

Technische und wirtschaftliche Integration von CFK-Strukturen in den Werkzeugmaschinenbau

Das IGF-Vorhaben 409 ZN der Forschungsvereinigung VDW-Forschungsinstitut e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

VDW
Forschungsinstitut

KLuB Konstruktiver
Leichtbau und
Bauweisen **PTW**
TU DARMSTADT

Die deutsche Werkzeugmaschinenindustrie wird ihre technologische Führung auch in Zukunft behalten können, wenn es ihr gelingt, neue, innovative Technologien frühzeitig aufzugreifen und deren Grundlagen und Anpassungen für den Werkzeugmaschinenbau zu erarbeiten. Die Notwendigkeit zur kontinuierlichen Leistungssteigerung wird getrieben durch das wirtschaftliche Erstarken globaler Mitbewerber auf dem Werkzeugmaschinenmarkt; sie machen mit einfachen, kostengünstigen Werkzeugmaschinen Druck auf etablierte Hersteller, die sich nur durch einen Technologievorsprung behaupten können. Die Forderung der

Kunden nach weiteren Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen im Werkzeugmaschinenbau wird nur erfüllbar sein, wenn die dynamisch am höchsten beanspruchten Strukturkomponenten optimiert werden. Zur Steigerung dieser Dynamik und der Bahngenaugigkeit erscheint insbesondere der konsequente Leichtbau zielführend. Der klassische Leichtbau im Werkzeugmaschinenbau mit Aluminium oder Stahl-Blechstrukturen sowie Gussteilen kann mittlerweile als ausgereizt angesehen werden. Gegen den Einsatz von modernsten Leichtbauwerkstoffen wie insbesondere Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden (CFK) werden oftmals Nachteile wie nicht ausreichende Bauteilfestigkeit, möglicherweise mangelnde Kühlschmiermittel-Beständigkeit und insbesondere kostenintensive Herstellverfahren angeführt, die eine wirtschaftliche Umsetzung von CFK-Bauteilen erschweren.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde von der TU Darmstadt ein neuartiger Konstruktionsansatz vorgeschlagen und in diesem Forschungsprojekt umgesetzt. Kernidee des neuen Konstruktionsansatzes ist es - nicht wie in der Faserverbundtechnik allgemein üblich, Strukturgeometrien individuell an die Belastungssituation anzupassen - sondern mit Faserverbund-*Halbzeugen* zu konstruieren. Es gibt am Markt mannigfaltige Halbzeuge in Platten-, Profilstangen- und Rohrform. Ziel war es also, eine Konstruktionsmethodik für diese Vorgehensweise zu entwickeln, die Grenzen auszuloten und insbesondere die passenden Fügeverfahren auszuwählen und zu erproben. Mit Faserverbundstrukturen, die auf dem Konstruieren mit *fertig ausgehärteten* Faserverbund*halbzeugen* basieren, lassen sich vielfältige Vorteile nutzen:

- Es müssen im Werkzeugmaschinenbau keine eigenen Faserverbund-Fertigungsabteilungen aufgebaut werden.
- Bekannte Bearbeitungstechniken des Maschinenbaus können weiterhin angewendet werden.
- Dadurch ermöglicht es das Konzept, den Wertschöpfungsbeitrag nicht aus den Unternehmen des Werkzeugmaschinenbaus abfließen zu lassen, sondern auch die konstruktive und fertigungstechnologische Kompetenz für CFK-Technologien aufzubauen. Durch die Beschäftigung mit Halbzeugen wird die Dimensionierung und Verarbeitung von CFK schneller beherrschbar und Auslegung, Konstruktion und Teilefertigung von CFK-Komponenten kann in die firmeneigenen Prozesse integriert werden.

Um das neue konstruktive Konzept zu erproben, wurden in Absprache mit den beteiligten Unternehmen zwei konkrete Bauteile ausgewählt, als CFK-Demonstratoren umgesetzt und getestet: ein Schwenkarm und eine Magazinür.

Demonstrator 1: Schwenkarm einer Beladeeinheit

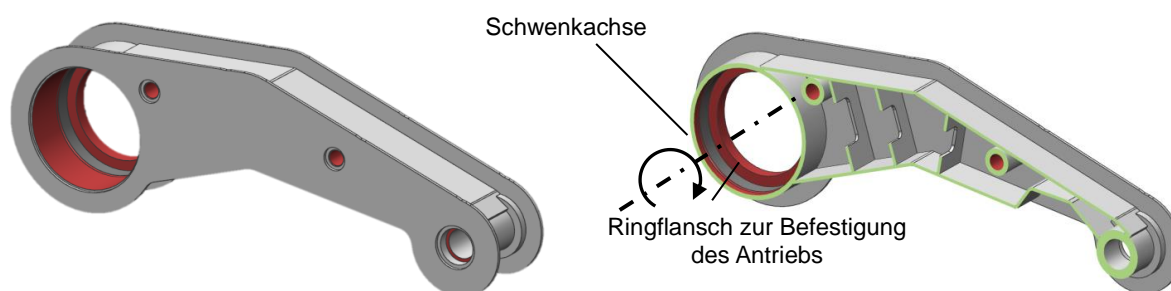


Abb. 1: Bei der Stahlvariante des Schwenkarms handelt es sich um ein Kastenprofil aus miteinander verschweißten, 6 mm dicken Stahlblechen. Zusätzlich sind im Inneren des Arms Versteifungsbleche angebracht.

Der bisher konventionell als Stahl-Schweißkonstruktion ausgeführte Schwenkarm ist an einem Laufwagen befestigt und dient dem Transport von Bauteilen zwischen Werkzeugmaschinen. Vorgabe für die CFK-Variante war die gegenüber dem Stahlstandard gleich hohe Biegesteifigkeit um die Schwenkachse. Das Betriebsmoment wird vom Motor über eine Stahlbuchse in die Gesamtstruktur eingeleitet. Im Notfall (z.B. Crash) vervielfacht sich dieses Moment, so dass einer 9-fach höheren Maximallast standgehalten werden muss. Aufgrund von Bauraumrestriktionen kann die gesamte Last nur über ein sehr dünnwandiges Blech eingeleitet werden. Dieses war der kritische, dimensionierende Lastfall und die Krafterleitung vom Ringflansch in die dünnwandigen Seitenwände des Arms der kritische Lasteinleitungsbereich.

Die Gestaltung der Krafterleitung war die große Herausforderung für die Umsetzung einer CFK-Struktur aus Halbzeugen. Da Schweißen von duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden nicht möglich ist, musste zunächst eine innovative Verbindungstechnik entwickelt und am Prüfstand evaluiert werden. Die Verbindung der Halbzeuge Rohr und Platte ist typisch für Maschinenkomponenten, weswegen es das Ziel war, eine zum einen einfache, zum anderen allgemein anwendbare Lösung zu erarbeiten. In Vorüberlegungen wurden drei Lösungskonzepte erarbeitet und anschließend mit folgenden Resultaten theoretisch und experimentell miteinander verglichen (Abb. 2):

formschlüssige Zapfenverbindung	<ul style="list-style-type: none"> • sehr hohe Drehmomente ertragbar • hohe Resttragfähigkeit nach Versagen • Fertigung beider Komponenten durch Fräsen
geklebter Längspressverband	<ul style="list-style-type: none"> • Presssitz eines CFK-Rohrs mit Übermaß im Kreischnitt einer CFK-Platte • zusätzliche Verklebung erhöht Bruchlast um 120 % • Schmierwirkung des Klebers halbiert Einpresskräfte beim Fügen des Pressverbands • günstige Fertigung der Kreiskontur durch Wasserstrahlen
mikroverzahnter Längspressverband	<ul style="list-style-type: none"> • Verdopplung der Resttragfähigkeit nach Versagen der Klebung • somit Erhöhung der Dauerfestigkeit • Fertigung der Kontur mittels Wasserstrahl möglich

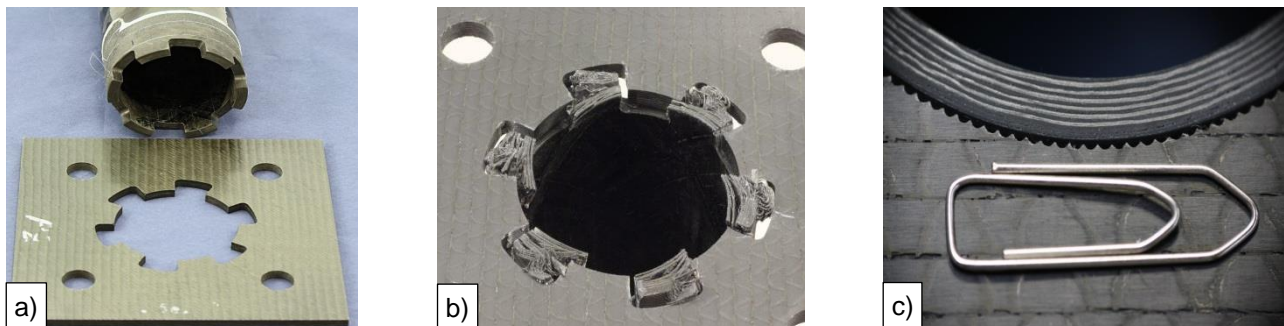


Abb. 2: a) formschlüssige Zapfenverbindung zwischen CFK-Rohr und CFK-Platte vor der Montage; b) Probestück mit Zapfenverbindung nach Versuch: trotz Zerstörung des Laminats beträgt die Tragfähigkeit noch 50 %; c) Pressverband von CFK-Wickelrohr mit mikroverzahnter CFK-Platte

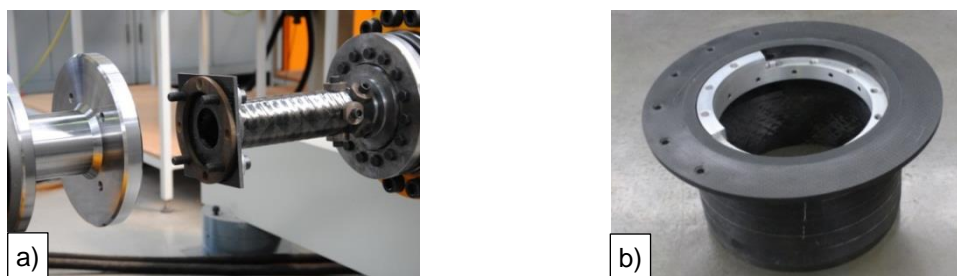


Abb. 3: a) Pressverband von Rohr und Platte auf dem Torsionsprüfstand; b) Anwendung der Ergebnisse am Realbauteil: CFK-Topf des Schwenkarms zur Aufnahme des Getriebes

Da diese Konzepte sowohl simulativ als auch experimentell ausführlich untersucht wurden, konnten Grundlagen erarbeitet werden, die auf eine Vielzahl von ähnlichen Problemstellungen im Maschinenbau übertragbar sind. So stellt der geklebte Längspressverband eine innovative Lösung dar, die die geforderte Tragfähigkeit des Schwenkarms um den Faktor 3 übertrifft.

Eine weitere Herausforderung bestand darin, dass der Stahlarm gekröpft vorlag; für die Ausführung aus CFK-Plattenhalbzeug hätte dies bedeutet, dass im höchstbelasteten Bereich eine Fügung der CFK-Platten notwendig gewesen wäre. Um dieses Problem zu lösen wurde ein neuer Ansatz zur Realisierung

gekrümmter Strukturen aus ebenen Plattenhalbzeugen direkt umgesetzt. Einzelne duroplastische CFK-Platten wurden vorgeformt und ähnlich dem Schichtverleimen im Holzbau miteinander verklebt. Somit wurde die Gestaltungsmöglichkeit mit einfachen CFK-Halbzeugen deutlich erweitert.



Abb. 4: Unteres geschwungenes Plattensegment des CFK-Schwenkarms: die Kontur der einzelnen Platten wurde vorgeformt, anschließend wurden die einzelnen, dünnen Platten miteinander verklebt, wie an der Schnittkante gut zu erkennen ist.

Mit diesen neuen Erkenntnissen konnte der CFK-Schwenkarm auskonstruiert und die einzelnen Komponenten zu einem funktionsfähigen Demonstrator montiert werden. Die Konstruktion basierte auf umfangreichen messtechnischen Analysen und Simulationen, die die kritischen Prozesse des Be- und Entladens berücksichtigten. Die Bauweise des CFK-Arms zeichnet sich durch folgende Besonderheiten aus:

- Verwendung einfacher CFK-Platten und CFK-Rohre
- Verwendung einfacher metallischer Komponenten (Drehteile)
- einfache Verbindungstechniken wie Nieten und Kleben
- einfache Hilfsmittel zur Montage
- Einhaltung enger Toleranzen
- keine Nacharbeit notwendig

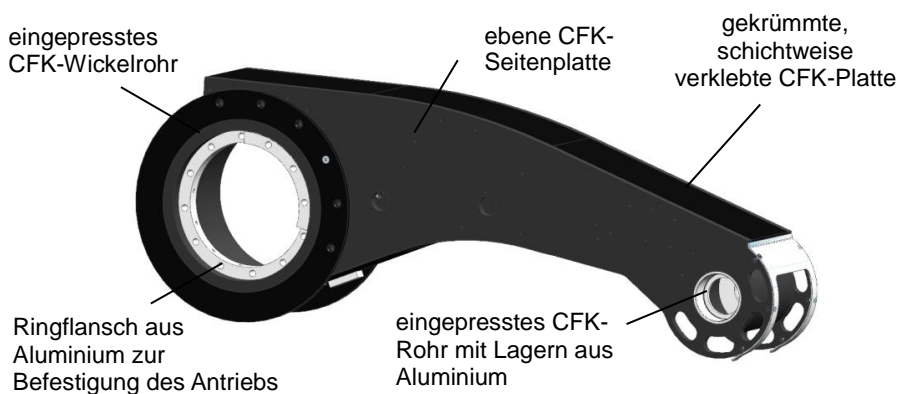


Abb. 5: Details zum CFK-Schwenkarm (links) und eingebauter Demonstrator im Betrieb (rechts)

Insgesamt konnte die Masse des Stahlarms durch die CFK-Halbzeugbauweise um 65 % reduziert werden, wodurch sich die potenzielle Nutzlast am Greifer um 20 % erhöht. Die Kosten für eine CFK-Serienversion wurden auf das 2,5-fache der bisherigen Stahlversion geschätzt. Demgegenüber kann gegebenenfalls auf die hohen Investitionskosten für eine weitere Handhabungseinheit verzichtet werden, da mit dem CFK-Schwenkarm ein deutlich größeres Anwendungsspektrum abgedeckt wird.

Demonstrator 2: Hubtür eines Bearbeitungszentrums

Das zweite Bauteil, das während des Projekts als CFK-Struktur umgesetzt wurde, war die pneumatisch betriebene Hubtür einer Werkzeugmaschine. Sie verfährt in vertikaler Richtung und trennt den Arbeitsraum vom Werkzeugmagazin.

Randbedingungen:	Ziele:
<ul style="list-style-type: none"> • maximaler Hub: 650 mm • maximale Geschwindigkeit: 3,5 m/s • Zeit zum Öffnen der Tür: 0,4 s • bisherige Masse: 10,5 kg • maximale Beschleunigung 19 g 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des notwendigen Luftdrucks • Verkleinerung des Antriebs • Reduktion der Masse • Reduktion des starken Nachschwingens • Verkürzung der Taktzeit

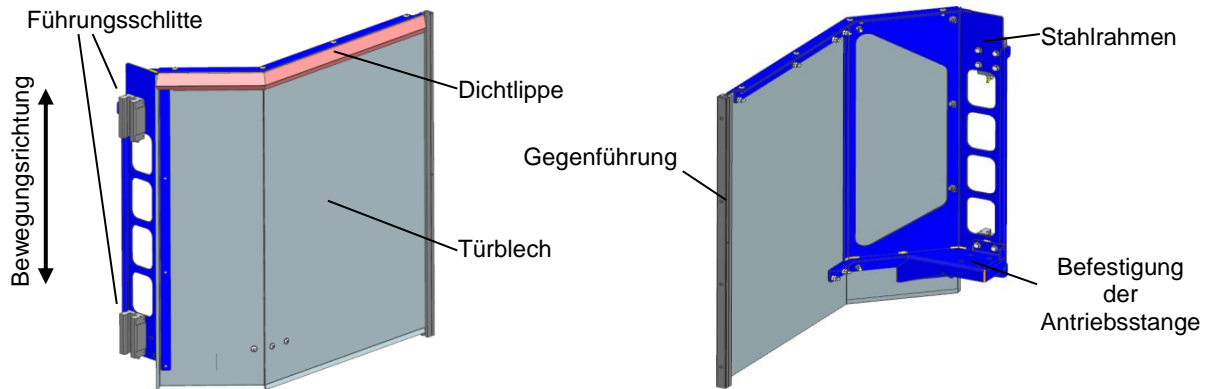


Abb. 6: Details der bisherigen Stahlvariante der Hubtür; Außenansicht und Innenansicht

Als Lösungsansatz wurde ein CFK-Sandwich mit Hartschaumkern als tragende Struktur erarbeitet. Die Sandwichlösung weist gegenüber dem bisherigen Türblech aus Aluminium eine 20-fach höhere Biegesteifigkeit bei einem Drittel der Masse auf. Somit konnte auf den schweren Stahlrahmen verzichtet und die Krafteinleitung in die Türstruktur deutlich einfacher ausgeführt werden. Dies reduziert nicht nur die Masse, sondern auch die Fertigungskosten für das bisher sehr aufwändig geschweißte Befestigungsblech. Die Verbindung der einzelnen Sandwich-Platten erfolgte durch Vernieten und Verkleben mit einfachen Stahlblechwinkeln. Die drastische Massenreduktion führte als Sekundäreffekt zu kleineren und kostengünstigeren Führungen und einem reduzierten Antrieb. Es konnten zusammenfassend folgende Verbesserungen erzielt werden:

- Kostenreduktion von 50 %
- Reduktion der bewegten Masse um 75 %
- Reduktion des notwendigen Luftdrucks um 32 %
- Reduktion der Zeit zum Schließen um 38 %
- bei über 1.000.000 Zyklen bislang keine Auffälligkeiten

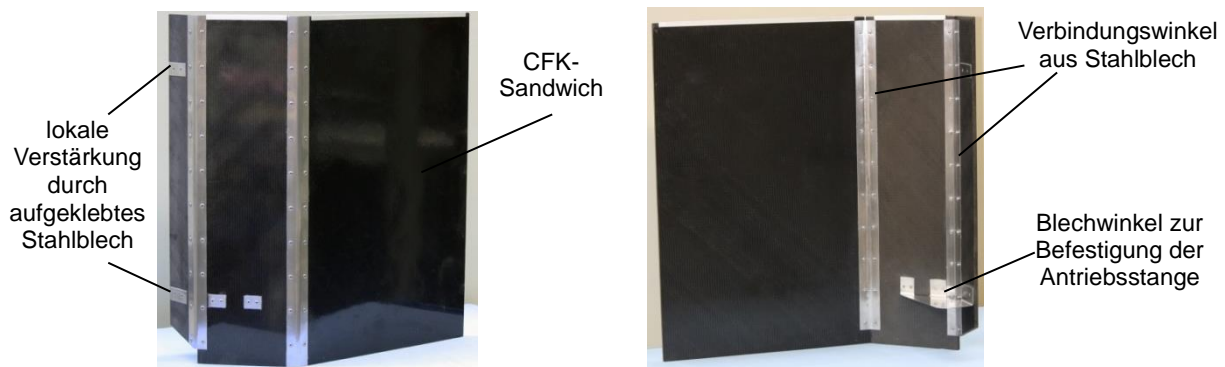


Abb. 7: Fertiggestellte Hubtür als CFK-Sandwich-Struktur aus Halbzeugen

Umgebungseinflüsse

Eine weitere zentrale Aufgabe des Projekts war es, den Einfluss der in Werkzeugmaschinen herrschenden Umgebungsbedingungen auf den Werkstoff CFK zu erarbeiten und Lösungsansätze für eventuelle Probleme zu finden. Zu überprüfen waren insbesondere die Abrasivwirkung von Spänen auf Faserverbundstrukturen und die Auswirkungen häufigen Kontakts mit Kühlschmiermitteln (KSS).

Als besonders problematisch erschien die abrasive Wirkung von Metallspänen. Daher wurden verschiedene Beschichtungskonzepte zunächst in Vorversuchen und anschließend im Realversuch in der Werkzeugmaschine erprobt. Als Ergebnisse der Untersuchungen ist festzuhalten:

- Aramidfasern - als abrasiv extrem widerstandsfähige Fasern - wären zwar sehr geeignet, weisen im Verbund aber eine schlechte Haftung auf und neigen bei Feuchtaufnahme zum Quellen.
- Eine Beplankung mit Aluminium neigt zu frühzeitigem Sprödbbruch.
- Bei geringer Beanspruchung ist die Verwendung von unbeschichtetem CFK möglich!
- Bei Bedarf kann eine Opferschicht aus partikelverstärktem Lack aufgebracht werden.
- Bei hoher Beanspruchung und Temperatur empfiehlt sich eine elastisch aufgeklebte Stahlfolie.

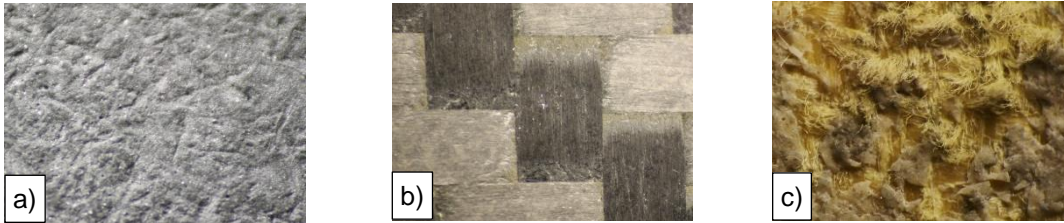


Abb. 8: Mikroskopieaufnahmen beschichteter Proben nach 250 Tagen im Feldversuch mit Spänebeschuss: a) durch Späne geschädigter, partikelverstärkter Lack b) unbeschichtetes CFK, ohne erkennbare Schäden; c) aufgequollener und zerstörter Aramidfaser-Kunststoff-Verbund

Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener Kühlschmierstoffe auf CFK untersucht. Es wurde befürchtet, dass diese zur Enthftung von Fasern und Matrix führen. Daher wurden CFK-Probekörper im Tauchbad eingelagert und anschließend im Zugversuch quer zur Faserorientierung geprüft. Als Ergebnis der umfangreichen Langzeitversuche kann festgehalten werden:

- Eine Sättigung der Feuchtigkeitsaufnahme (0,65 %) liegt bei etwa 200 Tagen Auslagerungsdauer
- Die Einlagerung in Wasser und die Einlagerung in Kühlschmierstoffe zeigen die gleichen Auswirkungen; es ist kein Unterschied feststellbar.
- Bei stark exponierten Bauteilen reduziert sich die Festigkeit quer zur Faser – d.h. die Grenzflächenhaftung zwischen Fasern und Matrix - um 50 %.
- Bei Belastungen längs zur Faserrichtung sind keine Einschränkungen zu berücksichtigen.

Mit diesen Ergebnissen konnten die bisherigen Unsicherheiten und Bedenken der WZM-Hersteller gegenüber dem Werkstoff CFK ausgeräumt und die zukünftigen Einsatzgrenzen festgelegt werden.

Fazit

Anhand der Entwicklung und dem Bau der Demonstratoren wurde das Potenzial einer neuartigen, halbzeugbasierten CFK-Bauweise im Werkzeugmaschinenbau unter Beweis gestellt. Der verfolgte Konstruktionsansatz erlaubt es insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen, ohne hohe Investitionen eigene Bauteile aus CFK in kürzester Zeit zu entwickeln. Hierdurch kann die Wertschöpfung im eigenen Unternehmen erhalten oder sogar ausgebaut werden, da nur die CFK-Halbzeuge zugekauft werden müssen. Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist zu berücksichtigen, dass bei CFK-Bauteilen Arbeitsschritte wie Richten, Fräsen oder Lackieren wegfallen. Wie an den Beispielen des Projekts demonstriert, können etwaige Mehrkosten durch die gesteigerte Leistungsfähigkeit kompensiert werden. Daher sind die umgesetzten CFK-Strukturen gegenüber bisherigen Stahlkonstruktionen absolut konkurrenzfähig.

Der vollständige Abschlussbericht mit weiteren Informationen ist bei den beteiligten Forschungsstellen erhältlich.

Beteiligte Forschungsstellen:

Institut für Produktionsmanagement, Technologie
und Werkzeugmaschinen
Technische Universität Darmstadt

Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen
Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Dipl.-Ing. Robert Rost
Andreas Bretz M.Sc.
Dipl.-Ing. Kaveh Haddadian

Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Dipl.-Ing. Andreas Landmann

Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses:

