

Begutachteter und freigegebener (peer-reviewed) Fachaufsatz, erschienen in:
Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe
Jahrgang 62 (2010), Heft 10, Seiten 69-74

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

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik – ILK
Technische Universität Dresden

Zum methodischen Konstruieren von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

Methodical design of lightweight structures made of carbon fibre reinforced polymers

Nicht nur im Flugzeugbau sondern auch in vielen Bereichen der Verkehrstechnik, bei schnelllaufenden Anlagen und Sondermaschinen sowie bei Windkraftanlagen und Sportgeräten kommen neben den klassischen metallischen Werkstoffen zunehmend Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) zur Anwendung. Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften sowie die spezifischen Verarbeitungsmöglichkeiten beider Werkstoffgruppen haben erheblichen Einfluss auf die Produktentwicklung und führen in der Regel zu jeweils anderen konstruktiven Lösungen. Diese Unterschiede spiegeln sich auch in den angewendeten Konstruktionsmethoden wider, wobei für die effiziente Entwicklung von FKV-Bauteilen angepasste und neue Entwurfsstrategien einzusetzen sind. Hierzu zählen etwa das methodische Planen von Mischbauweisen, die tragwerksorientierte Bauteilsynthese und der interaktive Entwurfsprozess.

Not only in the aerospace industry but also in the fields of traffic engineering, special-purpose machines, wind turbines and sport devices beside classic metallic materials novel fibre reinforced polymers are increasingly deployed. The different mechanical properties and the specific manufacturing possibilities of both material groups influence the product development process and lead to different design solutions. These differences are also reflected in the applied design methods, whereat the efficient development of fibre composite components demands adapted and new design strategies. Such strategies can be seen in the methodical structuring of multi-material designs, the structure driven component synthesis and the interactive design process.

Werkstoffgerechter Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK)

Für die meisten höher beanspruchten Strukturen und Komponenten des Maschinen- und Fahrzeugbaus haben sich bisher metallische Werkstoffe aufgrund ihrer relativ hohen Festigkeiten bestens bewährt. Diese Festigkeiten lassen sich jedoch erst durch die Duktilität der Metalle ingenieurtechnisch nutzen. So etwa kommt es in den Bereichen von Kerben und Fehlstellen durch plastisches Fließen zum vorteilhaften Ausgleich von Spannungsüberhöhungen. Graphit weist auf atomarer Ebene zwar die höchste wissenschaftlich untersuchte Bindungsfestigkeit auf [5], aufgrund der fehlenden Plastizität und der Anisotropie lässt sich diese Festigkeit jedoch kaum für monolithische Strukturbauteile ausnutzen. Einzelne Fehlstellen wirken hier schnell als Keime für eine globale Rissausbreitung. Durch die Verarbeitung zu relativ dünnen Fasern (5-10 µm) kann die Fehlstellendichte jedoch deutlich reduziert werden. Darüber hinaus entsteht durch die Einbettung dieser Fasern in eine Kunststoffmatrix ein Faser-Kunststoff-Verbund, der ein hohes Maß an Toleranz gegenüber einzelnen Fehl-

stellen aufweist. Die nachgiebigere Matrix bietet in FKV eine effiziente Rissstopperfunktion, so dass sich einzelne Fehlstellen kaum auf die Bauteilfestigkeit auswirken können. Diese Eigenschaft führt zudem zu relativ hohen Schwingfestigkeiten.

Für die Einbettung von Verstärkungsfasern wie z. B. Glas- oder Kohlenstofffasern in Kunststoffmatrixen haben sich verschiedene Urformverfahren etabliert, die je nach gewünschter Gestalt, Faserverstärkung und Stückzahl auszuwählen und anzupassen sind [1]. Die Verarbeitung von Fasern und Kunstharzen zu FKV-Bauteilen ist anhand eines Resin-Transfer-Moulding-(RTM-) Verfahrens in Bild 1 exemplarisch dargestellt.

Faser-Kunststoff-Verbunde eignen sich allgemein für die reproduzierbare Herstellung von großen und doppelt gekrümmten Schalenstrukturen. So etwa lassen sich die Verstärkungsfasern in Form von textilen Halbzeugen vor der Aushärtung der Harzmatrix durch Drapieren und Zuschneiden in weiten Grenzen und mit geringem Kraftaufwand auf die gewünschte Bauteilkontur anpassen. Mit Hilfe von Laminierformen, die häufig auch aus FKV bestehen, lassen sich auf diese Weise endkonturgenaue Flugzeugstrukturen, Windkraft-Rotorblätter und Bootsrümpfe aus glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen in Serie herstellen.

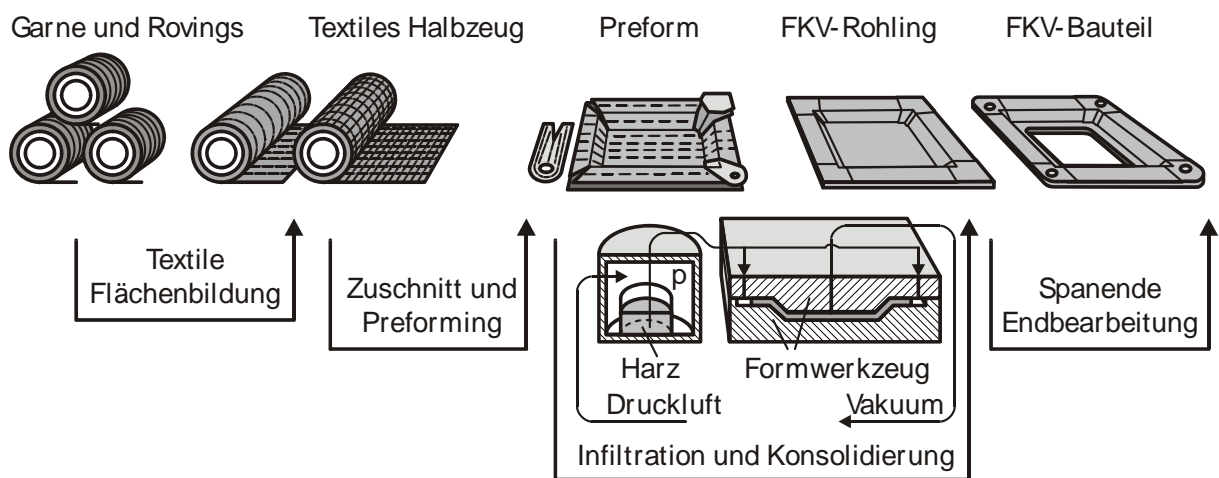


Bild 1: Typische Prozesskette für die Herstellung einer FKV-Struktur; Infiltration und Konsolidierung im RTM-Verfahren

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe kommen nicht nur wegen ihrer guten Formgebungsmöglichkeiten sondern vielmehr wegen ihrer hervorragenden spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten zunehmend für Hochleistungsbauteile zum Einsatz. Im Flugzeugbau werden nicht mehr nur große Schalenstrukturen für Rümpfe, Tragflächen und Leitwerke als Einsatzgebiete für CFK betrachtet. Aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks richtet sich der Blick zunehmend auch auf komplexere Systemkomponenten wie etwa Hydraulikkomponenten, Fahrwerksbauteile, Antriebswellen und Getriebegehäuse (Bild 2). Weitere Einsatzgebiete für CFK sind im Sportgerätebau und zunehmend auch im Maschinen- und Anlagenbau zu finden. Hierzu zählen Komponenten für schnelllaufende Anlagen wie etwa CFK-Walzen für Papiermaschinen.

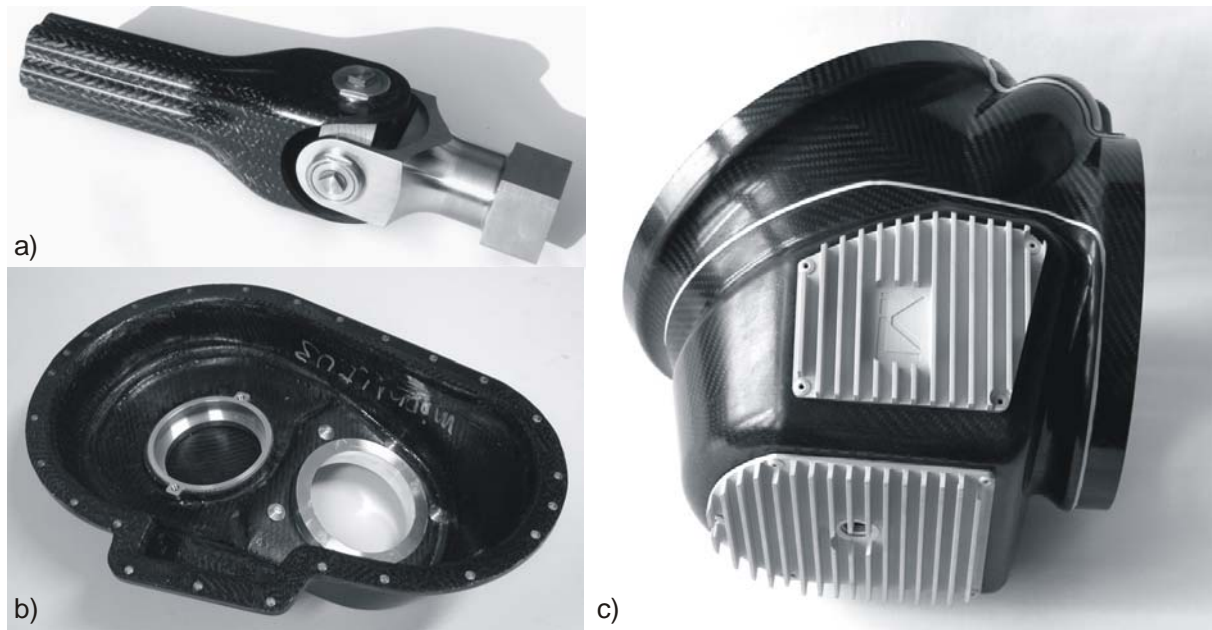


Bild 2: Am ILK entwickelte Hochleistungsbauteile in CFK-Metall-Mischbauweise: a) Kardangeln [10]; b) Hubschrauber-Getriebegehäuse mit Lagersitzen; c) Getriebegehäuse mit integrierten metallischen Kühlkörpern [9]

Bei der Entwicklung von derartigen Hochleistungsbauteilen aus CFK stellt sich die Frage nach einer geeigneten methodischen Vorgehensweise, mit der die vorteilhafte Ausnutzung der sehr speziellen mechanischen und herstellungstechnischen Werkstoffeigenschaften gewährleistet wird. Viele Hinweise können bereits den produktneutral formulierten Konstruktionsprozessen nach [2][3][4] entnommen werden. Auch die dort angegebenen Gestaltungsprinzipien hinsichtlich des Kraftflusses geben eine Orientierung. In Ergänzung dazu wurden am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden im Rahmen von komplexen Entwicklungsaufgaben werkstoffangepasste Methoden erarbeitet und angewendet.

Gezielte Werkstoffauswahl für Leichtbaustrukturen

Nur selten wird vom Kunden oder vom Endanwender die Verwendung eines bestimmten Werkstoffs gefordert. Die Auswahl von Werkstoffen ist vielmehr Bestandteil des Konstruktionsprozesses und richtet sich nach den geforderten Funktionen und den Kostenzielen. Um mehrere Funktionen effizient und kostengünstig in einem Produkt vereinigen zu können, werden Bauteile und Baugruppen oft aus mehreren Werkstoffen aufgebaut. Somit entstehen Mischbauweisen mit „dem richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle“. Wegen des relativ speziellen Eigenschaftsprofils und wegen der zum Teil hohen Werkstoffkosten kommen Faser-Kunststoff-Verbunde zumeist in Kombination mit anderen Werkstoffen wie z. B. Metallen zur Anwendung. [6]

Neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgt die Werkstoffzuordnung vor allem nach funktionalen Gesichtspunkten. Endlosfaser- und textilverstärkte Kunststoffe eignen sich vor allem für Tragwerke, mit denen äußere, klar definierte Lasten über größere Abstände zu übertragen sind. Bei derartigen Tragwerken können durch eine beanspruchungsgerechte Abstimmung von Gestalt und Faserorientierungen höchste Leichtbaugrade erzielt werden. Für tribologisch hochbeanspruchte Funktionsflächen wie z. B. Gleit-, Lauf- und Dichtflächen sind Faserverbundwerkstoffe jedoch kaum geeignet, da die relativ geringe Abriebfestigkeit der Matrix in Kombination mit den abrasiv wirkenden Fasern schnell zum Funktionsverlust führt. Für die Gewährleistung von tragfähigen Funktionsflächen sind daher Funktionselemente zu gestalten, die z. B. aus metallischen Werkstoffen bestehen können. Um eine funktions- und beanspruchungsgerechte Mischbauweise zu erzielen, werden zudem Fügesysteme benötigt, die eine feste Verbindung von Faserverbund-Tragstruktur und metallischen Funktionselementen gestatten. Die Konzeption einer derartigen Faserverbund-Metall-Mischbauweise lässt sich

am Beispiel eines hochfesten Leichtbau-Zugstabs verdeutlichen (Bild 3). Bei dieser Struktur übernimmt ein FKV-Stab mit unidirektionaler Faserorientierung die Lastfernübertragung, während für die Lasteinleitung metallische Gewindeelemente vorgesehen sind. Ein inneres formschlüssig wirkendes Verbindungssystem mit Konuskontur gestattet eine werkstoffgerechte Übertragung der axialen Lasten vom metallischen Funktionselement zur FKV-Struktur.

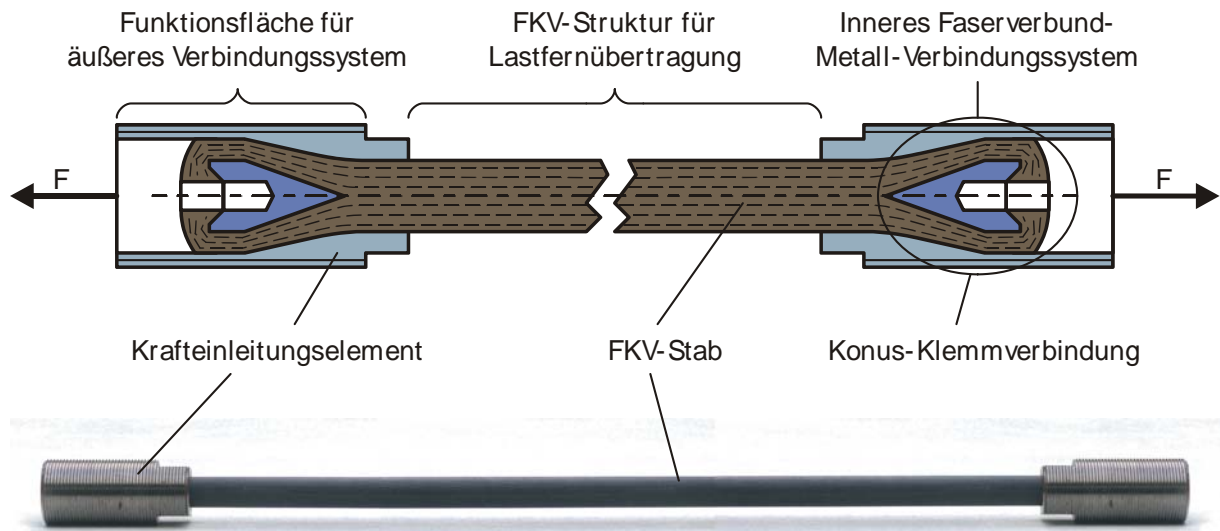


Bild 3: Leichtbau-Zugstab in Faserverbund-Metall-Mischbauweise [8]

Die Konstruktion einer Leichtbaustruktur in Mischbauweise kann somit etwa in die Synthese der Faserverbundstruktur, der metallischen Funktionselemente und der zugehörigen Fügeselemente gegliedert werden.

Tragwerksorientierte Bauteilsynthese

Die Gestaltung einer Struktur in Faserverbund-Leichtbauweise beginnt in der Regel mit der zumindest vorläufigen Festlegung von repräsentativen Lastfällen, Bauräumen und Kraftangriffspunkten. Darauf aufbauend kann die Synthese eines Tragwerkskonzepts für einen ersten Lastfall im verfügbaren Bauraum durchgeführt werden. Dabei sind grundlegende Tragwerkselemente wie z. B. Stäbe, Gurte und Schubfelder zusammenzufügen, so dass eine Lastübertragung gewährleistet ist (Bild 4). Für weitere Lastfälle sind möglicherweise zusätzliche Elemente vorzusehen. Stäbe, Gurte und Schubfelder sind für die Konzeption eines Faserverbund-Tragwerks prädestiniert, da hier klare Faserorientierungen zugewiesen werden können. Stäbe und Gurte übertragen Längskräfte am besten mit axialen (0° -) Verstärkungen während Schubfelder mit $\pm 45^\circ$ -Verstärkungen beanspruchungsgerecht ausgeführt werden. Um bei komplexeren räumlichen Tragwerken die Zahl der Einzelemente überschaubar zu halten, bietet sich in einigen Fällen eine Zusammenfassung von Gurten und Schubfeldern zu Rahmenelementen (Space-Frame) oder integralen Schalen an (Bild 4).

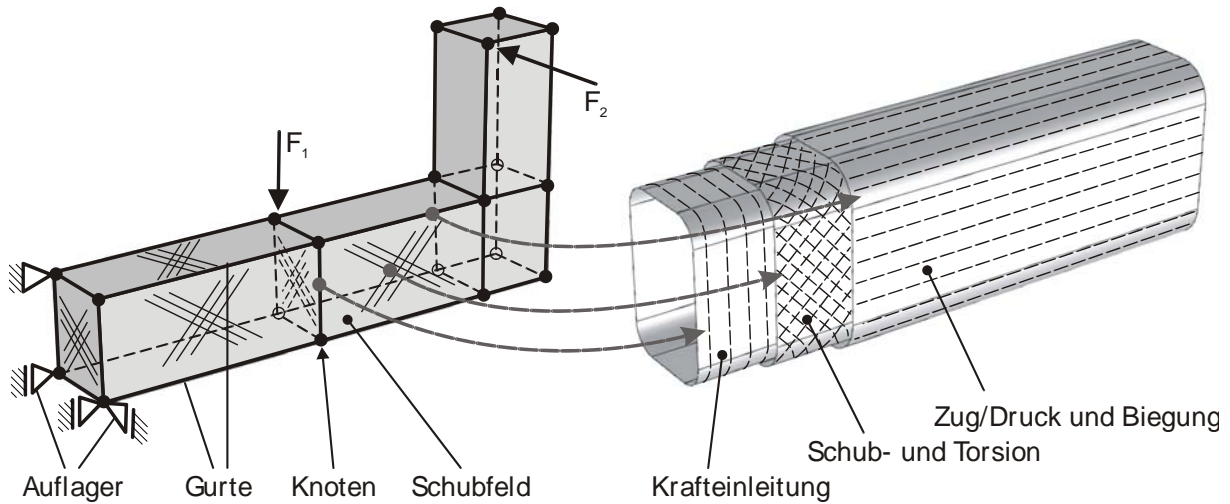


Bild 4: Konzeption eines Faserverbundtragwerks: Räumlicher Schubfeldträger (links) und daraus abgeleitetes Rahmenelement (rechts)

Auf Basis des Tragwerkskonzepts erfolgt eine Vordimensionierung, derart dass den noch querschnittslosen Stäben, Gurten und Feldern Querschnitte und Wandstärken zugewiesen werden können. Vor allem bei längeren Kraftübertragungswegen sind dabei häufig die globalen Steifigkeits- oder Stabilitätsanforderungen maßgeblich. Bei einfacheren Tragwerken bieten sich analytische Berechnungsmodelle an, mit denen schnell Parameterstudien durchgeführt werden können. Bei komplexeren Tragwerken ist hingegen der Aufbau eines abstrahierten Finite-Elemente-Modells etwa mit Schalen- und Balkenelementen zu empfehlen. Diese Vordimensionierung führt zu einem Tragwerksmodell, das die Tragwerkselemente schon als Volumenkörper darstellt. Über den Zusammenhalt dieser Volumenkörper gibt dieses Tragwerksmodell jedoch noch keine Auskunft. Der bei der Tragwerkskonzeption angenommene ideale Zusammenhalt der einzelnen Tragwerkselemente muss vielmehr in der weiteren Entwurfsphase durch konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden. Bild 5 zeigt die bewährte Vorgehensweise am Beispiel einer Leichtbau-Fügezange.

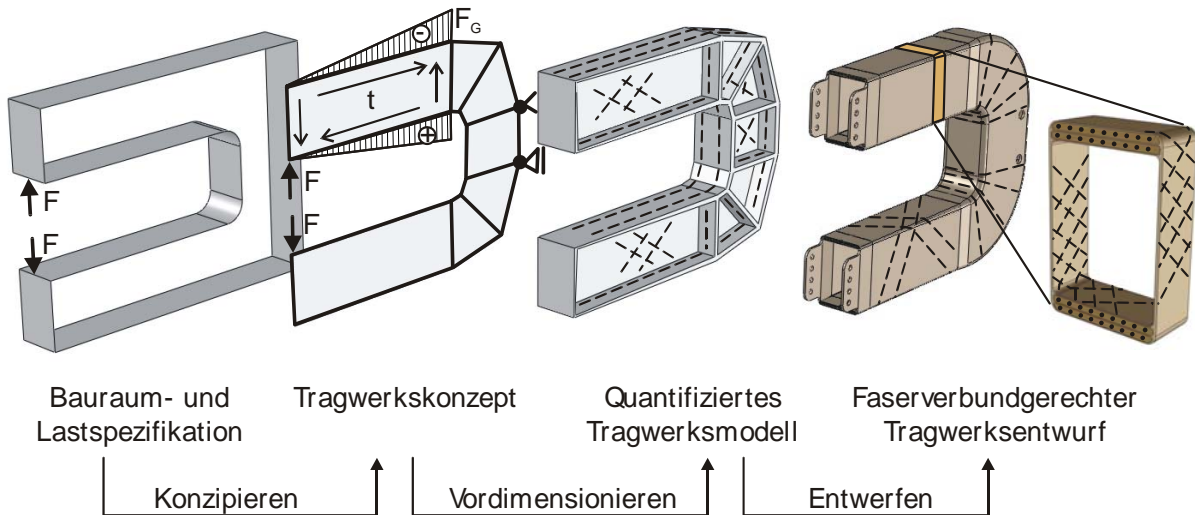


Bild 5: Methodisches Vorgehen bei der Synthese von Tragwerken in Faserverbund-Leichtbauweise

Funktionsflächenorientierte Bauteilsynthese

Die für beanspruchungsgerechte Mischbauweisen benötigten metallischen Funktionselemente sind vor allem durch ihre Funktionsflächen gekennzeichnet, die auf engem Bauraum zueinander anzuordnen sind. Komplexe Funktionselemente sind z. B. bei Leichtbau-Hydraulikzylindern zu finden, wie sie etwa am Institut für Leichtbau entwickelt und erprobt werden (Bild 6). Während es bei Dichtflächen auf höhere Oberflächenqualitäten und Verschleißfestigkeiten ankommt, dienen die Montageflächen

zur Aufnahme hoher äußerer Lasten. Da die Lastübertragungswege jedoch relativ kurz sind, ist das Konzipieren von speziellen Tragwerken kaum erforderlich. Beim Entwurf von Funktionselementen wird vielmehr versucht, eine kompakte und funktionelle Anordnung der Funktionsflächen zu erzielen. Eine so gewonnene Funktionsflächen-Konfiguration lässt sich zumeist durch Hinzufügen weiterer Bauteilflächen zu einem vorläufigen Volumenkörper ergänzen (vgl. Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen in [11]). Die Tragfähigkeit des entstandenen Körpers wird anschließend durch einfache Festigkeitsberechnungen oder Finite-Elemente-Simulationen kontrolliert. Ergeben sich dabei größere Festigkeitsreserven, so lassen sich noch verbliebene Leichtbaupotentiale ausschöpfen. Die Reduzierung von Bauteilvolumen und Massen erfolgt zumeist durch die Gestaltung von geeigneten Aussparungen, wobei auch fertigungstechnische Restriktionen zu berücksichtigen sind.

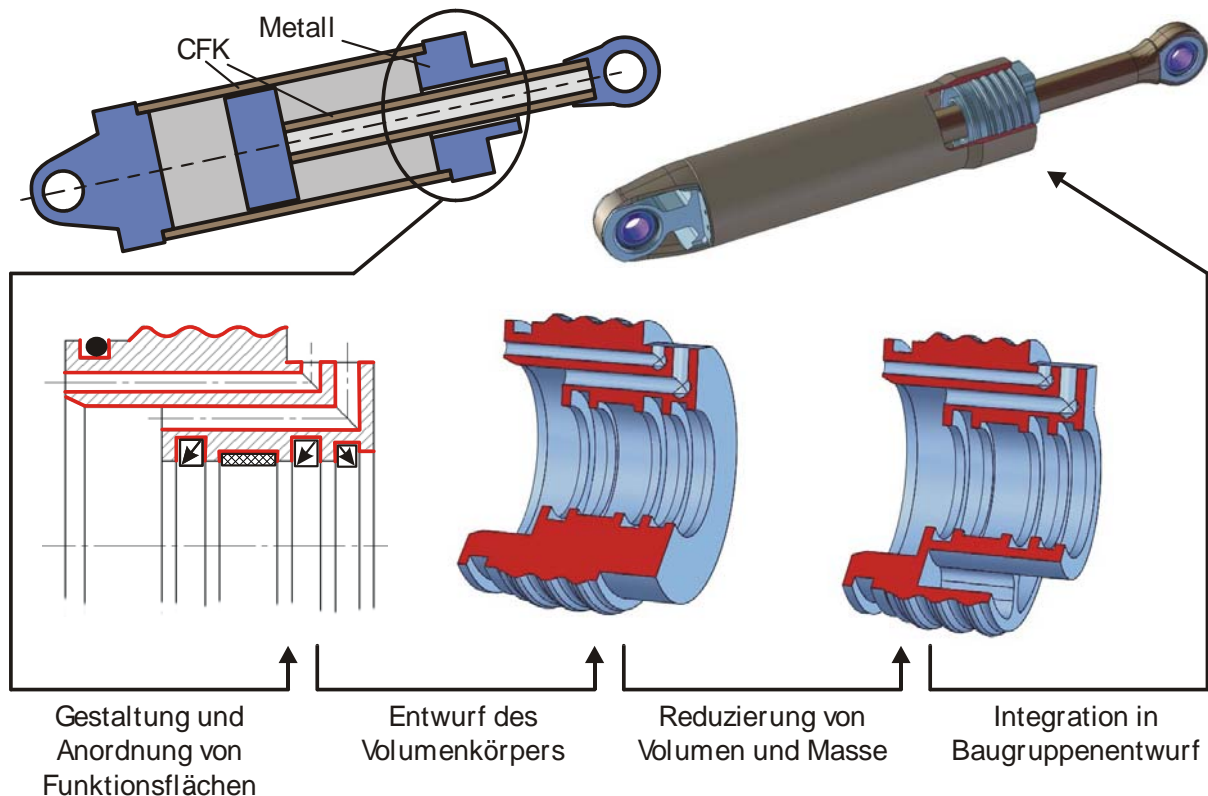


Bild 6: Methodisches Vorgehen bei der Synthese von metallischen Funktionselementen

Synthese von Verbindungstechniken für Mischbauweisen

Technisch und wirtschaftlich interessante Mischbauweisen setzen nicht nur einen festen Zusammenhalt von Faserverbundstrukturen und metallischen Funktionselementen voraus sondern erfordern auch reproduzierbare, montagefreundliche Fügetechniken. Das Kleben gilt weithin als besonders faserverbundgerechte Fügetechnik, da sich Lasten über günstig angeordnete Klebflächen relativ gleichmäßig in Faserverbundstrukturen einleiten lassen. Die vergleichsweise niedrigen Festigkeiten von Klebstoffen führen jedoch oft zu relativ großen Klebflächen, die bei vielen Hochleistungsbauteilen kaum verfügbar sind. Als Nachteile der Klebtechnik erweisen sich zudem die häufig aufwendige Oberflächen-Vorbehandlung und die Klebstoffverarbeitung. Auch die Qualitätssicherung bei der klebtechnischen Montage und die Überwachung im Nutzungszeitraum stellen besondere Herausforderungen dar. Gut reproduzierbare und zugleich bauraumeffiziente Lösungen für die Einleitung von hohen Lasten in Faserverbundstrukturen können hingegen oft mit den in Bild 7 dargestellten form-schlüssigen Prinzipien erzielt werden.

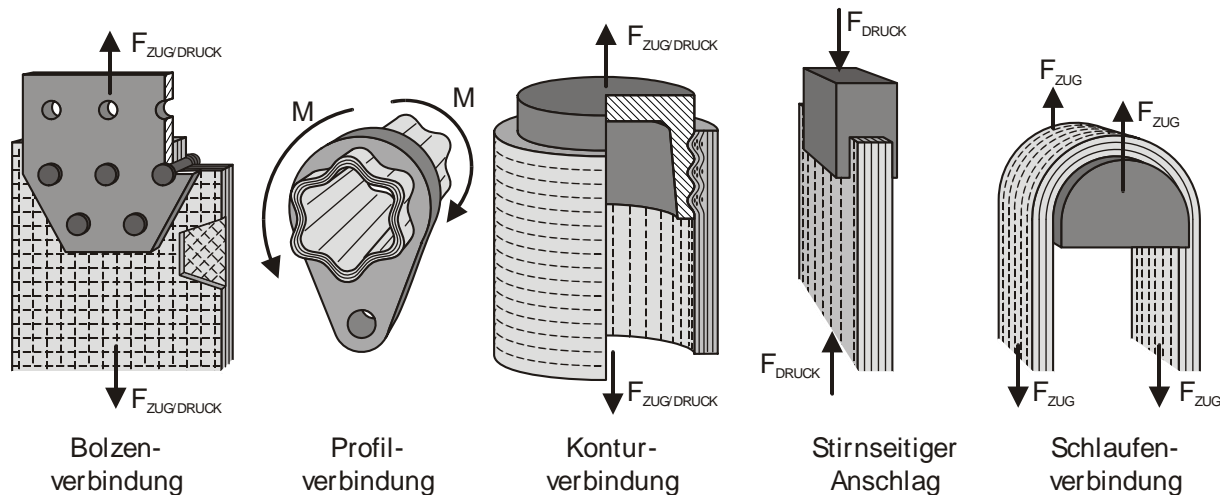


Bild 7: Bewährte formschlüssige Prinzipien zur Lasteinleitung bei FKV-Strukturen

Bolzenverbindungen haben sich für das Fügen von Faserverbundstrukturen etwa im Flugzeugbau oder für die Nabenanbindung von Windkraft-Rotorblättern bestens bewährt, da gebohrte Löcher in Laminaten mit etwa quasi-isotroper Verstärkung sehr hohe Lochleibungsfestigkeiten aufweisen. Vorteilhaft ist zudem der Einsatz von textilen Verstärkungen, da sich hiermit ein Risswachstum wirkungsvoll unterbinden und ein gutmütiges Versagen erzielen lässt. So etwa lassen sich mit Kohlenstofffaser-Gewebeverstärkungen statische Lochleibungsfestigkeiten von über 500 MPa erzielen, womit mindestens das Festigkeitsniveau hochwertiger Aluminiumlegierungen erreicht wird. Bolzenverbindungen sind vor allem bei der Gestaltung von Schalenstrukturen relativ einfach einzuplanen, da neben geeigneten Laminataufbauten in den Fügezonen lediglich ebene Flächen für Bohrmuster vorzusehen sind.

Für Lasteinleitungen bei stab- und rohrförmigen FKV-Bauteilen bieten faserverbundgerechte Profil- und Konturverbindungen deutliche Vorteile, wobei diese Prinzipien noch wenig industrielle Verbreitung gefunden haben. Das Prinzip der Drehmomentübertragung mittels Profilverbindung ist aus dem klassischen Maschinenbau bekannt, wobei die für metallische Werkstoffe bewährten Zahn-Profile kaum auf Faserverbundstrukturen zu übertragen sind. Am ILK konnten auf Basis von verschiedenen Fertigungs- und Belastungsversuchen geeignete Profilgeometrien und Faserverstärkungen ermittelt werden [10]. Wirtschaftlich interessant werden Profilverbindungen z. B. für modulare Antriebswellen, wobei mit dem Pultrusionsverfahren die Möglichkeit einer kostengünstigen Endlosfertigung besteht.

Mit Hilfe von faserverbundgerechten, umlaufenden Formelementen lassen sich hohe axiale Lasten formschlüssig in stab- und rohrförmige Bauteile einleiten. So etwa kann ein zylindrischer Faserverbundstab am Ende mit einer konusförmigen Aufweitung ausgestattet werden, um hohen Zuglasten formschlüssig aufzunehmen (Bild 3). Für die Einleitung von Längskräften in einen Faserverbund-Hydraulikzylinder wurde am ILK ein faserverbundgerechtes Rohrgewinde entwickelt, das dem gleichen mechanischen Prinzip folgt (Bild 8). Der Formschluss entsteht bei diesen Konturverbindungen zwischen etwa axial orientierten Faserlagen, die an der Bauteiloberfläche den Konus- oder Gewindekonturen folgen und dem hier eingreifenden metallischen Lasteinleitungselement. Um ein Kollabieren der Konturen infolge der sehr hohen Flankenpressungen zu vermeiden, sind die Konturen auszusteißen, wofür Spreizkörper bzw. innere tangentielle Faserlagen eingesetzt werden. [7]

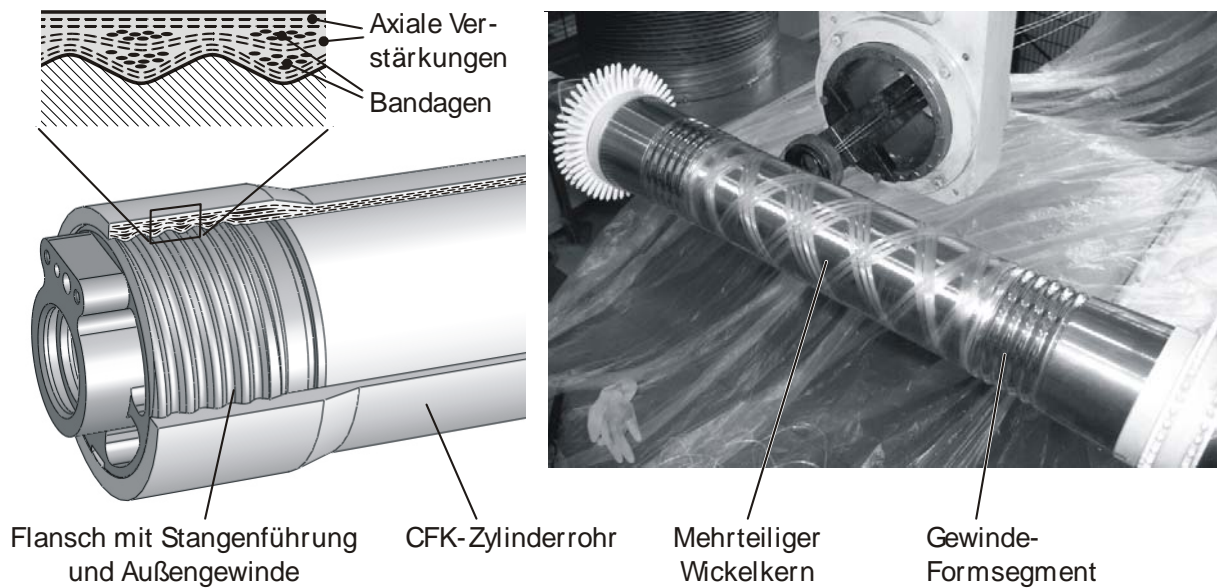


Bild 8: Aufbau und Fertigung eines beanspruchungsgerechten Faserverbund-Rohrgewindes

Ein Nachteil von Verbindungen ohne stoffschlüssige Traganteile ist in den Relativbewegungen zu sehen, die sich unter Last aus den unterschiedlichen Bauteildeformationen im Kontaktbereich ergeben. Vor allem bei wechselnden Lasten können diese Relativbewegungen zu einem festigkeitsmindernden Schwingreibverschleiß führen (Bild 9). So etwa graben sich die relativ harten metallischen Funktionselemente leicht in die Laminatoberflächen ein, wobei die Kunststoffmatrix und die Faserverstärkungen geschädigt werden (A, B). Im Bereich von Lochleibungen und Bauteilrändern können zudem abrasiv wirkende Faserenden zu Verschleißvorgängen an metallischen Bauteilen führen (C).

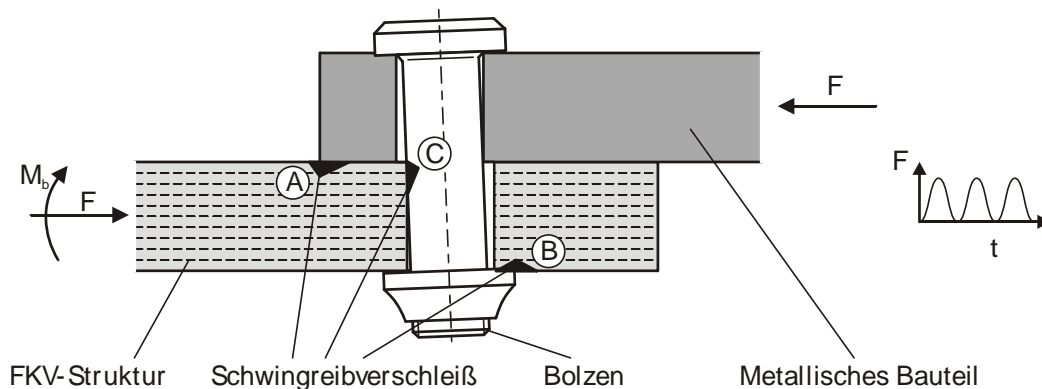


Bild 9: Bolzenverbindung bei einer FKV-Metall-Mischbauweise sowie durch Schwingreibverschleiß gefährdete Bauteilbereiche

Durch hohe Bauteilsteifigkeiten im Fügebereich, durch eine gezielte Abstimmung der Verformungen sowie durch Vermeidung von rauen oder scharfkantigen Montagezonen kann einem Schwingreibverschleiß konstruktiv begegnet werden. Um die Zuverlässigkeit einer Verbindung gewährleisten zu können, sind zudem dynamische Belastungsversuche während der Produktentwicklung sowie Inspektionen in der Einsatzzeit zu empfehlen. Bei der Inspektion zeigen lösbar formschlüssige Verbindungssysteme wiederum deutliche Vorteile gegenüber stoffschlüssigen Verbindungen.

Übergang vom iterativen zum interaktiven Entwurf

Der allgemeine Konstruktionsprozess für klassische Maschinenbauteile und Baugruppen ist durch die vier Phasen „Klären der Aufgabenstellung“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ gekennzeichnet, wobei nacheinander informative, prinzipielle, gestalterische sowie fertigungstechnische Festlegungen getroffen werden. Durch iteratives Vorgehen können dabei z. B. fertigungstechnische Festlegungen in der vorhergehenden Entwurfsphase Berücksichtigung finden.

Bei der Konstruktion einer Leichtbaustruktur in Faserverbund-Metall-Mischbauweise ist eine stimmige Einheit aus Funktion, Bauteilgestalt, Werkstoff, Fertigungsprozess und Füge-technik zu erarbeiten, die mit einer iterativ geprägten Vorgehensweise jedoch kaum zu realisieren ist. Dagegen bewährt sich eine interaktive Vorgehensweise, bei der schon in frühen Arbeitsphasen Faserverstärkungen, Formwerkzeuge und Füge-techniken konzipiert und parallel entwickelt werden (Bild 10).

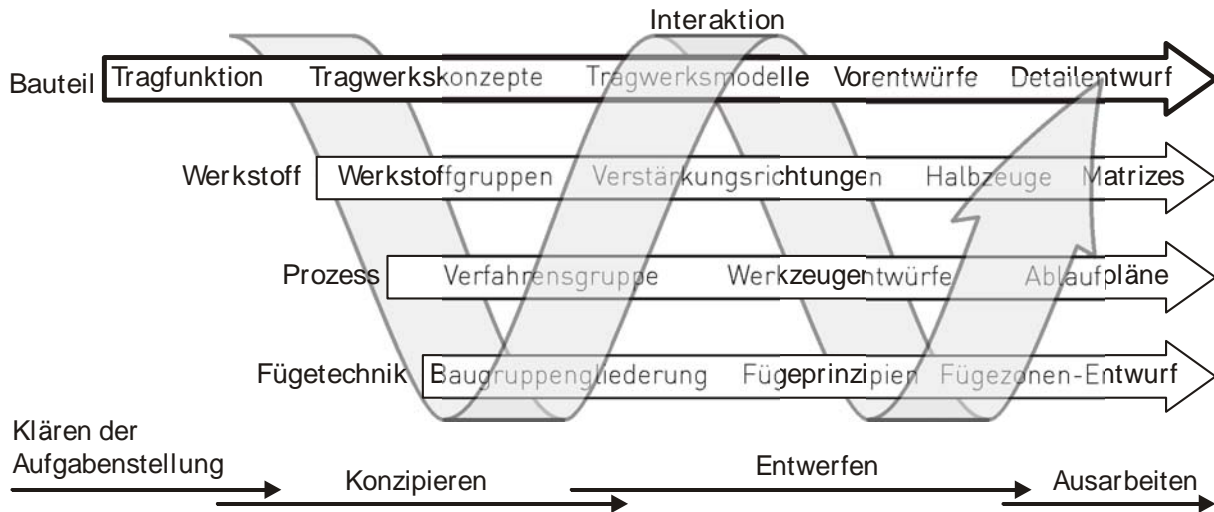


Bild 10: Interaktive Vorgehensweise bei der Konstruktion einer Leichtbaustruktur in Faserverbund-Metall-Mischbauweise

Diese interaktive Vorgehensweise kommt beispielsweise für die Entwicklung von Leichtbau-Hydraulikzylindern vorteilhaft zum Einsatz. Um den hohen Innenüberdruck und die axialen Kräfte aufnehmen zu können, werden tangentielle und axiale Faserorientierungen vorgesehen. Darüber hinaus sind metallische Flanschbauteile und zugehörige Lasteinleitungszonen einzubetten. Für die formschlüssige Aufnahme dieser Flanschbauteile kommen z. B. ein Faserverbund-Rohrgewinde und eine integrierte Schlaufe zur Anwendung. Bild 11 verdeutlicht die interaktive Entwicklung der Zylinderbaugruppe und des zugehörigen Wickelkerns.

Auch bei der CAD-Modellierung von Faserverbundstrukturen kann ein interaktives Vorgehen dem effizienten Konstruktionsprozess dienen. So etwa bietet es sich an, zunächst die Werkzeugoberflächen zu modellieren. Eine assoziative Kopie dieser Fläche wird zum Faserverbundbauteil vervollständigt, beispielsweise in dem – ähnlich einem Laminierprozess – durch einseitiges „Aufdicken“ ein Volumenkörper erzeugt wird. Anschließend werden weitere „Features“ für die spanende Endbearbeitung des Verbundbauteils ergänzt. Eine weitere Kopie des ursprünglichen Flächenmodells lässt sich zum Werkzeug-Modell erweitern und eignet sich als Ausgangsbasis für die CNC-Fertigung der Laminierform.

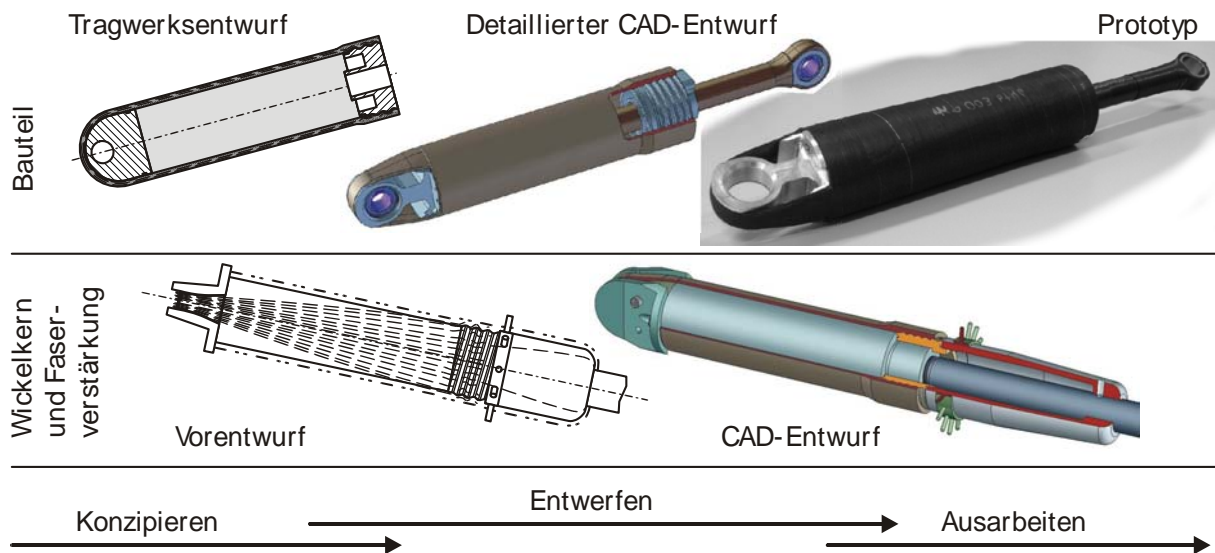


Bild 11: Interaktive Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Leichtbau-Hydraulikzylinders

Zusammenfassung

Durch die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten sowie die vielfältigen Formgebungsmöglichkeiten von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen werden weit reichende Möglichkeiten für die Entwicklung von komplexen Hochleistungsbauteilen eröffnet. In vielen Bereichen wie z. B. bei hochbeanspruchten Funktionsflächen weisen jedoch metallische Werkstoffe deutliche Vorteile auf, so dass für Hochleistungsbauteile oft effiziente Mischbauweisen zu erarbeiten sind. Auf die Faserverbundstrukturen entfällt in der Regel die Aufgabe einer Lastfernübertragung, weshalb die Gestaltung dieser Komponenten vor allem von beanspruchungsgerechten Tragwerkskonzepten geleitet wird. Bei metallischen Funktionselementen steht hingegen die Anordnung von Funktionsflächen im Vordergrund. Für die Realisierung von Mischbauweise sind geeignete Verbindungstechniken zu konzipieren, wobei sich häufig formschlüssige Prinzipien als vorteilhaft erweisen.

Das Erzielen von wettbewerbsfähigen Gesamtlösungen setzt eine stimmige Einheit von Funktion, Gestalt, Faserverstärkung, Fertigungsprozess und Füge-technik voraus. Der damit verbundene Abstimmungsaufwand ist nur mit einer interaktiven Vorgehensweise optimal zu bewältigen, bei der schon in frühen Konstruktionsphasen und auf höherem Abstraktionsniveau werkstoff- und fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer, Berlin, 1998
- [2] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, 2003
- [3] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte. Springer, Berlin, 1994
- [4] N. N.: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Beuth, Berlin, 1993
- [5] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer, Berlin, 2005
- [6] Helms, O.: Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dezember 2006
- [7] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbicht, A.; Grothaus, R.: Integrative Rohrgevinde in Wickeltechnik für hochbeanspruchte Verbindungen bei Leichtbaustrukturen. Ta-

- gungsband: Schraubenverbindungen – Berechnung, Gestaltung, Anwendung; VDI-Fachtagung, Dresden, 5./6. Oktober 2005
- [8] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Helms, O.: Faserverbundgerechte Lasteinleitungen für Hochleistungszugstäbe. Konstruktion (2005) 7/8, S. 61-63
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Albers, A.; Matthiesen, S.: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme - Das Elementmodell ‚Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen‘ zur Analyse und Synthese technischer Systeme. Konstruktion 54 (2002) 7/8, S. 55 - 60