

Begutachteter und freigegebener (peer reviewed) Fachaufsatz, erschienen in:
Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe
Jahrgang 63 (2011), Heft 11/12, Seiten 73-78

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Werner Hufenbach
Dr.-Ing. Olaf Helms

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)
Technische Universität Dresden

Zur fertigungsgerechten Konstruktion von integrativen Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Bei der Konzeption von Strukturbauteilen steht zunächst die Tragfunktion im Vordergrund. In der anschließenden Entwurfsphase sind neben strukturmechanischen auch werkstoff- und fertigungstechnische Gesichtspunkte zu beachten. In dieser Phase ist auch der zu realisierende Strukturintegrationsgrad festzulegen, wobei sich Zielkonflikte ergeben können. Beim Entwurf von integrativen Faserverbundstrukturen erweist es sich als hilfreich, Fertigungsverfahren zu abstrahieren und grundsätzliche Formgebungsmöglichkeiten zu identifizieren.

During the conceptual design of structural parts at first the function of load transmission has to be considered. Within the following design step beside the structural aspects also technological aspects play a role. In this phase a grade of structural integration must be defined, whereat a conflict of objectives may occur. For the design of integrative fiber composite structures it proves to be helpful to abstract the manufacturing processes and to identify fundamental capabilities for the forming of parts.

Einführung

Der wirtschaftliche Erfolg eines technischen Produkts hängt an erster Stelle von der Erfüllung der geforderten Funktionen ab. Daher sind bei der Produktentwicklung zunächst funktionale Gesichtspunkte zu fokussieren. Bei vielen Maschinenkomponenten stehen strukturelle Tragfunktionen im Vordergrund, die durch den „Zusammenhalt fester Stoffe“ zu erfüllen sind (physikalischer Effekt). Die Synthese derartiger Strukturbauteile führt idealerweise von der Last- und Bauraumspezifikation über die Tragwerkskonzeption (Wirkprinzip) und die beanspruchungsgerechte Vordimensionierung bis hin zum Tragwerksentwurf (Bild 1). Fertigungs- und Montageabläufe werden bis dahin kaum betrachtet. Somit werden Tragwerke zunächst als einteilige, zusammenhängende Strukturen gestaltet. Die fertigungstechnische Umsetzung derartiger integraler Tragwerksentwürfe ist zwar in vielen Fällen möglich, führt jedoch oft zu einem erheblichen prozesstechnischen Aufwand. Daher sind auf Basis des Tragwerksentwurfs in der Regel noch Bauweisenentwürfe nach herstellungstechnischen Gesichtspunkten zu erarbeiten, wobei komplexe Strukturen in fertigungsgerechte Einzelbauteile gegliedert werden. Für diese Gliederung ergeben sich zumeist mehrere Möglichkeiten, wobei die Festlegung wiederum nach strukturmechanischen und herstellungstechnischen Gesichtspunkten erfolgt.

Die Auswahl von geeigneten Fertigungsverfahren wird sowohl durch die benötigte Bauteilgestalt als auch durch die festgelegten Werkstoffgruppen bestimmt. In manchen Fällen bietet sich eine Iterationsschleife an, so dass umgekehrt Tragwerksentwurf und Werkstoffauswahl auch nach fertigungs-

technischen Aspekten modifiziert werden können. Dabei ist jedoch auf Bewahrung der Funktionalität zu achten.

Die meisten Maschinenbauteile und Fahrzeugstrukturen entstehen in metallischen Bauweisen, wobei sich der Konstrukteur auf ein umfassendes, historisch gewachsenes Angebot an Fertigungsverfahren stützen kann. Je nach gewählter Fertigungstechnologie sind mehr oder weniger Restriktionen für den Bauteilentwurf zu berücksichtigen. So etwa ergeben sich mit dem Gießen oder dem spanenden Bearbeiten von Blockmaterial weite Gestaltungsfreiräume. Das fertigungsgerechte Entwerfen beschränkt sich bei derartigen Metallbauteilen zumeist auf die Minimierung des Fertigungsaufwands. Die Grenzen der technologischen Realisierbarkeit werden hingegen selten erreicht.

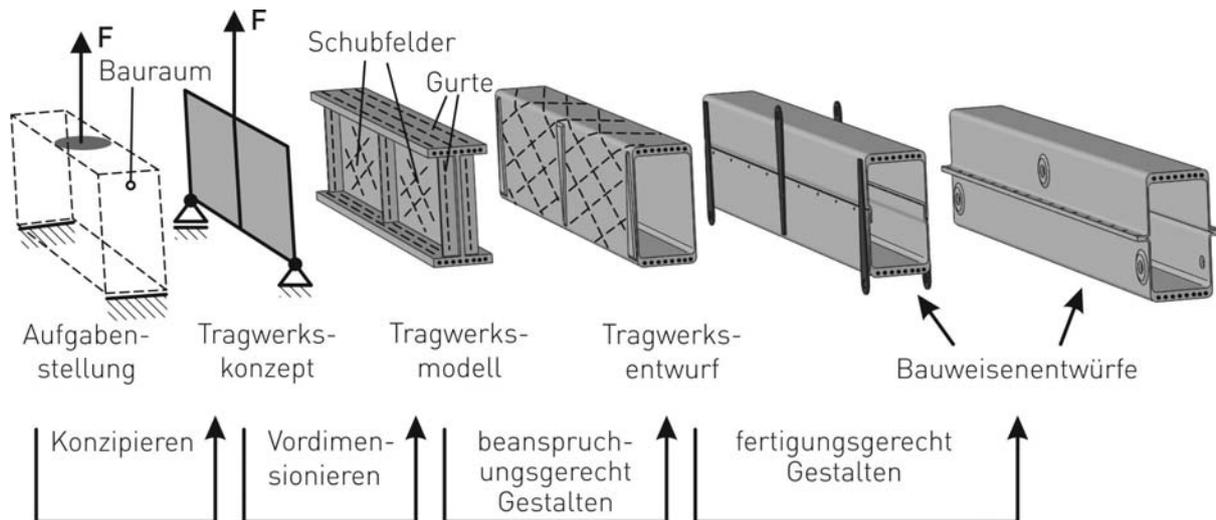


Bild 1: Tragwerksbezogene Bauteilsynthese am Beispiel eines Biegeträgers

Besonders effiziente Fertigungsabläufe können häufig für metallische Blechkonstruktionen erreicht werden. Derartige Bauweisen führen jedoch zu größeren fertigungstechnischen Restriktionen, da die Art der Halbzeuge und die Zahl der Fertigungsverfahren stark eingeschränkt sind. Die Festlegung auf eine Blechbauweise führt zur Gestaltung von Schalenstrukturen, wobei verzweigte oder geschlossene Strukturen zumeist den Einsatz von Fügeverfahren voraussetzen.

Neben den metallischen Werkstoffen spielen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) eine zunehmende Rolle für die Realisierung von hochbeanspruchten Strukturbauteilen. Derartige Faserverbundkomponenten entstehen häufig als Schalenstrukturen durch das beanspruchungsgerechte Schichten und Ausrichten von Endlosfaser- und Textilverstärkungen. Bei der fertigungsgerechten Gestaltung von Faserverbundschalen ergeben sich somit Analogien zum Blechteil-Entwurf, da Faserverstärkungen ebenfalls als flächige Halbzeuge in Formwerkzeugen verarbeitet werden. Dementsprechend vergleichbar ist auch die fertigungsgerechte Gestaltung von FKV- und Blech-Schalenstrukturen. Für freie räumliche Formgebungsprozesse wie z. B. dem Gießen oder dem Zerspanen von Blockmaterial ergeben sich jedoch keine Analogien, da diese Verfahren einer beanspruchungsgerechten Ausrichtung von Endlosfaserverstärkungen entgegen stehen.

Bei der Konstruktion von Faserverbundstrukturen ergeben sich weitere fertigungstechnische Restriktionen, da neben der beanspruchungsgerechten Faseranordnung auch die Einbettung der Faserverstärkung in die Kunststoffmatrix zu gewährleisten ist. Für die Infiltration und die Formgebung von Faserverstärkung und Matrixwerkstoff wurde bereits eine Vielzahl an Technologien entwickelt, wobei das passende Verfahren im Rahmen des Bauteilentwurfs in Abhängigkeit von Baugröße, Gestalt, Faserverstärkung, Matrixsystem und Stückzahl zu bestimmen ist.

Werkstoffe und Prozesse zur Herstellung von integrativen Faserverbundstrukturen

Die steigende Nachfrage nach Faserverbundstrukturen geht mit der branchenübergreifenden kontinuierlichen Entwicklung von effizienten Fertigungstechnologien einher [1]. Bei der Entwicklung von Faserverbundstrukturen gilt es, dieses umfassende Fertigungs-Know-how vorteilhaft zu nutzen. Nur

selten kann ein Systemanbieter alle benötigten Fertigungstechnologien für Einzelkomponenten im eigenen Haus bereitstellen. Häufiger werden Faserverbundstrukturen bei spezialisierten Fertigungsdienstleistern zugekauft, womit jedoch ein Zugriff auf die bestgeeignete Technologie ermöglicht wird. Effiziente Fertigungsabläufe sind in Interaktion mit dem Bauteilentwurf zu erarbeiten [3]. Dabei zeigt sich, dass besonders beanspruchungs- und funktionsgerechte Entwürfe zumeist ein hohes Maß an Strukturintegration erfordern. Somit werden produktspezifische Fertigungsabläufe benötigt, mit denen sich die vorteilhaften integrierenden Bauweisen effizient realisieren lassen. Häufig werden jedoch technologische oder wirtschaftliche Grenzen erreicht, die wiederum eine Vereinfachung der Bauteilentwürfe nach werkstoff- und herstellungstechnischen Gesichtspunkten erfordern.

Die Abstimmung der Bauteilgestalt hinsichtlich technologischer Restriktionen beginnt idealerweise frühzeitig im Entwurfsprozess auf höherem Abstraktionsniveau. Dabei hilft eine übersichtliche Gliederung der gängigen Verfahren und Verfahrensvarianten in fünf Kategorien (Bild 2). Mit der Bestimmung einer geeigneten Fertigungskategorie werden erste fertigungstechnische Restriktionen für den Bauteilentwurf spezifiziert. Hieraus lässt sich im Weiteren auf die Möglichkeiten zur Strukturintegration schließen. So ergibt sich eine hilfreiche Orientierung, ohne die Gestaltungsfreiräume zu sehr einzuschränken.

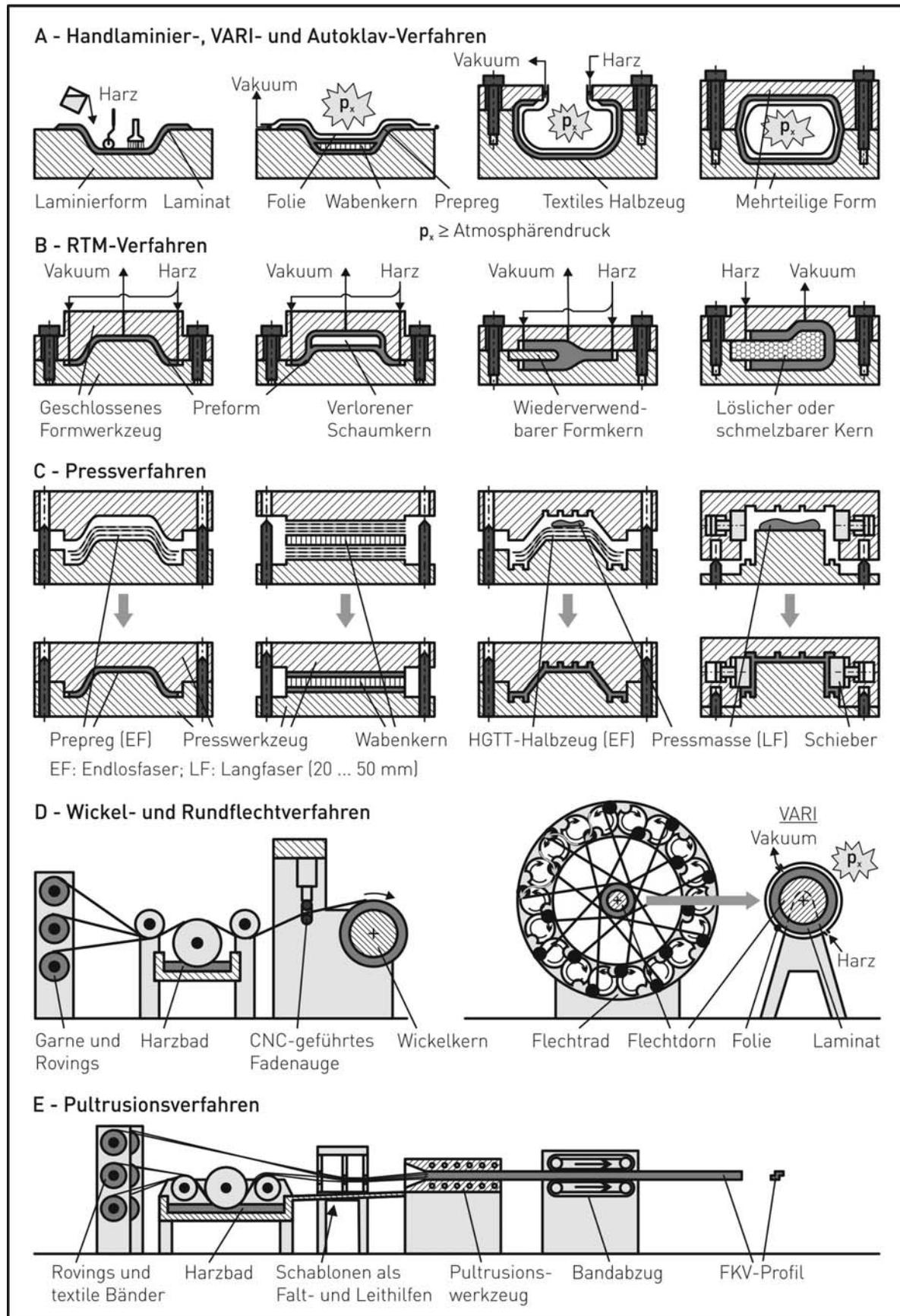


Bild 2: Einteilung der Faserverbund-Fertigungsverfahren zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Gestaltung

Laminierverfahren (A)

Unter der Kategorie A werden Verfahren zur Herstellung von Schalenstrukturen mit einseitigem Formwerkzeug zusammengefasst. Bei diesen Verfahren gibt das Werkzeug lediglich die Kontur einer Bauteilseite vor. Die zweite Schalenoberfläche ergibt sich aus der Wandstärke, die wiederum durch den Laminataufbau und die Laminatverdichtung bestimmt wird. Gängige Verfahren zur Infiltration sowie zur Konsolidierung sind etwa das Handlaminieren, das „Vakuum Assisted Resin Infusion“ (VARI) sowie die Verwendung von vorimprägnierten Halbzeugen (Prepregs). Zur Herstellung von textilverstärkten Thermoplastbauteilen eignen sich vor allem Hybridgarn-Textil-Thermoplast-(HGTT-) Halbzeuge. Die Verdichtung des Laminataufbaus erfolgt häufig mit Hilfe des Atmosphärendrucks, wobei für das Laminat eine Vakuum-Verpackung aus Folie anzufertigen ist. Höhere Verdichtungsdrücke werden mit einem Autoklaven erreicht.

Durch den Einsatz von textilen Verstärkungen wird die Herstellung von Platten- oder unverzweigten Schalenstrukturen begünstigt. Mit höherem Fertigungsaufwand können zudem verzweigte Schalen und komplexe Hohlstrukturen hergestellt werden. Die Bandbreite an gängigen Strukturintegrationsgraden wird exemplarisch durch Bild 3 wiedergegeben.

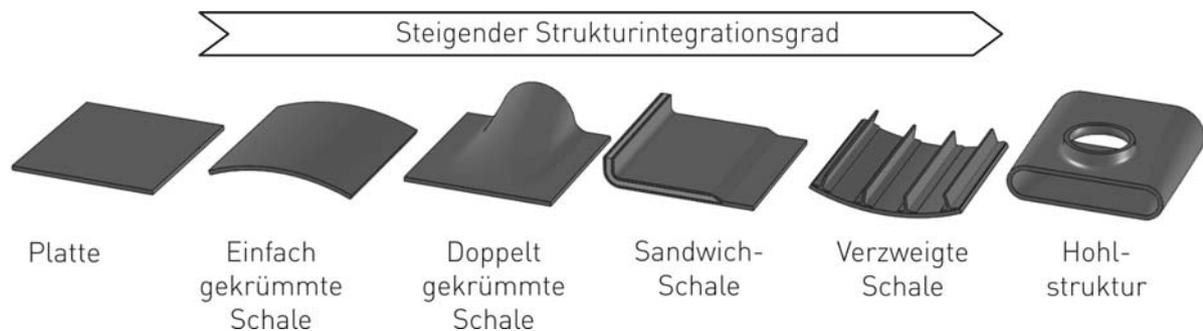


Bild 3: Ausgewählte Möglichkeiten der Strukturintegration bei Einsatz von Fertigungsverfahren nach Kategorie A und B

Die Verfahren der Kategorie A sind für die Herstellung von großen Schalenbauteilen wie z. B. Bootsrümpfen, Flugzeug-Rumpfschalen und Windrotorblatt-Hälften geradezu prädestiniert, da die Laminat-Verdichtung mit Umgebungs- oder Autoklavdruck zu keiner nennenswerten Beanspruchung des Werkzeugs führt. Durch die offenen Formwerkzeuge ergibt sich ein hohes Maß an Variabilität hinsichtlich der ausführbaren Laminatstärken. Dadurch lassen sich Schichtaufbauten z. B. in Fügezonen beanspruchungsgerecht aufdicken und in anderen Bereichen Sandwich-Kerne einbetten. Zudem können die Schichtaufbauten von Baunummer zu Baunummer angepasst werden, womit Vorteile bei der Anfertigung von Versuchsbauteilen und Vorserien erzielt werden. Auf diese Weise können Dimensionierung und Werkzeugbau auch parallel erfolgen (Simultaneous Engineering). Mehrteilige Formwerkzeuge bieten darüber hinaus die Möglichkeit, Bauteile mit Hinterschnitten zu fertigen. Als Beispiel für eine komplexe Faserverbund-Schalenstruktur mit Hinterschnitten und variablen Wandstärken dient ein prototypisches Hubschrauber-Getriebegehäuse, das in Zusammenarbeit mit der ZF Luftfahrttechnik GmbH entwickelt wurde (Bild 4). Diese Gehäusestruktur besteht aus drei mittels Prepreg-Autoklav-Verfahren gefertigten und klebtechnisch gefügten Einzelkomponenten [7].

Im Flugzeugbau kommen häufig stringerversteifte Schalen zum Einsatz, wobei unterschiedliche Lösungsansätze für die Integration von Stringerprofilen verfolgt werden (Bild 5). Mit Hilfe von zusätzlichen Formkernen lassen sich ungetränkte textile Stringer-Preforms auch in doppelt gekrümmten Schalen platzieren. Die Faserverstärkung von Schale und Stringern wird anschließend z. B. im VARI-Verfahren gemeinsam infiltriert und konsolidiert (a). Alternativ kommen vorkonsolidierte Stringerprofile zur Anwendung, die auf das unkonsolidierte Prepreg-Laminat der Schale aufgesetzt werden (b) [10]. Für Faserverbundschalen mit geradlinigen Stringerbahnen wird am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) die Integration von vorgefertigten Faserverbund-Hohlprofilen untersucht (c). Derartige Profile sind sowohl mit einer VARI- als auch mit einer Prepreg-Autoklav-Fertigung der Schalenstruktur kompatibel. Durch den Einsatz von ausreichend gasdichten Hohlprofilen, die etwa

mittels Pultrusion gefertigt werden, lässt sich der Aufwand für den Bau eines Vakuumsacks gering halten.

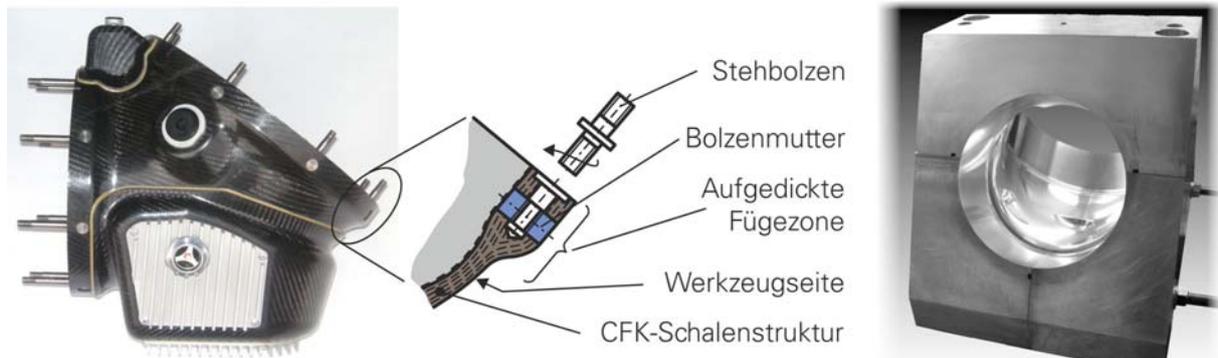


Bild 4: Gehäusestruktur für ein Hubschrauber-Getriebe, gefertigt mittels Prepreg-Autoklav-Technik (links); Anpassung von Laminatstärken in den Fügezonen (Mitte); dreiteiliges Laminierwerkzeug aus Aluminium für die Urformung der Hauptstruktur (rechts)

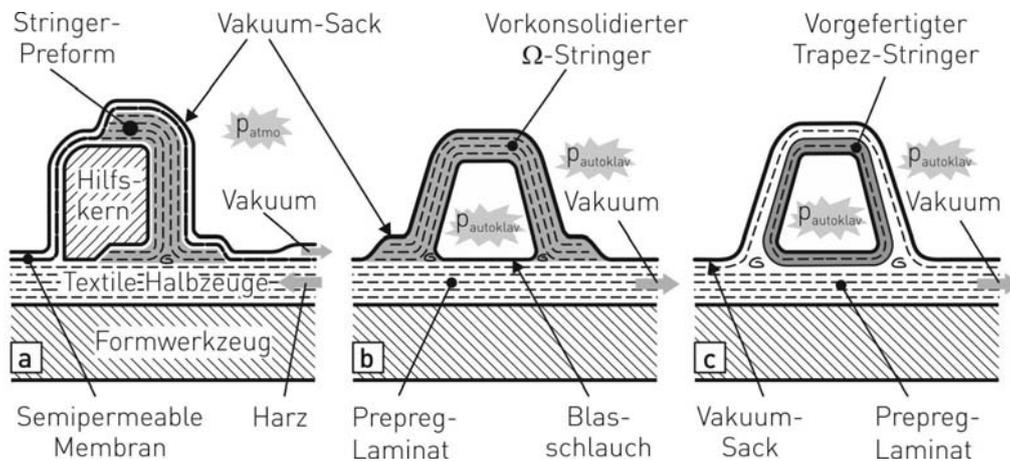


Bild 5: Strategien zur Fertigung von Faserverbund-Schalenstrukturen mit integrierten Stringern

Zur Fertigungskategorie A zählt auch die Schlauchblastechnik, mit der sich komplexe Hohlstrukturen herstellen lassen. Hierzu zählt beispielsweise der Hauptrahmen eines Transportfahrrads, der am ILK aus Prepreg-Halbzeugen in einem zweiteiligen Formwerkzeug gefertigt wurde (Bild 6 a). Mit dem Einsatz von Prepreg-Material lassen sich komplexe Laminierpläne umsetzen, da sich die klebrigen Zuschnitte gut handhaben und positionieren lassen. Die Hohlstruktur entsteht mit dem Schließen des Formwerkzeugs, wobei stets auf die Ausbildung eines ausreichenden Überlappstoßes zu achten ist. Die Verdichtung des Laminats erfolgt schließlich durch das Aufblasen eines eingeschlossenen Folien- oder Elastomerschlauchs. Mit dieser Verfahrensvariante lassen sich verzweigte Space-Frame-Strukturen mit variablen Wandstärken und Schichtaufbauten realisieren.

Eine besonders effiziente Fertigung von Faserverbund-Hohlstrukturen wird durch den Einsatz von HGTT-Halbzeugen ermöglicht. Dafür werden schlauchförmige textile Preforms wie z. B. Rundgeflechte benötigt, die eine ausreichende Drapierbarkeit aufweisen und sich mit Hilfe eines Blaschlauchs an die Flächen der Werkzeugkavität anlegen lassen. Die Konsolidierung erfolgt durch einmaliges Erwärmen und Abkühlen, wobei der Thermoplastanteil in den textilen Halbzeugen schmilzt und die Faserverstärkung eingebettet wird. Diese Verfahrensvariante kam für die Herstellung einer prototypischen Getriebewelle aus kohlenstofffaserverstärktem Polyamid zum Einsatz (Bild 6 b) [2]. Als Besonderheit weist diese Welle vier metallische Funktionselemente auf, die im Rahmen des Fertigungsprozesses durch die entstehende Faserverbundstruktur formschlüssig aufgenommen werden. Gegenüber klassischen Reaktionsharz-Prepregs weisen die HGTT-Halbzeuge jedoch einen Nachteil auf. Durch das Aufschmelzen der Thermoplastfasern reduziert sich die Schichtstärke des Faserverbundaufbaus auf etwa ein Drittel. Um geeignete Wandstärken zu erzielen, sind daher relativ dicke Preforms einzuset-

zen, die sich nur schwer im Schlauchblaswerkzeug einschließen und positionieren lassen. Daher beschränkt sich der Einsatz von HGTT-Halbzeugen zumeist auf dünnwandige Schlauchblasstrukturen.

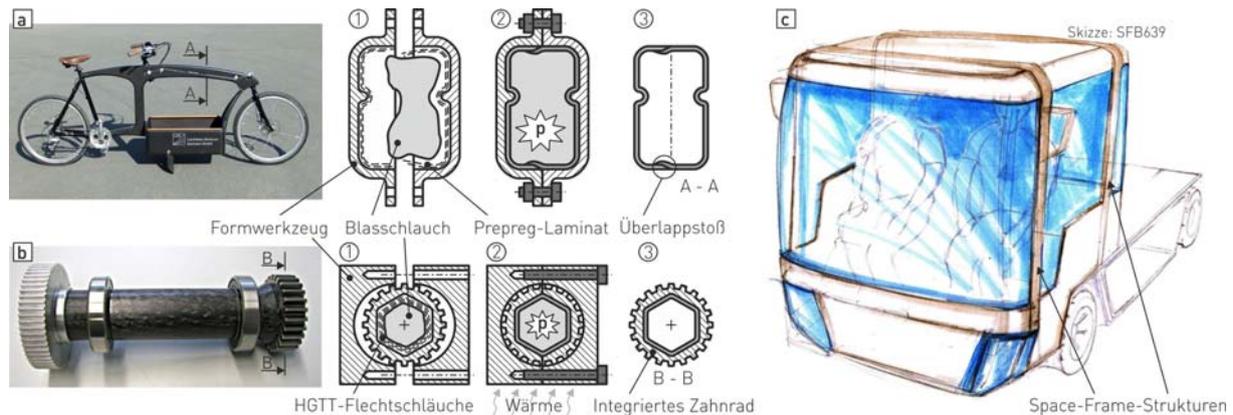


Bild 6: FKV-Hohlstrukturen, gefertigt mittels Schlauchblastechnik: Rahmen für ein Transportfahrrad (a), prototypische Getriebewelle (b) sowie Space-Frame-Konzept für eine Nutzfahrzeug-Kabine (c)

RTM-Verfahren (B)

Die Kategorie B repräsentiert die Resin-Transfer-Moulding-(RTM-)Verfahren, bei denen geschlossene Formwerkzeuge für die Formgebung und die Infiltration der Faserverstärkung eingesetzt werden. Die Werkzeuge sind dabei zwei- oder mehrteilig aufgebaut, um die Kavität des Werkzeugs mit trockenen Faserverstärkungen füllen und das konsolidierte Bauteil entformen zu können. Für die Füllung der Kavität kommen zugeschnittene und geschichtete textile Flächenhalbzeuge sowie spezielle durch Nähen, Sticken, Heften oder Kleben maßgeschneiderte Preforms in Betracht. Nach dem vakuumdichten Schließen wird das Werkzeug evakuiert und ein niedrigviskoses Reaktionsharz injiziert. Je nach Verfahrensvariante schwanken Injektionsdrücke zwischen Atmosphärendruck und ca. 40 bar. Die zur Aushärtung des Harzsystems notwendige Temperierung wird etwa mit Heizpatronen im Werkzeug oder mit externen Heizsystemen realisiert.

Die RTM-Technik eröffnet weite Gestaltungsfreiräume für allseitig formgenaue Faserverbundbauteile mit hohem Strukturintegrationsgrad (vgl. Bild 3). Zu derartigen Bauteilen zählt etwa die in Bild 7 abgebildete prototypische Kardanwelle mit CFK-Gelenkgabel. Die Fertigung dieser Struktur beginnt mit dem Rundflechten von mehreren Faserlagen direkt auf einem metallischen Formkern. Zwischen den einzelnen Flechtlagen werden zusätzliche mittels „Tailored Fibre Placement“ (TFP) maßgeschneiderte Preforms integriert, um die Lasteinleitungsbereiche beanspruchungsgerecht zu verstärken. Für die Infiltration und die Konsolidierung werden der Flechtkern und die noch trockene Faserverstärkung in ein zweiteiliges Werkzeug eingelegt. Die Laminatränder werden nach dem Aushärten und Entformen mittels CNC-Fräsen getrimmt.

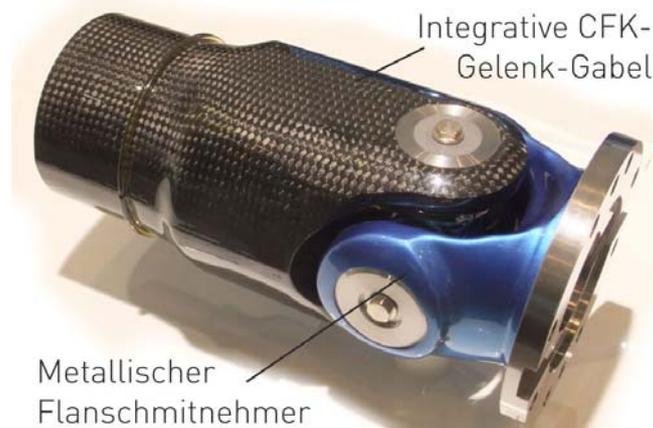


Bild 7: Hybrides Kardan Gelenk mit CFK-Gelenkgabel für einen Leichtbau-Antriebsstrang (in Zusammenarbeit mit der Voith Turbo GmbH & Co. KG)

Eine Steigerung von Strukturintegrationsgraden bei RTM-Bauteilen führt in der Regel eher zu wirtschaftlichen als zu technologischen Grenzen. So etwa werden bei hohen Strukturintegrationsgraden oft komplexe Preforms benötigt, deren Herstellung mit erheblichem Handarbeitsaufwand verbunden sein kann. Bei der Fertigung von Hochleistungsbauteilen ergibt sich eine weitere Herausforderung beim Einführen und Ausrichten der Preforms im Formwerkzeug, denn beim Schließen des Formwerkzeugs ist der Faserverbundaufbau zu verdichten, ohne einen Faltenwurf zu erzeugen und ohne Fasern in den Trennebenen der Werkzeuge einzuklemmen. Der Aufbau und die Montagereihenfolge des Werkzeugsystems müssen daher auf die Preform abgestimmt sein. Nach Möglichkeit werden RTM-Bauteile derart gestaltet, dass eine Entformung durch Öffnen oder Zerlegen des Werkzeugs erfolgen kann. Bei komplexeren Geometrien werden Kerne eingesetzt, die sich anschließend auflösen oder ausschmelzen lassen (Bild 8). In einigen Fällen kann die Fertigung durch die Verwendung von Kernen aus geschlossenzelligem Strukturschaum vereinfacht werden. Auf diesen Kernen lassen sich Preforms relativ einfach durch Heften positionieren und fixieren. Da mit dem Schaumkern kaum zur Bauteilmasse beigetragen wird, kann dieser im Faserverbundbauteil verbleiben und hier etwa die Funktion eines Sandwich-Kerns übernehmen.



Bild 8: Prototypische CFK-Hohlstruktur (links); für die RTM-Fertigung verwendete lösliche und schmelzbare Formkerne (rechts)

Presstechnische Verfahren (C)

Die presstechnischen Verfahren der Kategorie C dienen vor allem zur Formgebung und Konsolidierung von fließfähigen Pressmassen durch das Zusammenfahren zweier Werkzeughälften. Pressmassen können entweder aus einer Thermoplastschmelze oder einem duroplastisch aushärtenden Reaktionsharz bestehen. Zur Steigerung der mechanischen Werkstoffkennwerte enthalten die Pressmassen zudem geschnittene Glas- oder Kohlenstofffasern mit Faserlängen bis zu 50 mm. So etwa bestehen flächige Sheet-Moulding-Compound-(SMC)-Halbzeuge aus Polyesterharzen und Glasfasern. Bei automobilen Anwendungen werden oft thermoplastische Pressmassen auf Basis von Polypropylen bevorzugt, um den Pressprozess nicht durch die Aushärtezeiten von Reaktionsharzen zu verzögern. Für die Herstellung von höherbeanspruchten Strukturen, bietet sich die Integration von zusätzlichen Endlosfaser- oder Textilverstärkungen an. Auf die Pressmasse selbst kann nur bei sehr einfach gestalteten Bauteilen wie z. B. bei Plattenstrukturen verzichtet werden. In den meisten Fällen wird die fließfähige Pressmasse für die vollständige Füllung der Kavität benötigt. Bild 9 zeigt exemplarisch eine presstechnisch gefertigte PKW-Sitzschale aus glasfaserverstärktem Polypropylen mit Gewebe- und Langfaseranteilen [9]. Strukturintegrationsmöglichkeiten werden vor allem durch die fließfähigen Pressmassen eröffnet. So etwa wurden bei der PKW-Sitzschale entsprechende Verstärkungsrippen angeformt. Darüber hinaus orientiert sich die Gestaltung eines derartigen Pressbauteils stark an der Hauptentformungsrichtung des Presswerkzeugs. Mit Schiebersystemen können zumeist nur kleine Hinterschnitte realisiert werden.

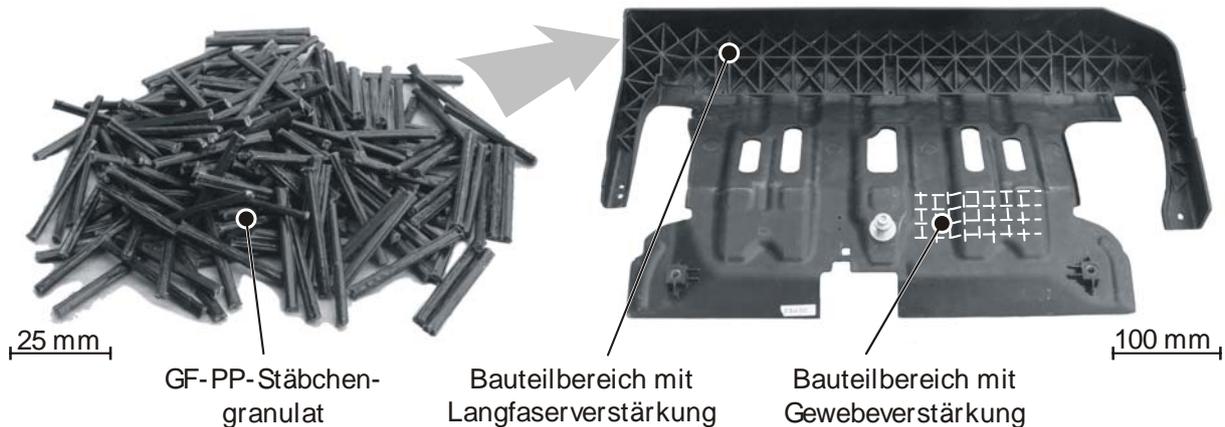


Bild 9: Stäbchengranulat zur Herstellung von Langfaser-Pressmassen (links); Thermoplastische PKW-Sitzschale mit Langfaser- und Textilverstärkung (rechts) [9]

Wickel- und Flechtverfahren (D)

In der Kategorie D werden trotz größerer prozesstechnischer Unterschiede die Wickel- und Rundflechtverfahren zusammengefasst, da in frühen Entwurfsphasen oft beide Verfahrensgruppen gleichermaßen zu betrachten sind. Bei beiden Technologien werden Verstärkungsfasern um einen Formkern geschlungen, so dass eine endlosfaserverstärkte Hohlstruktur entsteht. Die realisierbaren Faserorientierungen sind bei beiden Verfahren vergleichbar und reichen von ca. $\pm 10^\circ$ bis $\pm 88^\circ$ zur Bauteil-Längsachse. Mit Hilfsvorrichtungen können auch 0° -Lagen wickeltechnisch abgelegt werden, wobei für die Laminatverdichtung weitere Faserorientierungen mit Umfangskomponente benötigt werden. Besonderheiten der Flechttechnik sind in der textilen Bindung und in der Integrationsmöglichkeit für 0° -Stehfäden zu sehen. Demgegenüber bietet die Wickeltechnik geringere Fadenondulationen und somit größere Festigkeiten und Steifigkeiten bei ähnlichen Laminatstärken. Ein weiterer Unterschied ergibt sich bei der Zufuhr des Matrixmaterials. Während beim Wickeln der Fasern mit Reaktionsharz benetzt werden kann, erfordert der Flechtprozess eine nachgeschaltete Harzinfusion, etwa mittels VARI oder RTM (Kategorien A und B). Alternativ erfolgt das Flechten mit Hybridgarnen aus Thermoplast- und Verstärkungsfasern. Somit entsteht ein HGTT-Geflecht, das anschließend unter Vakuum und Wärmezufuhr konsolidiert wird.

Als Beispiel für ein gewickeltes Bauteil mit hohem Strukturintegrationsgrad dient ein am ILK entwickelter Leichtbau-Hydraulikzylinder für Luftfahrtanwendungen. Die röhrenförmige Hauptstruktur der Zylinderbaugruppe besteht aus CFK und weist eine integrierte Schlaufe und ein integriertes Rohrgewinde zur formschlüssigen Aufnahme der Zylinderflansche auf. Diese relativ komplexe Faserverbundstruktur ließ sich mit Hilfe einer 5-Achsen-Wickelmaschine reproduzierbar herstellen. Der hohe Strukturintegrationsgrad erfordert dabei den Einsatz eines mehrteiligen Wickelkerns der sich bei der Entformung schrittweise zerlegen lässt. [4][5]

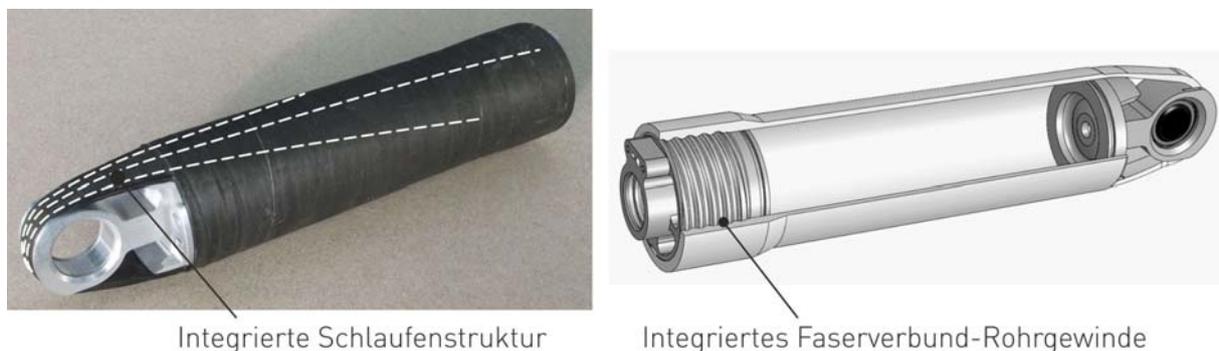


Bild 10: Wickeltechnisch gefertigter Leichtbau-Hydraulikzylinder mit integrierter Schlaufenstruktur und Rohrgewinde für die werkstoffgerechte Lasteinleitung

Pultrusionsverfahren (E)

Pultrusionsverfahren dienen zur kontinuierlichen Herstellung von Faserverbund-Profilen. Dazu werden Faserstränge und textile Bänder zusammen mit Reaktionsharz oder Thermoplastschmelze durch ein trichterförmiges formgebendes Werkzeug gezogen. Während bei duroplastischen Profil-Halbzeugen die Aushärtung in diesem beheizten Pultrusionswerkzeug stattfindet, wird für thermoplastische Profile ein Kühl-Richtwerkzeug für eine definierte Erstarrung nachgeschaltet. Die Geometrie des Profil-Querschnitts wird durch das Pultrusionswerkzeug bestimmt, wobei die Querschnittsgestaltung kaum Restriktionen unterliegt. Voraussetzung ist jedoch, dass die axiale Bauteilfestigkeit ausreicht, um die im Prozess auftretenden Reibkräfte aufzunehmen. Festigkeitsprobleme beim Abziehen kann es daher vor allem bei sehr dünnen und dünnwandigen Profilen geben. Eine Variation des Profilquerschnitts während des Pultrusionsvorgangs bedeutet einen hohen prozesstechnischen Aufwand und wird daher sehr selten realisiert. Zum Stand der Technik gehört hingegen das Pultrudieren von gekrümmten Profilen [11].

Für die Herstellung von hochfesten Zugstäben ist die Pultrusion geradezu prädestiniert, da mit axialen Verstärkungen eine sehr hohe Bauteilfestigkeit in Längsrichtung erzielt werden und große Bauteillängen zu realisieren sind. Um die pultrudierten Halbzeuge als Zugstab verwenden zu können, werden jedoch hochfeste Lasteinleitungssysteme benötigt. Hierfür kommt eine thermoplastische Matrix vorteilhaft zur Geltung, da sich die Stab-Enden nach dem Pultrudieren und Ablängen warmumformen lassen. So etwa können beanspruchungsgerechte konische Verdickungen für eine formschlüssige Lasteinleitung hergestellt werden (Bild 11) [6].

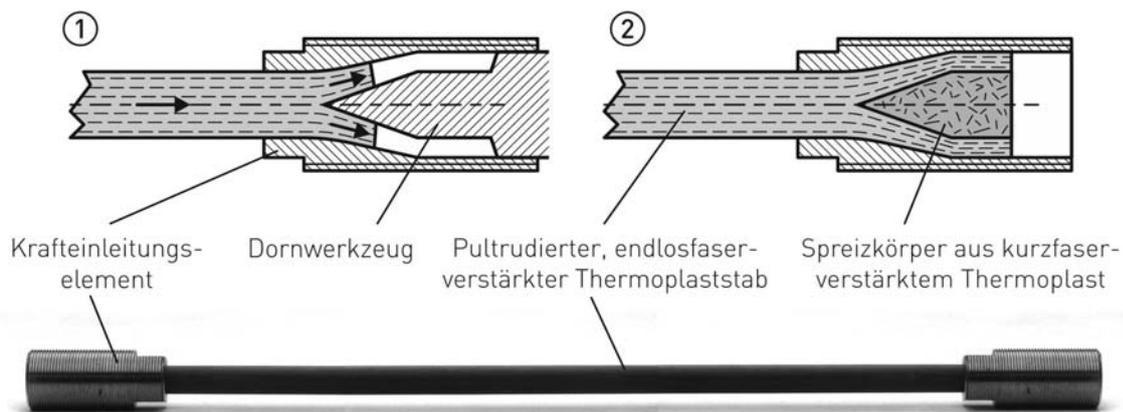


Bild 11: Leichtbau-Zugstabsystem auf Basis von pultrudierten endlosfaserverstärkten Thermoplaststäben und warmumformtechnisch gefügten Lasteinleitungselementen

Zusammenfassung

Beim Entwurf von Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden sind geeignete Strukturintegrationsgrade festzulegen, wobei sich oft strukturmechanische und fertigungstechnische Zielsetzungen entgegenstehen. Höhere Strukturintegrationsgrade sind zumeist nach strukturmechanischen Gesichtspunkten zu bevorzugen, jedoch führen derartige Entwürfe schnell an technologische und wirtschaftliche Grenzen. Durch einen interaktiven Entwurfsprozess sind diese funktionalen und herstellungstechnischen Aspekte in Einklang zu bringen. In frühen Entwurfsphasen dienen eine Abstraktion von Fertigungsverfahren und eine Identifikation von grundsätzlichen Formgebungsmöglichkeiten dem effizienten Entwurfsprozess. Die Abstraktion führt zu einer Einteilung der klassischen Faserverbund-Fertigungstechnologien in fünf Kategorien. Jede dieser Kategorien bietet eigene Strukturintegrationspotentiale. So etwa bieten Verfahren mit einseitig wirkenden Formwerkzeugen die Möglichkeit, auch nach dem Werkzeugbau Wandstärken frei zu wählen. Höhere Strukturintegrationsgrade sind etwa mit Hilfe von RTM-Verfahren zu realisieren, wobei mehrteilige geschlossene Werkzeuge benötigt werden. Bei derartigen Fertigungsprozessen erweist sich das Preforming und das Einlegen der Faserverstärkungen als größte prozesstechnische Hürde. Weitere Strukturintegrationsmöglichkeiten ergeben sich durch den Einsatz von thermoplastischen Matrixwerkstoffen, da sich derartige

Verbunde nach der Konsolidierung noch umformen lassen. Diese Umformbarkeit lässt sich vor allem für beanspruchungsgerechte Fügezonen nutzen.

Danksagung

Die vorgestellten Faserverbundbauweisen wurden am ILK im Rahmen von mehreren Forschungsvorhaben entwickelt. Bauweisen mit thermoplastischen Matrixwerkstoffen entstammen vor allem dem Sonderforschungsbereichs 639. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung dieses Großprojekts. Die Autoren danken zudem den Projektpartnern Voith Turbo GmbH & Co. KG sowie ZF Luftfahrttechnik GmbH für die sehr gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer, Berlin, 1998
- [2] Helms, O.: Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dezember 2006
- [3] Hufenbach, W.; Helms, O.: Zum methodischen Konstruieren von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieurwerkstoffe 62 (2010) 10, S. 69-74
- [4] Hufenbach, W.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbricht, A.: Novel load-introduction systems for lightweight aircraft components in composite-metal-hybrid design – multi-materials design for lightweight hydraulic actuators. Tagungsband, 1st European Conference on Materials and Structures in Aerospace – EUCOMAS, 26-27 Mai, 2008, Berlin
- [5] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbricht, A.; Grothaus, R.: Integrative Rohrgewinde in Wickeltechnik für hochbeanspruchte Verbindungen bei Leichtbaustrukturen. Tagungsband: Schraubenverbindungen – Berechnung, Gestaltung, Anwendung; VDI-Fachtagung, Dresden, 5./6. Oktober 2005
- [6] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Helms, O.: Faserverbundgerechte Lasteinleitungen für Hochleistungszugstäbe. Konstruktion (2005) 7/8, S. 61-63
- [7] Hufenbach, W.; Helms, O.; Wohlfahrt, D.; Ritschel, T.: Novel lightweight solutions for highly loaded power transmission components. Proceedings: SAMPE Europe International Conference, Paris, März 2009
- [8] Hufenbach, W.; Helms, O.; Werner, J.: Welle-Nabe-Verbindungen für hochbeanspruchte Antriebskomponenten in Faserverbund-Leichtbauweise. VDI-Berichte Nr. 2004: Welle-Nabe-Verbindungen, VDI-Fachtagung, Wiesloch, 24./25. Oktober 2007
- [9] Hufenbach, W.; Modler, N.; Krahl, M. (u. a.): Leichtbausitzschalen im Serientakt - Integrales Bauweisenkonzept. Kunststoffe, München * Band 100 (2010) Heft 5, Seite 56-59
- [10] Jacob, T.; Wiik, I.: Clip-Integration von Druckschlauch-Formkernen in gehärtete Omega-Stringer zur Fertigung von versteiften Faserverbund-Hautschalen, insbesondere für die Luft- und Raumfahrt. Deutsche Patentanmeldung DE 10 2008 032 834 A1, offengelegt am 21.01.2010
- [11] N. N.: Faserverstärkte Profile endlich eine „runde Sache“. Pressemitteilung, Thomas GmbH + Co. Technik + Innovation KG, www.thomas-technik.de, Februar 2009
- [12] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, 2003