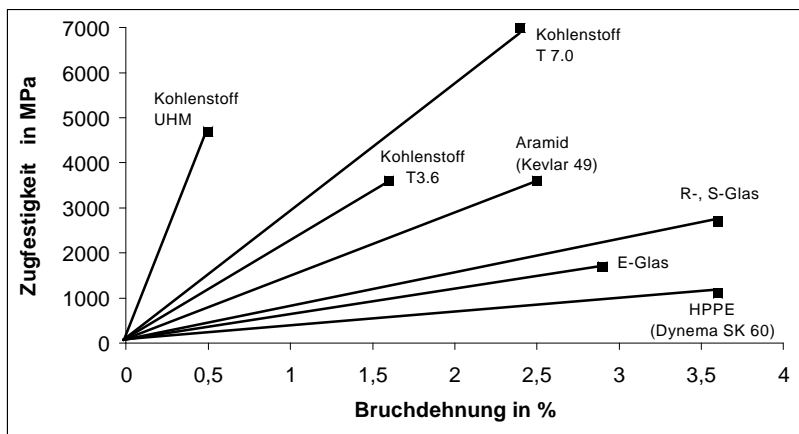


Verstärkungsfasern

In Kunststofffaser- Verbunden bestimmen die Verstärkungsfasern im Wesentlichen die Werkstoffeigenschaften. Die Festigkeit der Faser ist in vielen Fällen eine Größenordnung höher als die der Matrixwerkstoffe und liegt oftmals weit über den Zugfestigkeiten metallischer Werkstoffe. Die Dichte der gebräuchlichsten Fasern ist hingegen unter der von Aluminium angesiedelt, was auf ein hohes Leichtbaupotential hindeutet. Das Bild zeigt das Spannungs-Dehnungsverhalten der gebräuchlichsten Verstärkungsfasern.

Die meist in Faserkunststoff- Verbunden eingesetzten Fasern sind Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern. Weitere Fasern wie Bor- und PE-Fasern sind bislang nur wenig verbreitet. Für den Konstrukteur sind insbesondere die mechanischen Eigenschaften sowie die verfügbaren Faserhalbzeuge und deren Verarbeitungstechnologien von Bedeutung.



Glasfasern

Glasfasern sind die am häufigsten verwendeten Verstärkungsfasern in Kunststoffverbunden. Sie haben gute mechanische, chemische und dielektrische Eigenschaften und sind zudem sehr preisgünstig.

Von den unterschiedlichen Glasfasertypen wird die E-Glasfaser am häufigsten verwendet. Sie weist zwar etwas geringere Steifigkeits- und Festigkeitswerte als die R- und die S- Glasfaser auf, ist aber auch entschieden preiswerter als diese. Die meisten textilen Halbzeuge (Gewebe, Gelege und Matten) sind zudem nur in E-Glasfasern verfügbar.

Das Bild zeigt die wesentlichen Eigenschaften der E-Glasfaser sowie deren typische Zusammensetzung.

Um die Haftung zwischen Fasern und Matrix zu verbessern, werden Haftvermittler eingesetzt, die als Schlichte bezeichnet werden. Die Wahl einer geeigneten Faserschlichte ist für die Anwendung bedeutsam, da die Schlichte entscheidend für die optimale Durchtränkung und Benetzung der Fasern ist. Für hoch beanspruchte Bauteile werden ausschließlich gefinisierte Glasgewebe verwendet. Gewebe und Rovings mit Silanschlichte sind etwas preiswerter, lassen sich aber wesentlich schlechter durchtränken und erzielen auch nicht so hohe Festigkeitswerte wie gefinisierte Faserprodukte. Die Verwendung von Glasfaserprodukten mit Textilschlichte ist im Bereich der verstärkten Kunststoffe nicht empfehlenswert, da insbesondere unter Feuchtigkeitseinfluss die Laminatfestigkeit aufgrund der gestörten Haftung zwischen Faser und Matrix deutlich absinkt.

Eigenschaft	Einheit	E-Glas
Dichte	g/cm ³ (20°C)	2,6
Zugfestigkeit	MPa	3.400
E-Modul	GPa	73
Bruchdehnung	%	3,5 - 4
Querkontraktionszahl	-	0,18
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	10 ¹⁵
Dielektrizitätskonstante	10 ⁶ Hz	5,8 - 6,7
thermischer Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ / K	5
Chemische Zusammensetzung (Richtwerte)		
SiO ₂	%	53 - 55
Al ₂ O ₃	%	14 - 15
B ₂ O ₃	%	6 - 8
CaO	%	17 - 22
MgO	%	< 5
K ₂ O, Na ₂ O	%	< 1
andere Oxide	%	ca. 1

Aramidfasern

Aromatisiertes Polyamid wurde von der Firma Du Pont Anfang der 70er Jahre entwickelt und wird seitdem unter dem Markennamen Kevlar® vertrieben.

Von Akzo ist ebenfalls eine Aramidfaser erhältlich. Sie trägt dort den Markennamen Twaron®. Es wird zwischen Niedermodul- und Hochmodul- Aramidfasern unterschieden. Das Bild zeigt die typischen Eigenschaften der beiden verfügbaren Aramidfasertypen.

Aramidfasern haben von den drei gebräuchlichsten Fasertypen das geringste spezifische Gewicht und zeichnen sich durch eine extreme Zähigkeit und Verschleißfestigkeit aus.

Auffällig ist auch der negative Wärmeausdehnungskoeffizient, d.h. die Fasern verkürzen sich bei Erwärmung. In Verbindung mit Matrixwerkstoffen mit positiver Wärmedehnung lassen sich so Lamine „einstellen“, die in weiten Temperaturbereichen praktisch keine Wärmedehnung aufweisen.

Aufgrund ihrer hohen Zähigkeit sind Aramidfasern allerdings problematisch zu verarbeiten. Gewebe können nur mit speziellen mikroverzahnten Scheren geschnitten werden, aramidfaserverstärkte Lamine sind nur im Wasserstrahlschneidverfahren mit einem akzeptablen Schnittbild nachzubearbeiten. Zudem neigen Aramidfasern zur Feuchtigkeitsaufnahme und sind UV-empfindlich. Für Aramidfasern ist bislang noch kein chemischer Haftvermittler verfügbar. Um dennoch eine gute Haftung zwischen Fasern und Matrix zu erreichen, werden Gewebe nach der Herstellung gewaschen, um die Webschlichte zu entfernen. Dennoch ist die Haftung der üblichen Matrixwerkstoffe an den Aramidfasern nicht so hoch wie bei gefinigten Glasfasern bzw. Kohlenstofffasern.

Eingesetzt werden Aramidfasern vor allem dort, wo extreme Anforderungen an die Schlagzähigkeit, die Materialdämpfung und die Verschleißfestigkeit gestellt werden und gleichzeitig geringes Gewicht gefordert wird. Typische Anwendungen liegen im Bereich des ballistischen Schutzes, wie z. B. bei kugelsicheren Westen, aber auch im Sportbereich, beispielsweise bei Wettbewerbskajaks.

Da es sich bei Aramid um eine **synthetisch hergestellte Faser** handelt, werden Aramidfaser verstärkte **Kunststoffe** als **SFK** bezeichnet. Vereinzelt findet man aber auch die Bezeichnung **AFK**.

Eigenschaft	Einheit	Niedermodul (LM)	Hochmodul (HM)
Herstellerbezeichnung	DuPont Akzo	Kevlar 29 Twaron	Kevlar 49 Twaron
Dichte	g/cm ³ (20°C)	1,44	1,45
Zugfestigkeit	MPa	2.800	2.900
Zug-E-Modul	GPa	59	127
Bruchdehnung	%	4	1,9
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	10 ¹⁵	10 ¹⁵
thermischer Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ / K	- 2,3	- 4,1
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,04	0,4
Zersetzungstemperatur	°C	550	550
Feuchtigkeitsaufnahme (20°C, 65% rel.Feuchte)	%	7	3,5

Kohlenstofffasern

Seit Mitte der 70er Jahre werden Kohlenstofffasern (engl.: Carbon) im industriellen Maßstab hergestellt und als Verstärkungsfasern eingesetzt. Sie bestehen zu über 90% aus reinem Kohlenstoff.

Die Vorspannung während des Herstellprozesses und die Temperaturen bei der Carbonisierung und der anschließenden Graphitisierungsglühung haben einen entscheidenden Einfluss auf die Reinheit und den Ausrichtungsgrad der graphitischen Schichten in Faserrichtung. Entsprechend sind unterschiedliche Fasertypen verfügbar, die ein sehr breites Steifigkeits- und Festigkeitsspektrum abdecken. Die am weitesten verbreitete Kohlenstofffaser ist die hochfeste HT-Faser (High Tensity), da sie im Vergleich zu den bei höheren Temperaturen geglühten Hochmodulfasern relativ günstig zu beziehen ist.

Einen guten Kompromiss stellt die IM-Faser (InterModulus) dar. Sie hat eine höhere Steifigkeit und gleichzeitig ein höheres Dehnvermögen als die HT-Faser, ist aber deutlich preiswerter als die Kohlenstoff-Hochmodulfasertypen HM (Hochmodul) und UHM (Ultrahochmodul).

Zur Verbesserung der Benetzung und Haftung der Fasern mit der Matrix stehen geeignete Oberflächenbehandlungsverfahren zur Verfügung. Insbesondere die Benetzbarkeit und Haftung mit Epoxydharzen ist bei Kohlenstofffasern sehr gut, was sich auch in einer hohen dynamischen Festigkeit von kohlefaserverstärkten EP-Harzen widerspiegelt.

Kohlenstofffasern sind wegen ihres hohen E-Moduls für Anwendungen prädestiniert, in denen vor allem eine hohe Steifigkeit erforderlich ist. Während Glas- und Aramidfaser hohe elektrische Isolationswirkung haben, sind Kohlenstofffasern elektrisch leitend. Diese besondere Eigenschaft kann ausgenutzt werden, indem im Laminat eingebettete Kohlenstofffasern als Widerstandsleiter zur Beheizung von Formen verwendet werden.

Eigenschaft	Einheit	HT (HTA)	IM (IM 600)	HM (HM 35)
Dichte	g/cm ³ (20°C)	1,78	1,8	1,97
Zugfestigkeit	MPa	3.400	5.400	2350
Zug-E-Modul	GPa	235	290	358
Bruchdehnung	%	1,4	1,7	0,6
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	710	---	710
thermischer Ausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ / K	- 0,1	---	-0,5
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	17	---	115
spez. Wärme	J / kgK	710	---	710