

## Allgemeine Angaben

Ein Faserkunststoffverbund (FKV) ist ein Werkstoff bestehend aus Verstärkungsfasern und einer Kunststoffmatrix. Durch das Einbetten der Fasern in die Matrix werden die Fasern räumlich fixiert und die Lastein- und Lastausleitung wird ermöglicht. Die Lastübertragung erfolgt über die Adhäsion zwischen Faser und Matrix. Die Fasern werden durch die Matrix gegen Umgebungseinflüsse geschützt und sie stützt die Fasern z. B. gegen Ausknicken bei faserparallelem Druck.

Zu den Bestandteilen der FKV liegen die folgenden HHT-Merkblätter vor (siehe auch dort):

- Glasfasern
- Aramidfasern
- Kohlenstofffasern
- Matrixsysteme
- textile Flächenbildung

Die FKV werden beeinflusst durch den Werkstoff (Fasern, Matrix, Halbzeuge), die Fertigungstechnik (Umformen, Pressen, Laminieren, Wickeln) und die Konstruktion (Platten, Profile, Rohre, Formteile).

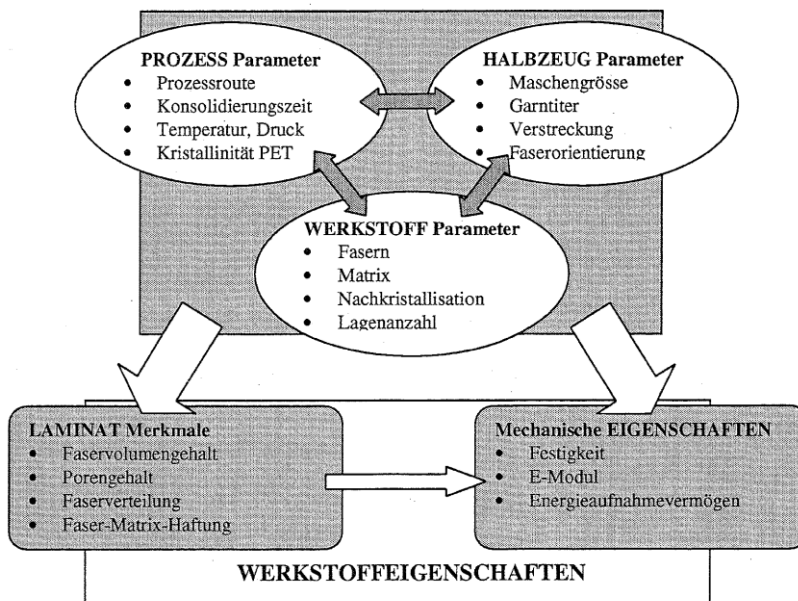


Abbildung 1: Übersicht der Einflüsse der Prozess-, Halbzeug- und Werkstoffparameter auf die Werkstoffeigenschaften aus [1]

Die mechanischen und thermischen Eigenschaften von FKV können über die in Abbildung 1 dargestellte Vielzahl von Parametern eingestellt werden.

Die Wahl des Faserwerkstoffs erfolgt nach:

- mechanische Eigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit)
- Materialpreis
- max. Faservolumenanteil [%]
- Anisotropie
- Umformgrad
- Qualität, Reproduzierbarkeit
- Energieaufnahmevermögen (Crashelemente)

Die Wahl des Matrixsystems erfolgt nach:

- mechanische Eigenschaften (E-Modul)
- Temperatureinsatzbereich (Glasübergangstemperatur, Schmelztemperatur)
- Medienbeständigkeit (sauer, basisch)
- Strahlungsbeständigkeit (UV-Stahlung)
- Langzeitverhalten (Kriechen, Relaxation)
- Feuchtaufnahme
- Schlagzähigkeit

Die wichtigsten FKV sind:

- Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GfK)
- Aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK)
- Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) (auch Carbonfaserverstärkte Kunststoffe genannt)
- Wood-Plastic-Composites (WPC), (zu deutsch Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff)

Die Verwendung von gestrickverstärkten Thermoplasten (GstVT) unter Einsatz der Werkstoffkombination Glasfaser/Polyethylenterephthalat (GF/PET) ist in [1] näher untersucht worden.

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Schäcke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

## Mechanische Kenwerte

	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Zug-E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]	Biegefestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Biege-E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul <sup>1</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
	EN 61	EN 61	EN 61	ASTM D 790	ASTM D 790	Experiment
Teilkristallines GF/PET <sup>2</sup> (100/100)	266	19.200	1,7	466	21.900	
Amorphes GF/PET <sup>2</sup> (100/100)	252	18.000	2,4	427	19.600	
GF/PET <sup>2</sup>						25.000
GF/PEET <sup>3</sup> 6K-Garn						44.000
GF/PEET <sup>3</sup> 3K-Garn						53.000
GMT <sup>4</sup>	ca. 175					ca.12.000

<sup>1</sup> bestimmt bei <5% der Bruchlast

<sup>2</sup> Werkstoffkombination Glasfaser/Polyethylenterephthalat

<sup>3</sup> Werkstoffkombination Glasfaser/Polyetheretherketon

<sup>4</sup> glasmattenverstärkter Thermoplast

## Verarbeitungshinweise

Die vorgefertigten Rohmaterialformen wie Faserhalbzeuge (Gewebe, Gestricke, Vliese usw.), Faser-Matrix-Halbzeuge (Platten-, Band- oder Strangform), thermoplastische Halbzeuge (Glasplattenverstärktes Thermoplast (GMT), Langfaserverstärktes Thermoplast (LFT)), duroplastische Halbzeuge (Sheet Moulding Compound (SMC), Bulk Moulding Compound (BMC)) und Prepregs (Preimpregnated Fibres) sind Zwischenstufen in der Verarbeitung und Herstellung von FKV. Prepregs bestehen aus vorimprägnierten Fasern und bezeichnen Halbzeuge, bestehend aus Endlosfasern und einer ungehärteten Kunststoffmatrix. Die Aushärtung erfolgt unter erhöhter Temperatur. Die Verarbeitung erfolgt mit Heißpresstechnik oder der Autoklavtechnik. Es sind im Einzelnen die Verarbeitungshinweise zu den Bestandteilen der FKV zu beachten (siehe auch o.g HHT-Materialmerkblätter).

## Beschichtungen und Anstriche

Die Hinweise aus dem HHT-Materialmerkblatt „Matrixsysteme“ gelten hier für die FKV gleichermaßen, da die Eigenschaften des Matrixsystems für die Beschichtungen und Anstrichsysteme ausschlaggebend sind.

## Bauphysikalisches Verhalten

Feuchte wird in erster Linie vom Matrixwerkstoff, nicht aber vom Faserwerkstoff (außer Aramid- und Naturfasern) aufgenommen. Wesentliche Auswirkungen durch den Einfluss von Feuchte sind Gewichtszunahme, Sinken des E-Moduls und der Festigkeit, Sinken der Faser-Matrix-Haftung und Sinken der Glasübergangstemperatur. Die Stärke dieser Auswirkungen kann durch einen Kochtest im Einzelfall geprüft werden.

Temperaturdifferenzen haben mechanische Auswirkungen zur Folge. Es entstehen zum einen mikromechanische Span-

nungen, wenn Faser- und Matrixwerkstoff unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen, weil dadurch die Faser-Matrix-Grenzfläche beansprucht wird und es so zum vorzeitigen Versagen des Verbundes führen kann. Zum anderen entstehen makromechanische Spannungen bei geschichteten FKV zwischen den Schichten des Verbundes.

Unter hohen Temperaturen tritt ein beschleunigtes Kriechen und Relaxationsverhalten des FKV auf. Vor energiereicher Strahlung wie UV, Infrarot, Röntgen-, kosmischer- und radioaktiver Strahlung sind FKV zu schützen, da sie zum Abbau der Ursprungsfestigkeit führen.

FKV werden von Alkalien und starken Säuren angegriffen. Hochwertige Harze (Vinylester und Epoxidharz), höherwertige Fasern sowie harzreiche Chemieschutzschichten können das Eindringen der Medien verhindern. Die ausgehärteten FKV sind dauerhaft z.B. vor Ölen, Fetten, Benzin und Diesel sowie Säuren zu schützen.

## Kosten

Die Kosten schwanken stark. Für ein Fiberline-Produkt kann zur Zeit folgender Preis angegeben werden: 12 EUR / kg bei 60 % Fasermasseanteil. (Die Lochleibung bei den Fiberline-Produkten kann mit 150 N/mm<sup>2</sup> (parallel) und 70 N/mm<sup>2</sup> (senkrecht) angesetzt werden.)

## Ökologische Bewertung

Eine allgemeine Abschätzung der Umweltauswirkungen eines FKV ist nicht möglich, da sie zum einen vom Verhältnis Matrixsystem / Faser abhängen und zum anderen sowohl Fasern als auch Matrixsysteme in ihren Auswirkungen variieren. Es werden daher an dieser Stelle die Angaben einzelner Merkblätter zusammengefasst.

Um die Vergleichbarkeit der einzelnen Fasern untereinander zu gewährleisten, werden in unten stehender Tabelle für diese Fasern die Ergebnisse einer ökologischen Bewertung

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Schäcke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

auf Basis der IDEMAT Datenbank [5] angegeben, die einheitliche Bedingungen für die Bewertung der einzelnen Fasern gewährleistet. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Werte für Glasfasern z.T. deutlich über den angegebenen Werten liegen können (Ergebnisse derecoinvent Datenbank zeigen das 3-4fache der Werte der IDEMAT Datenbank). Sie liegen dennoch immer noch deutlich unter den Werten für

Aramid- und Kohlefasern. Zusätzlich wird als Anhaltspunkt für ein Matrixsystem das Ergebnis für Epoxidharz mit angegeben. Eine Produktbewertung kann so über das Mischungsverhältnis abgeschätzt werden., Die Werte für Epoxidharz werden auf Basis derecoinvent Datenbank [6] angegeben. Die angegebenen normalisierten Werte sind bezogen auf die Emissionen Westeuropas während des Jahres 1995.

Ökobilanzdaten	Ressourcenverbrauch [kg Sb eq]	Versauerungspotential [kg SO2 eq]	Eutrophierungspotential [kg PO4 eq]	Treibhauspotential [kg CO2 eq]	Ozonabbaupotential [kg CFC eq]	Sommersmogpotential [kg C2H4 eq]	Primärenergieverbrauch (KEA fossil) [MJ]
1 kg Glasfaser	0,0055	0,0044	0,0004	0,5115	0,0056 * 10 <sup>-6</sup>	0,0001	9
normalisiert	0,349 * 10 <sup>-13</sup>	0,138 * 10 <sup>-13</sup>	0,308 * 10 <sup>-14</sup>	0,123 * 10 <sup>-13</sup>	0,0108 * 10 <sup>-15</sup>	0,126 * 10 <sup>-15</sup>	-
1 kg Aramidfaser	0,0899	0,0545	0,0059	13,2317	44,7 * 10 <sup>-6</sup>	0,0036	339
normalisiert	5,75 * 10 <sup>-13</sup>	1,70 * 10 <sup>-13</sup>	4,43 * 10 <sup>-14</sup>	3,19 * 10 <sup>-13</sup>	86,9 * 10 <sup>-15</sup>	3,75 * 10 <sup>-14</sup>	-
1 kg Kohlefaser	0,1757	0,1090	0,0192	12,5899	44,7 * 10 <sup>-6</sup>	0,0034	1652
normalisiert	11,2 * 10 <sup>-13</sup>	3,39 * 10 <sup>-13</sup>	14,5 * 10 <sup>-14</sup>	3,03 * 10 <sup>-13</sup>	86,9 * 10 <sup>-15</sup>	3,49 * 10 <sup>-14</sup>	-
1 kg Epoxidharz	0,0594	0,0404	0,0064	6,6764	1,26 * 10 <sup>-9</sup>	0,0012	133
normalisiert	3,80 * 10 <sup>-13</sup>	1,26 * 10 <sup>-13</sup>	4,86 * 10 <sup>-14</sup>	1,61 * 10 <sup>-13</sup>	0,0024 * 10 <sup>-15</sup>	1,21 * 10 <sup>-14</sup>	-

### Einsatzmöglichkeiten/Anwendungsempfehlungen

FKV weisen hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten auf. Daher sind sie für Leichtbauanwendungen geeignete Werkstoffe.

Im Holzbau sind CFK-Lamellen beispielsweise zur Biege- und Längskraftverstärkung von Holzbauteilen in zunehmendem Maße für den Einsatz im Neubau und in der Sanierung interessant. Bereits ausgeführt wurden Konstruktionen mit vorkonsolidierten Glasfaserstangen oder Bewehrungsstählen, die mittels Epoxydharz seitlich oder in der unteren Decklamelle eingefrästen Nuten vergossen wurden (z.B. System RENONATIK). Dies führt in Abhängigkeit vom eingesetzten Material und dem erzielten Bewehrungsgrad (~0,5 %) zu einem Anstieg von Festigkeit und Steifigkeit der Brett-schichtholz-binder zwischen 20 und 55 % [3].

Neben dem beschriebenen Einsatz von stabförmigen Verstärkungselementen kann auch ein planmäßiges Auf- oder Einkleben von vorkonsolidierten oder textilen band- oder lamellenartigen Faserkunststoffverbunden sehr wirkungsvoll sein.

Untersuchungen in Deutschland haben gezeigt, dass eine Applikation von Aramid- und Kohlefaserlamellen sowohl im konventionellen BSH- Herstellungsprozess als auch als nachträgliche Ertüchtigung wirtschaftlich möglich ist. Die Verstärkungswirkung beträgt dabei in Abhängigkeit von Art und Menge des eingebrachten Materials zwischen 25 und 50 %.

Für die nachträgliche Verstärkung empfehlen sich Kleber aus der Gruppe der Epoxide, da sie auch ohne Aufbringen von äußerem Druck wirksam werden. Die in der Brettschicht-holzerstellung üblichen Resorcinharz- und Polyurethankleber können auch bei zu verstärkenden Bauteilen eingesetzt werden [3].

Textile Verstärkungen von Anschlüssen und Krafteinleitungsbereichen stellen neben der Zug-, Biegezug- und Schubverstärkung von kompletten Bauteilen eine der wichtigsten Einsatzmöglichkeiten für FKV im Holzbau dar.

Mit beanspruchungsgerecht verstärkten Holzbauteilen (z.B. applizierte multiaxiale nähgewirkte Glasfaser-Gelege und biaxial verstärkte Gestricke) lassen sich Traglast und Steifigkeit der Verbindung erhöhen. Durch das veränderte Bruchverhalten textilverstärkter Anschlüsse tritt das für konventionelle Holzverbindungen mit einer geringen Anzahl von Dübeln typisch spröde Versagen nicht mehr auf, dadurch werden Tragreserven in der Verbindung erschlossen. Sowohl in alten als auch in neuen Holzkonstruktionen lassen sich durch das Zusammenwirken von duktiler Maschenware und geordnet abgelegten hochfesten und steifen Filamenten zur gezielten Verstärkung eine Vielzahl von Problempunkten lösen [2].

Im HHT - Projekt sind ringförmige Mehrlagengestricke zur Verstärkung von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungen

Kontakt	Ansprechpartner	Telefon	E-Mail
Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (laFB) e.V., Sophienstr. 33A, D-10178 Berlin	Hr. Hamann, Fr. Schäcke	++49 (0)30 28 39 28 -0	mail@iafb.de

dungsmitteln entwickelt und umgesetzt worden. Mit der Flachstrickmaschine und Maschenfäden aus Glas können Innendurchmesser mit minimal ca. 20 mm (späterer Verbindungsmitteldurchmesser) bei einer Gestrickbreite von 50 mm realisiert werden. Praxistaugliche Bauteile (Patches) entstehen durch Imprägnierung der Gestricke mit einem Harzsystem. Als Matrixsystem wurde ein duromeres Epoxid Harzsystem gewählt, da diese in der Vergangenheit an Holzbauteilen unter Witterungseinflüssen bereits erfolgreich getestet wurden. Als Verfahren zur Bauteilherstellung wurde ein Harzinjektionsprozess einerseits im Handlaminierungsverfahren und andererseits mit einem RTM - Werkzeug (Flüssigimprägnierverfahren) untersucht. Die entwickelten Patches haben einen Außendurchmesser von 120 mm und eine Dicke von 10 mm mit einem vorgesehenen Dübelloch von 24 mm und sind für den Einsatz im 3. Pilotprojekt „Hess - Innenhofüberdachung“ geplant worden.

Neben der Verstärkung von hochbeanspruchten Anschlussbereichen können FKV aber auch zur planmäßigen Verstärkung oder nachträglichen Ertüchtigung von Querschnittsunstetigkeiten (Ausklinkungen, Ausnehmungen oder Durchbrüche) eingesetzt werden und unterstreichen damit die Universalität dieser Verstärkungstechnologie.

Faserbewehrungen haben neben der Verstärkungswirkung in statischer Hinsicht auch für dynamische Beanspruchungen große Vorteile. Durch das Aufbringen von textilen Bewehrungen im Bereich der Anschlussmittel lässt sich die Duktilität zusätzlich erhöhen. Außerdem verbessert sich das Nachbruchverhalten maßgeblich. Die textile Bewehrung erhöht die Querkzug-, Schub- und Lochleibungsfestigkeit des Holzes und bietet Schutz vor Witterung und anderen äußeren Einflüssen.

Im HHT - Projekt wurden drei verschiedene Technologien der textilen Verstärkung auf Formholzröhren untersucht. Sowohl die Wickel- und Flechttechnik, als auch Rundgestricke (Schläuche) mit einem Flächengewicht von ca. 400 g/m<sup>2</sup> pro Verstärkungsrichtung lassen sich praxisnah einsetzen. Alle drei Varianten zeigten eine gute Übereinstimmung mit den mechanischen Anforderungen an die Verstärkungsschicht. Es wurde eine vergleichbare Qualität von allen in der Ausführung erreicht. In Versuchen erzielten Formholzrohre mit CFK-Wickelung deutlich höhere Traglasten (Steigerungen um über 50 %) und ein duktileres Verhalten im Vergleich zu den Referenzproben. Ferner belegen die Versuche, dass bereits ein geringer Bewehrungsgrad Traglast und Duktilität der Formholzrohre signifikant steigert [4].

### Literatur

- [1] Wilde, D.: Thermoplaste mit gestrickten Verstärkungsfasern. Optimierung von Werkstoff und Prozesseigenschaften. Dissertation. TU Clausthal-Zellerfeld. Papierflieger-Verlag. Clausthal-Zellerfeld 2003
- [2] Haller, P.; Birk, T.: Der Einsatz von multiaxialen Nähgewirken und Biaxialgestricken zur Verstärkung von Holzkonstruktionen. In: Curbach, M.; Hegger, J. (Editor). 2. Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2). TU Dresden. 2003. S. 235-246
- [3] laFB e.V.: state of the art zum BMBF-Vorhaben 0330722A-C Hochleistungsholztragwerke - HHT. 2007
- [4] Heiduschke, A., Haller, P.: Zum Tragverhalten gewickelter Formholzrohre unter axialem Druck. In: Bauingenieur. Band 84, Juni 2009. S. 262-269
- [5] [www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/index.htm](http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/index.htm)
- [6] [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)