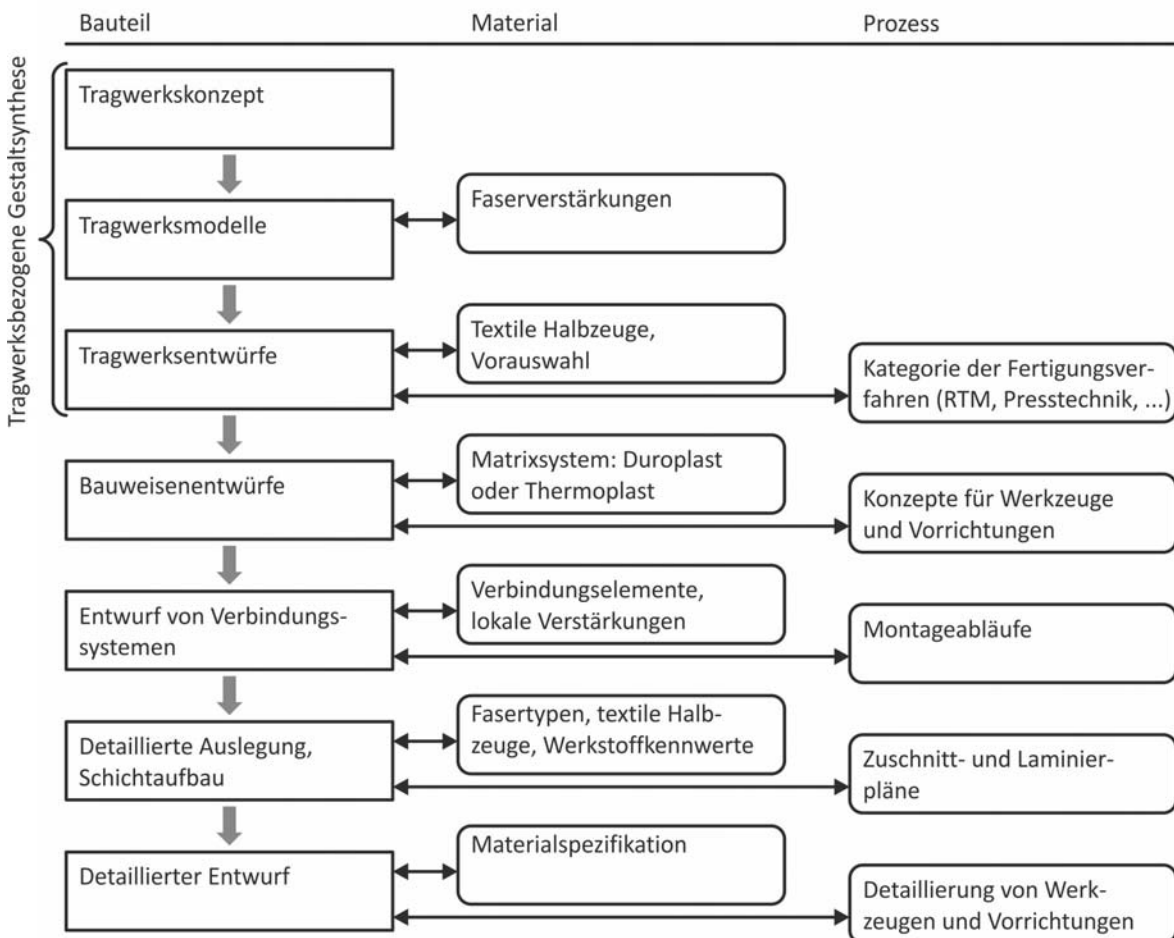


Abbildung 9: Interaktives Vorgehen beim Entwerfen von Faserverbundstrukturen

## Kreislaufgerechte Modularisierung

Der Erfolg von Faserverbundbauweisen im Großserien-Automobilbau hängt auch davon ab, ob eine ausreichende Nachhaltigkeit erreicht werden kann. Bislang folgt die Automobilindustrie der Gewohnheit, am Ende eines Fahrzeuglebens die eingesetzten Materialien zu recyceln und daraus neue Halbzeuge zu formen. So etwa werden Stahlkarosserien eingeschmolzen und zu neuen Blechhalbzeugen ausgewalzt. Für das stoffliche Recycling von Faserverbundmaterialien zeichnet sich jedoch noch keine industrialisierbare Lösung ab. Alle bislang untersuchten Technologien führen zu erheblichen Eigenschaftsverlusten. Allerdings bieten Faserverbundwerkstoffe durch hohe Ermüdungsfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit beste Voraussetzungen für die Wiederverwendung ganzer Bauteile oder Module. Es stellt sich also die Frage, ob zukünftig eine Kreislaufwirtschaft für automobiler Faserverbundstrukturen aufgebaut werden kann (Abbildung 10). Ein Teil der Lösung besteht in der Entwicklung von Baukastensystemen, die über einen Modellwechsel hinaus Bestand haben. Bislang haben die Fahrzeug-Designer relativ freie Hand bei der Gestaltung des Nachfolgemodells. Eine Herausforderung für die Produktentwickler besteht also in der Kompromissfindung zwischen Beibehaltung von Fahrzeugarchitekturen und Design-Flexibilität. Durch Gestaltung und Ausnutzung von flexiblen Montageschnittstellen können voraussichtlich vielfältige Produktvarianten kreiert werden. Die benötigten Baukastenlösungen erfordern jedoch vom Produktentwickler ein hohes Maß an Weitsicht.

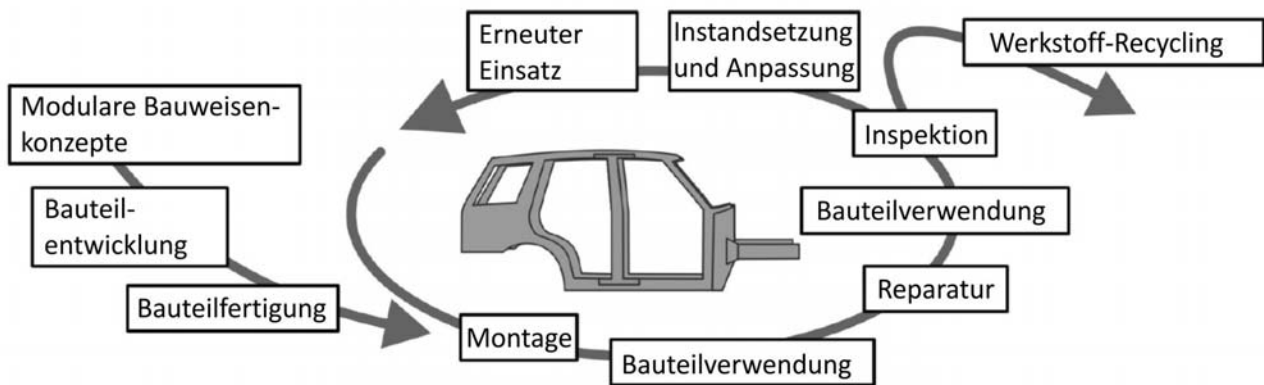


Abbildung 10: Mögliche Kreislaufwirtschaft für automobiler Faserverbundstrukturen

Eine weitere Fragestellung besteht in der Rückführung von alten Karosserien, um die Instandsetzung und die Wiederverwendung durchführen zu können. Gegenwärtig werden ältere Fahrzeuge überwiegend in wirtschaftlich schwächere Länder exportiert. Eine geordnete Rückführung von Fahrzeugen oder Bauteilen erscheint zunächst schwierig. Allerdings zeichnen sich schon heute neue Geschäftsmodelle bei den Automobilherstellern ab. Zukünftig kauft der Kunde womöglich eine Mobilitätsoption statt einem Fahrzeug. Fahrzeuge bleiben dann Eigentum des Fahrzeugherstellers (Leasing, Car-Sharing, Vermietung). Somit würden die Faserverbundbauteile in der Hand des Automobilherstellers bleiben und könnten nach Bedarf instandgesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

Matthiesen, S. 2002: Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation, Universität Karlsruhe

Hufenbach, W.; Helms, O. 2011: Zur fertigungsgerechten Konstruktion von integrativen Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. In: Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieurwerkstoffe, 63 (2011) 11/12, 73-78

Hufenbach, W.; Helms, O. 2013: Konstruieren von Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden. In: Feldhusen, J. (Hrsg.): Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung, Springer

## Kontakt

---

Die hier beschriebenen Ansätze zur Realisierung von Faserverbund-Leichtbauweisen in der automobilen Großserie werden gemeinsam vom Fraunhofer-IWU, dem Lehrstuhl für Strukturleichtbau und Kunststofftechnik der TU Chemnitz, dem Textilforschungsinstitut Cetex und in Zusammenarbeit mit Industriepartnern weiterentwickelt und fließen in anwendungsnahe F&E-Projekte ein. Eine koordinierende Rolle übernimmt dabei die am Fraunhofer-IWU neu gegründete Hauptabteilung „Textiler Leichtbau“.

Dr.-Ing. Olaf Helms  
Abteilungsleiter  
Systeme und Technologien für textile Strukturen STEX  
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU  
Reichenhainer Str. 88  
09126 Chemnitz  
[olaf.helms@iwu.fraunhofer.de](mailto:olaf.helms@iwu.fraunhofer.de)  
[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)