

CFK-Bauteile aus hochwärmeleitenden Kohlenstofffasern

HTS GmbH
Am Glaswerk 6
Coswig
Tel: +49 (0) 3523 77 56 0
Fax: +49 (0) 3523 77 56 11
info(at)htsdd.de
<http://www.htsdd.de/>



01640

Inhalt

Einleitung	1
Komponenteneigenschaften	2
Kohlenstofffasern	2
Harze	2
Herstellungstechnologien	3
Wickeln	3
Prepreg-Herstellung	4
Autoklav Anwendung	5
Eigenschaften der Verbundbauteile	6
Thermo-mechanische Eigenschaften	6
Prüfung der Bauteilwärmeleitfähigkeit	7
Vergleich zu konventionellen Materialien	7
Mögliche Anwendungsgebiete	7

Einleitung

Seit einigen Jahren sind Kohlenstofffasern mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit auf dem Markt verfügbar. Jedoch blieb der Einsatz dieser Fasern bisher vorrangig auf den nicht-europäischen Raumfahrtbereich (USA und Japan) beschränkt.

Das Unternehmen ist in der Lage, Verbundbauteile aus diesen speziellen Fasern herzustellen. Die dazu notwendigen Erfahrungen wurden in Projekten (u.a. für die ESA) erworben, die sich gerade mit der Nutzbarmachung dieser Produkte in Deutschland und Europa befassten.

Neben der Anwendung entsprechender Bauteile in europäischen Raumfahrtprojekten möchte das Unternehmen auch Produkte für die terrestrische Nutzung entwickeln und herstellen.

Die nachfolgende Beschreibung der speziellen Eigenschaften der einzelnen Komponenten und des fertigen Verbundbauteiles soll potentiellen Partnern für eine solche gemein-

same Produktentwicklung einen ersten Überblick zu den erzielbaren Bauteileigenschaften geben.

Komponenteneigenschaften

Verbundwerkstoffe bestehen aus zwei oder mehreren Verbundkomponenten. Unsere Produkte sind faserverstärkt und setzen sich somit aus Kohlenstofffasern und einer Polymermatrixkomponente zusammen. Dabei liegt die Faser als Endlos-Faser (Roving) in der Form von entsprechenden Faserspulen vor.

Kohlenstofffasern

Elastizitätsmodul longitudinal [GPa]	Zugfestigkeit longitudinal [MPa]	Wärmeleitfähigkeit longitudinal [W/(mK)]	Dichte [g/cm ³]
828-931	2340-3800	620-1170	2.2

Tabelle 1 Thermo-Mechanische Eigenschaften der Pechfasern

Die zum Einsatz kommenden hoch-wärmeleitfähigen Kohlenstofffasern werden auf der Grundlage eines Pech-Pre-cursors (andere bekannte Pre-cursor sind z.B. PAN Polyacrylnitrile, Rayon oder Zellulose) hergestellt und sind bezüglich der üblichen Charakterisierung von Kohlenstofffasern auch hoch-fest (HS) und ultra-hoch-steif (UHM). In der Tabelle 1 sind einige mechanische und thermische Eigenschaften der verfügbaren hoch-wärmeleitfähigen Pechfasern zusammengefasst dargestellt. Alle Fasern stehen als Roving auf Spulen mit jeweils 2000 Filamenten (2k-Fasern) zur Verfügung. Verfügbare Massen je Spule sind ca. 100 - 200 g.

Entsprechend den Beschriftungen in der Tabelle 1 gelten die angegebenen Werte nur in Faserlängsrichtung. Die Fasern selbst besitzen anisotrope Materialeigenschaften. So ist z.B. die transversale Wärmeleitfähigkeit nur noch ca. 1 - 2 W/(mK). Diese Anisotropie ist bei der Entwicklung der Bauteile zu beachten.

Die auf den ersten Blick beeindruckenden mechanischen Eigenschaften dieser Fasern sind mit einer Bruchdehnung von maximal 0,4 % verbunden. Diese Beschränkung der zulässigen Längendehnung wirkt sich zum einen auf die nutzbaren Herstellungsverfahren und zum anderen auf die realisierbaren Bauteilgeometrien aus.

Im Vergleich zu den sonst üblichen PAN-Fasern besitzen die Pechfasern eine höhere Dichte. Aufgrund der zur Zeit geringen Herstellungs- und Abnahmemengen dieser Fasern sind deren Preise sehr hoch. Deshalb ist es notwendig, diese Fasern zielgerichtet und effektiv einzusetzen.

Harze

Als Polymermatrix können z.B. die bei Kohlenstofffaserverbunden üblichen Epoxid- oder Cyanat-Harze eingesetzt werden. In der Tabelle 2 sind als Beispiel für die verwendbaren Harze übliche Werte von Epoxid angegeben. Diese Harze besitzen isotrope Eigenschaften.

Harz	Elastizitätsmodul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Dichte [g/cm ³]
typisches Epoxid	4	90	0.6	1.25

Tabelle 2 Mechanische und thermische Eigenschaften von Epoxidharz

Herstellungstechnologien

Aufgrund der beschriebenen mechanischen Fasereigenschaften, im speziellen die geringe zulässige Längsdehnung, ist die Auswahl der nutzbaren Verarbeitungsverfahren von vornherein eingeschränkt. Außerdem sind bei den nun noch verfügbaren Verfahren die Verfahrensparameter entsprechend den Erfordernissen anzupassen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Eigenschaften der Faserführungen.

Für die Fertigung von Bauteilen wurden zwei unterschiedliche Verarbeitungsverfahren untersucht und angepasst. Beide Technologien liefern reproduzierbare Ergebnisse.

Wickeln

Beim Faserwickeln wird der Roving (oder mehrere zu einem Band zusammengefasste Rovings) auf einem sich drehenden Wickeldorn abgelegt. Auf dem Weg von der Spule zum Fadenauge durchläuft der Roving ein Harzbad, in dem er mit dem Matrixmaterial durchtränkt wird. Das Wickelmuster wird durch den Vorschub des Fadenauges und die Drehgeschwindigkeit des Dornes bestimmt. Nach dem eigentlichen Wickeln wird das Bauteil einem Temperaturregime ausgesetzt, dass durch das verwendete Harzsystem festgeschrieben ist. Das Enddornen und eine Endbearbeitung des Bauteiles schließen den Herstellungsprozess ab.

Das Bild 1 zeigt zwei unterschiedlich gewickelte CFK-Zylinder, und im Bild 2 ist die Wickelmaschine mit Dorn und Fadenaug abgebildet.



Bild 1 Gewickelte Zylinder aus hoch-wärmeleitfähigen Pechfasern ($d_i=32\text{mm}$, $d_a=35\text{mm}$ und $l=150\text{mm}$) mit unterschiedlichen Wickelmustern ($[\pm 15]$, $[\pm 15, \pm 30]$)

Für die hoch-wärmeleitfähigen Pechfasern erfolgten Parameteranpassungen bezüglich

- der Fadenführungen und des Fadenauges,
- der Fadenspannung,
- des Harzsystems,
- dem Wendeverfahren und

- des Dorndurchmessers.

Mit diesem Verfahren können Zylinder und zylinderähnliche Bauteile mit konstanter oder veränderlicher Wanddicke hergestellt werden.

Prepreg-Herstellung

Ein Prepreg ist ein Zwischenprodukt auf dem Weg von den einzelnen Verbundkomponenten, Faser und Harz, zum fertigen Bauteil. Dabei besitzt das Harzsystem die besondere Eigenschaft, dass es in zwei Stufen aushärtet. In der ersten Stufe wird eine klebrige Konsistenz des Harzes erzielt, die als Tack bezeichnet wird. Somit sind die darin enthaltenen Fasern schon leicht fixiert. Dieses Prepreg kann dann je nach Umgebungstemperatur mehrere Wochen bis zu einem halben Jahr eingelagert werden, bevor die zweite Aushärtungsstufe (z.B. in einem Autoklav) erfolgen muss.

Für die industrielle Prepreg-Herstellung werden mehrere Rovings gleichzeitig benötigt. Die konkrete Anzahl wird durch die geforderte Prepreg-Breite und das zu erzielende Flächengewicht bestimmt.

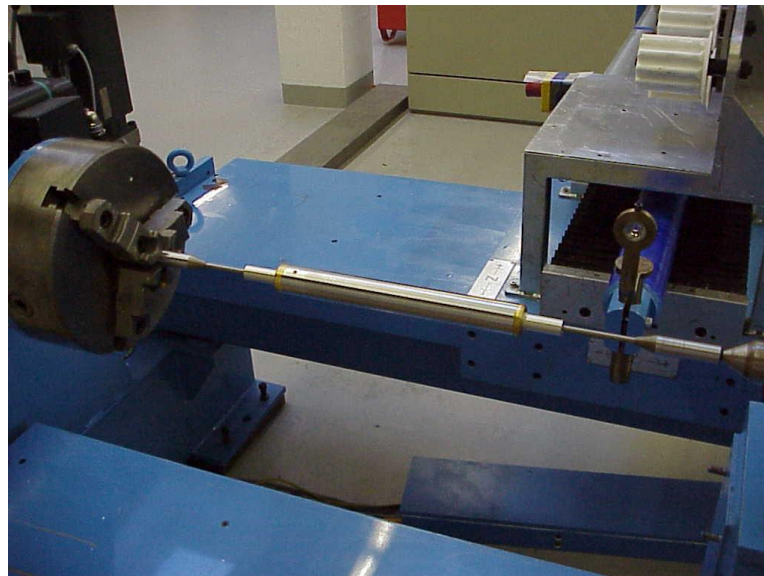


Bild 2 Vorbereitete Wickelmaschine mit Dorn und Fadenaug

Die gebräuchlichen Prepreg-Maschinen können die empfindlichen Pech-Fasern nicht verarbeiten. Es ist auch kostenintensiv, für die Produktion von einigen Quadratmetern Prepreg z.B. 80 Spulen bereitzustellen. Deshalb musste ein anderes geeignetes Verfahren gefunden werden.

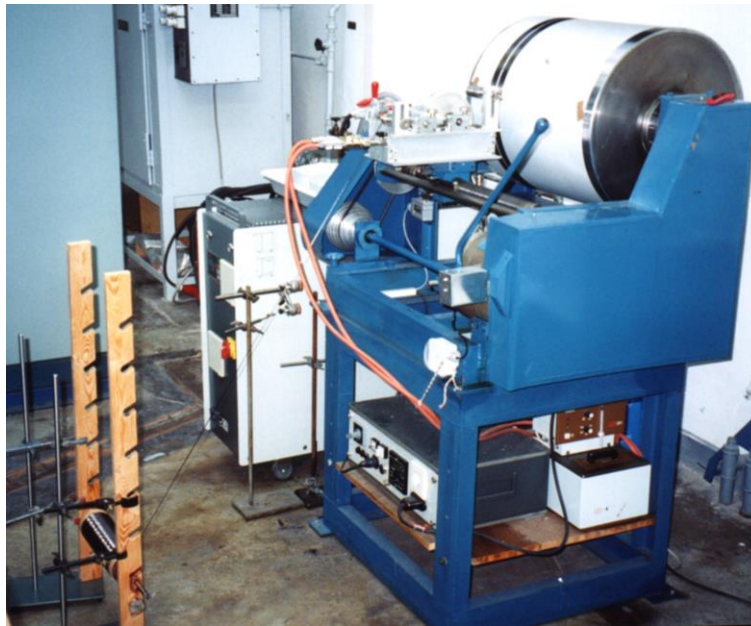


Bild 3 Test mit einer „Trommel-Prepregmaschine“

Die Herstellung von Prepreg mit den empfindlichen Pechfasern wurde auf einer „Trommel-Prepreg-Maschine“ getestet. Da das Verfahren auf dem Prinzip einer Wickelmaschine basiert, können mit ähnlichen Verfahrensanpassungen, wie sie für das Wickeln notwendig waren, Prepregs hergestellt werden. Dieses Verfahren besitzt zudem den Vorteil, dass nur eine Spule und somit ein Roving zur Herstellung benötigt wird. Die erste Stufe der Harzhärtung erfolgt direkt auf der Trommel. Die so gefertigten Prepregs sind unidirektional verstärkt.

Autoklav Anwendung

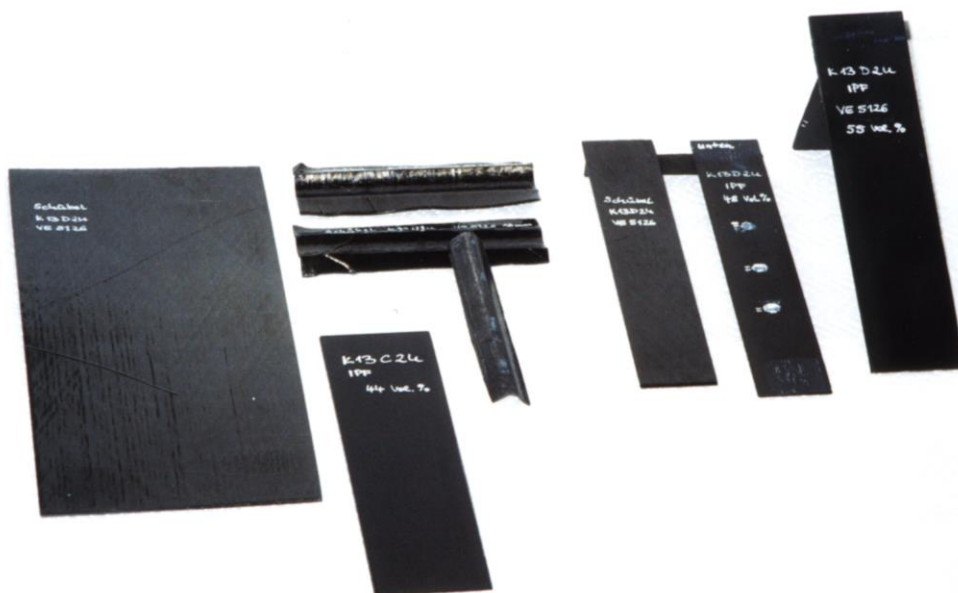


Bild 4 Gefertigte ebene Platten und Winkel (unbearbeitet) aus hoch-wärmeleitfähigen Pechfasern

Die vorgefertigten Prepregs werden nun mit dem gewünschten Lagenaufbau des Laminats auf einer Form abgelegt und in einen Vakuumsack verpackt. In einem Autoklav können die Bauteile unter einem Druck- und Temperaturregime, das durch das eingesetzte Prepreg-Harz bestimmt ist, ausgehärtet werden.

Entsprechend der verwendeten Form können ebene oder beliebig geformte Bauteile hergestellt werden. Beispiele für diese Bauteile zeigt das Bild 4. Bei den Pechfasern ist eine untere Grenze der Flächenkrümmung von ca. 10 mm zu beachten.

Eigenschaften der Verbundbauteile

Für die Abschätzung der maximal erreichbaren Verbundeigenschaften werden nachfolgend die Werte in Verstärkungsrichtung für ein unidirektionales Laminat mit 60 % Faservolumenanteil angegeben. Als Matrix-Material wird ein typisches Epoxidharz nach Tabelle 2 erwendet. Da dieser Verbund anisotrop ist, sind die Eigenschaften in Richtungen, die von der Faserrichtung abweichen, deutlich niedriger.

Thermo-mechanische Eigenschaften

In der Tabelle 3 sind die maximal erzielbaren mechanischen und thermischen Kennwerte in einem unidirektional verstärkten Laminat aufgelistet.

Elastizitätsmodul in Faserrichtung [GPa]	Zugfestigkeit in Faserrichtung [MPa]	Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung [W/(mK)]	Dichte [g/cm ³]
497-559	1404-2280	372-702	1.8

Tabelle 3 Eigenschaften vom unidirektionalem Laminat mit 60% Faservolumenanteil in Faserrichtung

Für ein Beispiellaminat ist im Bild 5 ein Vergleich der richtungsabhängigen Elastizitätsmoduln für unidirektional (anisotrop) und quasi-isotrop verstärktes Laminat dargestellt. Beim quasi-isotropen Laminat besteht der symmetrische Lagenaufbau aus der gleichen Anzahl von 0°, 45°, -45° und 90° orientierten Schichten. Dieses Beispiel soll demonstrieren, dass die thermo-mechanischen Laminateneigenschaften in einem relativ großen Bereich einstellbar bzw. optimierbar sind. Es ist die Aufgabe des Ingenieurs, den speziellen Lagenaufbau und damit die Laminateneigenschaften an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen.

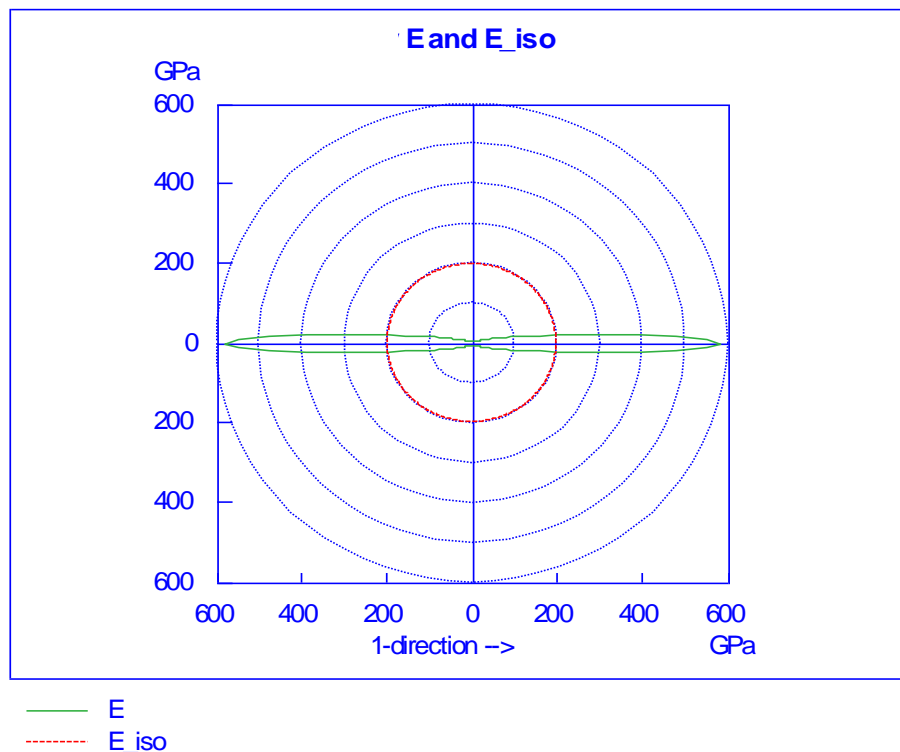


Bild 5 Vergleich der E- Moduln zwischen unidirektionalem und quasi-isotropem Laminat

Prüfung der Bauteilwärmeleitfähigkeit



Bild 6 Computergesteuerter Versuchstand zur Messung der in-plane Wärmeleitfähigkeit in Bauteilen

Das Unternehmen hat einen Versuchstand entwickelt, mit dem die in-plane Wärmeleitfähigkeit von zylindrischen und ebenen Bauteilen bestimmt werden kann. Die Wärmeleitfähigkeitsbestimmung besteht aus einer Messung und einer Simulation. Der einachsige Versuch basiert auf dem Prinzip der indirekten Wärmestrommessung über die Erfassung der entsprechenden Querschnittstemperaturen. Da bei unbekannter Leitfähigkeit der eingetragene Wärmestrom bekannt sein muss, werden mit einer Simulation die Wärmeverluste in dem mit Schaummaterial thermisch isoliertem Versuchsaufbau ermittelt und bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt. Im Bild 6 ist der Versuchstand bestehend aus dem Messcomputer, der Steuerung des Heizers und dem Daten-Logger, dem Versuchsaufbau für zylindrische Proben und dem Thermostat (v.r.n.l.) dargestellt.

Vergleich zu konventionellen Materialien

In der Tabelle 4 sind die Werkstoffparameter von einigen Metallen und deren Legierungen zum Vergleich mit den Verbundmaterialien aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass die Lamine (vgl. mit Tabelle 3) bei überwiegend geringerer Dichte bessere Eigenschaften besitzen. Gerade bei dem Vergleich von spezifischen Werkstoff-kennwerten, d.h. von Kennwerten die auf die Dichte bezogen sind, besitzen die oben beschriebenen Verbunde besonders gute Eigenschaften.

Material-bezeichnung	Elastizitätsmodul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Dichte [g/cm ³]
Al	70	50-500	165-220	2.7
Magnesium	45	180-230	171	1.8
Kupfer	100	200-1200	350-390	8.9
Titan	105	230-460	7.5	4.5
Stahl	210	300-1500	45-75	7.8

Tabelle 4 Thermo-mechanische Eigenschaften von verschiedenen metallischen Werkstoffen

Mögliche Anwendungsgebiete

Aufgrund der besonders guten spezifischen thermo-mechanischen Materialkennwerte sind diese Verbundwerkstoffe für Anwendungen mit kombinierte Anforderungen bezüglich der Wärmeleitfähigkeit, Festigkeit und Steifigkeit besonders geeignet. Dies könnte

z.B. bei Teilen von Gehäusen in der Elektro- oder Elektronikindustrie der Fall sein, die zum einen eine Wärmetransportaufgabe zu erfüllen haben und zum anderen genügend fest und steif sein müssen, um die vorhandenen Kräfte zu übertragen und gegebene Verformungsvorgaben einzuhalten. Es können aber auch effiziente Wärmemanagementsysteme aus diesem Material hergestellt werden.