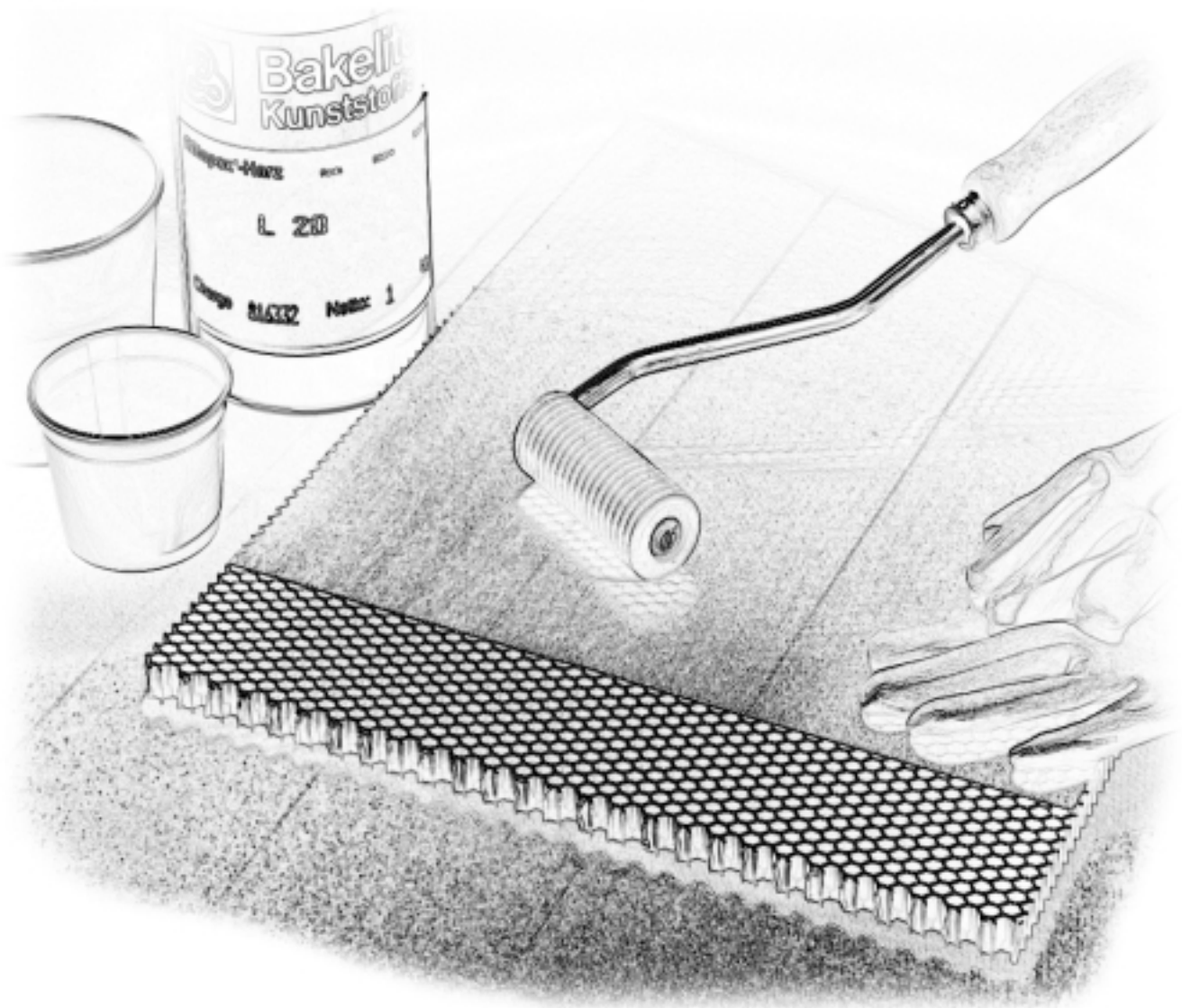


Faserverbundwerkstoffe Einführung



Kunststoffe

Eine Übersicht

Jahrtausendlang waren natürliche Werkstoffe Grundlage menschlicher Existenz. Kleidung, Werkzeuge und Gebrauchsgegenstände wurden aus Leder, Metall, Stein, Ton und anderen Naturstoffen hergestellt. Werkstoffe wie Porzellan, Glas und Metall-Legierungen wurden meist mehr oder weniger zufällig entdeckt.

Die Verknappung und Verteuerung wichtiger Rohstoffe löste zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine intensive Suche nach synthetischen (künstlich hergestellten) Ersatzwerkstoffen aus. Grundlegend veränderte technische Anforderungen der schnell wachsenden Industrie konnten mit Naturstoffen allein nicht mehr erfüllt werden.

Aus natürlichen Rohstoffen wie Kohle, Steinkohlenteer, Erdöl und Erdgas wurden im Laufe der Zeit unzählige Verbindungen, darunter zahlreiche Kunststoffe, synthetisiert.

¹⁾Das Ziel, **verschiedenartige Materialien** zu einem **Werkstoffverbund** zu kombinieren, um verbesserte Eigenschaften und Synergieeffekte zu erzielen, ist in der Natur Gang und Gebe. Der Schnitt durch eine Paracortex-Zelle von Merinowolle und der Querschnitt eines unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Epoxydharzes (Cf-EP) zeigen ähnliche Strukturen wie der Querschnitt von Cf-EP und der Längsschnitt eines Bambusstabes. Nicht nur bei der Mikrostruktur kann die Natur als Vorläufer für Faserverbund-Kunststoffe angesehen werden, sondern auch

bei der Anwendung von Prinzipien des Leichtbaus.

Werkstofftechnische Gründe für die Verwendung von Fasern als Werkstoffelemente ergeben sich aus den vier Paradoxen der Werkstoffe:

1. Paradoxon des festen Werkstoffes

Die wirkliche Festigkeit eines festen Stoffes ist sehr viel niedriger als die theoretisch berechnete (F. Zwicky).

2. Paradoxon der Faserform

Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach größere Festigkeit als das gleiche Material in anderer Form und je dünner die Faser, umso größer ist die Festigkeit (A. A. Griffith).

3. Paradoxon der Einspannlänge

Je kleiner die Einspannlänge, umso größer ist die gemessene Festigkeit einer Probe/Faser.

4. Paradoxon der Verbundwerkstoffe

Ein Verbundwerkstoff kann als Ganzes Spannungen aufnehmen, die die schwächere Komponente zerbrechen würde, während von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden kann, als wenn sie alleine belastet würde (G. Slayter).

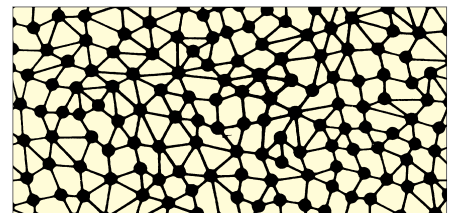
(nach Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, Hanser-Verlag)

Duroplaste

...härtbare Kunststoffe, die nicht erneut plastisch geformt werden können.

Duroplaste sind unlöslich, unschmelzbar und nicht schweißbar. Bei hohen Temperaturen verkohlen sie.

Epoxydharze
Polyesterharze
Polyurethanharze
Vinylesterharze
...und andere



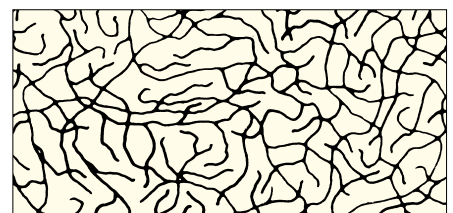
Strukturmodell für Duroplaste

Die Moleküle bilden ein dreidimensionales Netzwerk, sind also in alle Richtungen fest miteinander verbunden.

Thermoplaste

...werden in der Wärme plastisch und lassen sich wiederholt verformen. Reste sind durch Einschmelzen wiederverwendbar. Viele Thermoplaste sind in organischen Lösemitteln löslich. Verbindung untereinander durch Schweißen bzw. "kaltes Schweißen" mit Lösemitteln.

ABS
Polystyrol
PVC
Polyethylen
...und andere



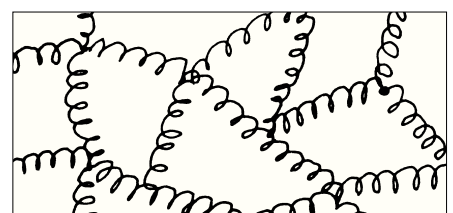
Strukturmodell Thermoplaste

Die Molekülketten sind sehr lang und orientierungslos angeordnet.

Elastomere

...gummiartig elastische Werkstoffe. Unter Spannung dehnt sich der Werkstoff. Nach Wegnahme der Kraft bildet sich die Verformung fast vollständig zurück. Elastomere sind hitzefest bis zum Verkohlen und durch Wärme nicht schweißbar - Verbindung untereinander durch Vulkanisieren.

Silikonkautschuk
Gummi
...und andere.



Strukturmodell Elastomere

Lange Molekülketten, die stark verknäuelnd sind und sich unter Spannung dehnen.

(nach Gnauck/Fründt: Einstieg in die Kunststoffchemie, Hanser-Verlag)

Kleine Kunststoffgeschichte

1907 Patent zur Herstellung von Phenolharzen ("Bakelit") an L. H. Baekland

1916 Patent über die Herstellung eines vollständig aus faserverstärkten Kunststoffen bestehenden Flugzeugs an R. Kemp

1935 Beginn der großtechnischen Herstellung von Glasfasern bei der Owens-Corning Fiberglass Corporation (USA)

1938 Patent zur Herstellung von Epoxydharzen (P. Castan)

1942 Erste Bauteile aus ungesättigtem Polyesterharz (UP)/Glasfaser für Flugzeuge, Boote und Autos

1943 Erste Sandwichbauteile für Flugzeuge aus Polyesterharz/Glasfasern und Balsaholz als Stützstoff

1944 Entwicklung und erfolgreiche Flugerprobung eines Flugzeugumpfes, der in einer GFK/Sandwichbauweise hergestellt wurde

1945 Produktion von Wabenkernen (Honeycombs), eines leichten und druckfesten Kernmaterials für Sandwichkonstruktionen (L.S. Meyer)

1945 Entwicklung des Faserwickelverfahrens (G. Lubin und W. Greenberg)

1951 Erstes Pultrusionspatent (Strangziehverfahren zur Herstellung von Profilen)
Patentierung von Allylsilan-Glasschichten, den Vorläufern der heutigen Silan-Haftvermittler (R. Steinmann)

1953 Produktionsbeginn von GF-UP (Glasfaser/Polyesterharz)-Außenteilen im Automobilbau (Chevrolet Corvette)
Entwicklung der ersten GFK-Segelflugzeuge in Deutschland

1959 Produktionsbeginn von Kohlenstofffasern bei der Union-Carbide (USA)

1967 Flugerprobung des ersten, fast vollständig aus GFK hergestellten Flugzeuges (Windecker Research Inc.)

1971 Produktionsbeginn von Aramidfasern (DuPont) unter dem Markennamen "Kevlar"

(nach Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, Hanser-Verlag)

Fachtermini

Häufig verwendete Begriffe und Abkürzungen

FVW

Faserverbundwerkstoff
besteht aus (Harz)-Matrix und Verstärkungsfasern

GFK

Glasfaserverstärkter Kunststoff

CFK

Carbonfaserverstärkter Kunststoff (Kohlefaserkunststoff)

SFK

Synthesefaserverstärkter Kunststoff (Aramid)

Matrix

Einbettungsmaterial für Verstärkungsfasern (meist Duroplaste, z.B. Epoxydharz). Funktion der Matrix:

- formt das Bauteil
- leitet und überträgt auftretende Kräfte auf die Fasern
- schützt die Fasern

Laminat

(von lat. *lamina* = die Schicht)

Ein Laminat ist ein flächiges Produkt, das aus einem Verbund von Harz und Faser besteht, unabhängig von seiner Form und dem Fertigungszustand (feuchtes Laminat, ausgehärtetes Laminat).

unidirektional

Bedeutet "nur in eine Richtung". Die Verstärkungsfasern verlaufen nur in eine Richtung.

bidirektional

Hier verlaufen die Fasern in zwei Richtungen, meist im Winkel von 0°/90°.

multidirektional

Faserverlauf in min. 3 Richtungen, meist 0°/90° und ± 45°

Anisotropie

Unterschiedliche Werkstoffeigenschaften in verschiedene Richtungen, bei FVW abhängig vom Faserverlauf (in Faserrichtung hohe Festigkeiten, quer dazu geringe).

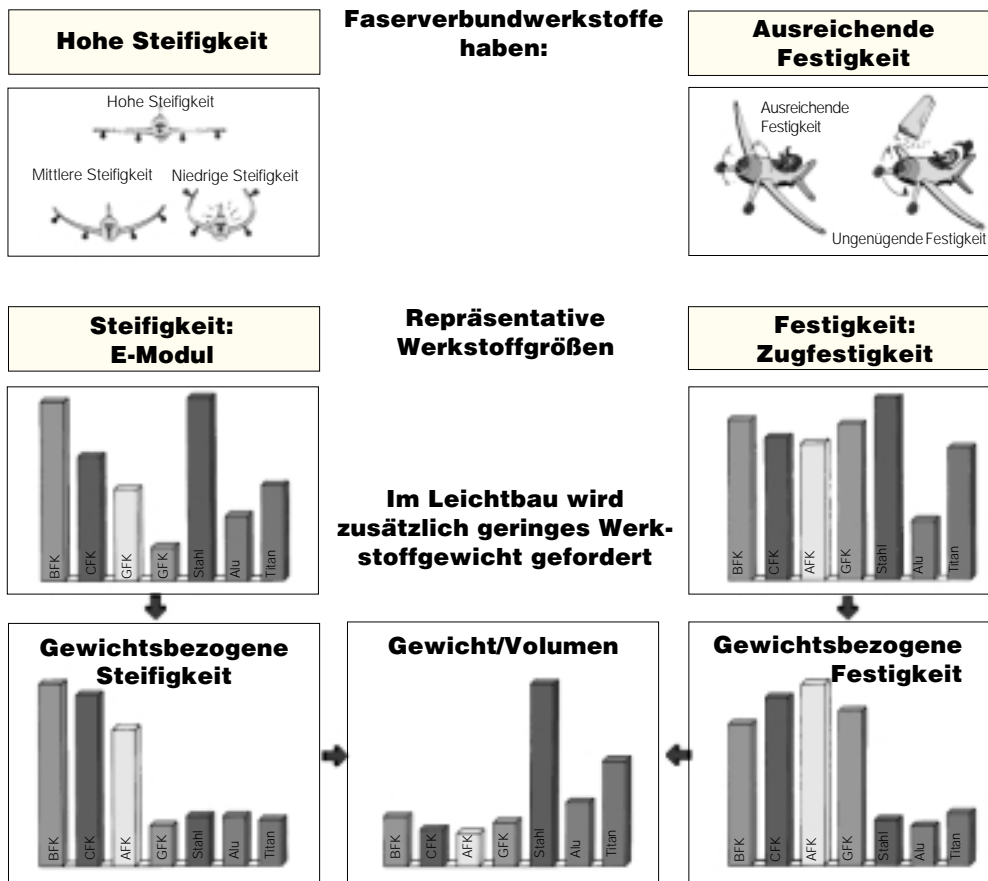
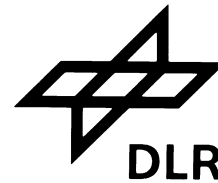
Isotrope Werkstoffe sind z.B. Metalle mit gleichen Eigenschaften in jede Richtung.

Weitere Fachtermini sind im Anhang am Ende des Handbuches erklärt.



Nicht nur in der Technik, auch bei Gebrauchs- und Luxusgütern haben Faserverbundwerkstoffe Eingang gefunden: Armbanduhr mit Kohlefaser-Ziffernblatt und -Armband.

Warum Faserverbundwerkstoffe?



Günstige Werkstoffkennwerte und werkstoffgerechte Konstruktion ermöglichen:

Leichtbauweisen

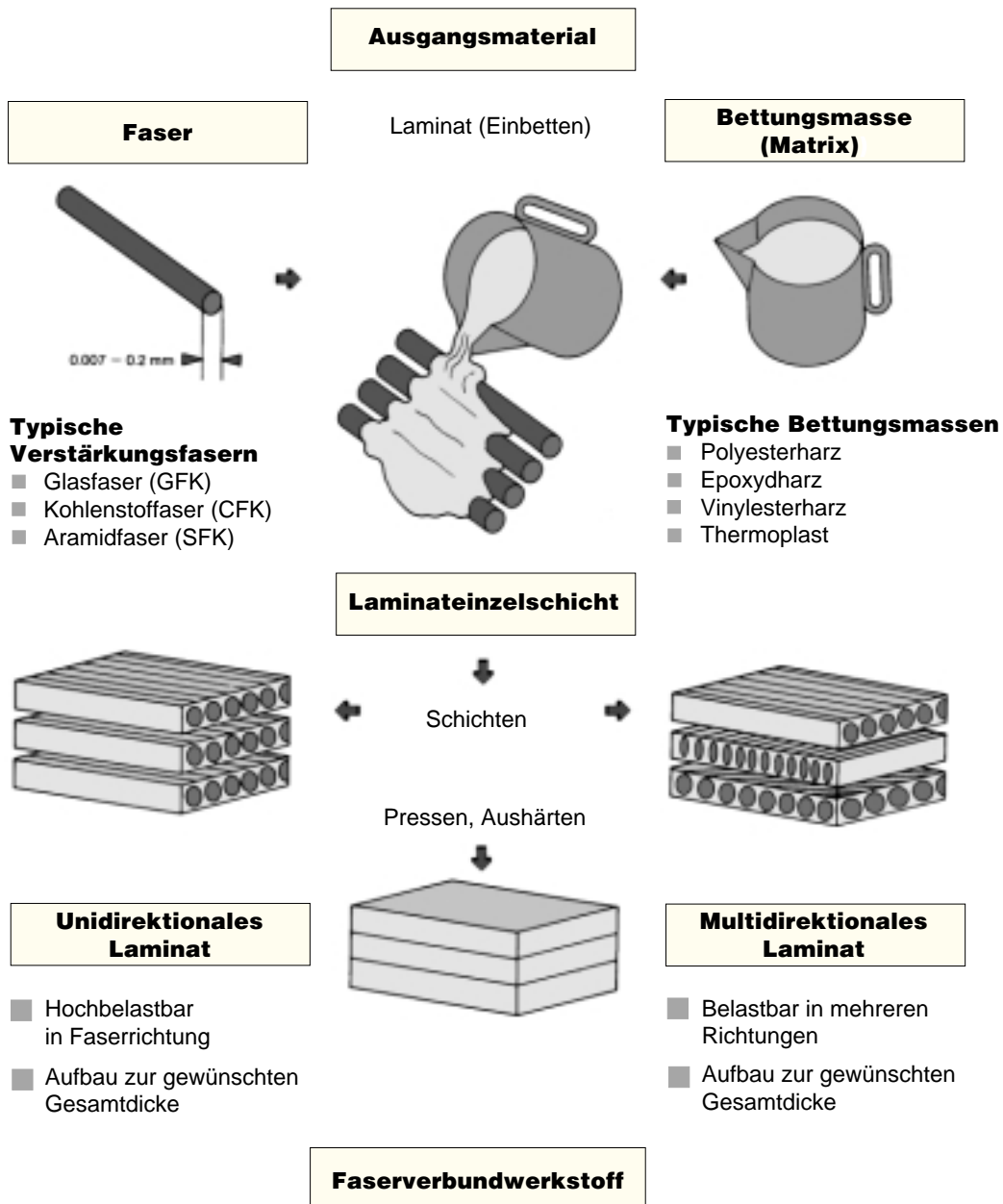
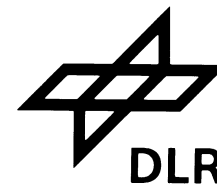
Weitere Werkstoffvorteile

- geringe Wärmeausdehnung
- Korrosionsbeständigkeit
- stufenweises Versagen
- hohe Schwingfestigkeit
- günstiges Schlagverhalten

Kostengünstige Bauweisen

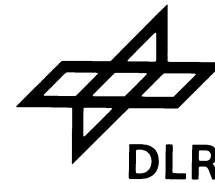
- weniger Einzelteile
- geringer Materialabfall
- gute Formbarkeit

Was sind Faser- verbundwerkstoffe?



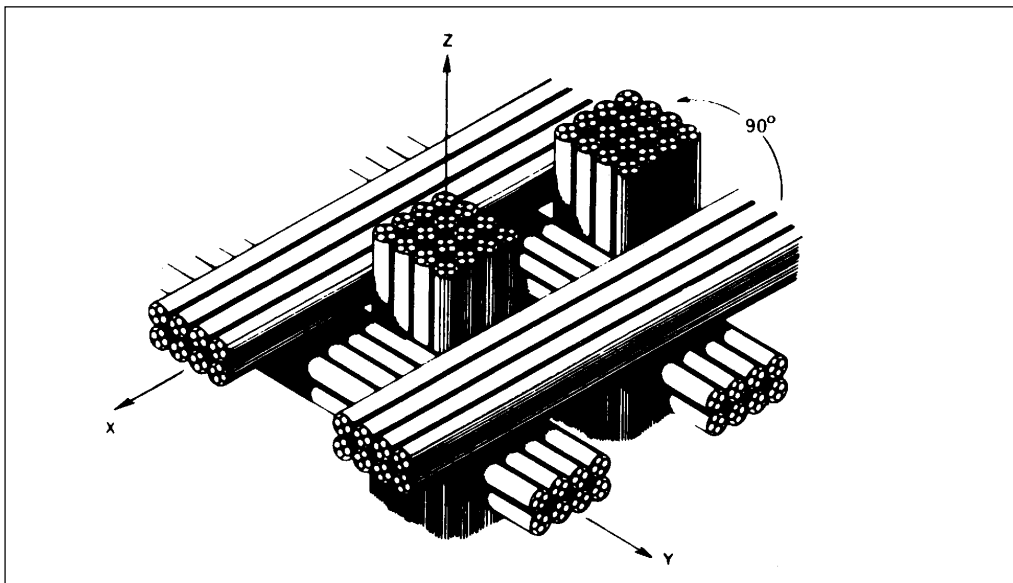
(nach DLR Stuttgart)

Konstruieren mit Faserverbundwerkstoffen



Faserverbundwerkstoffe sind anders als Metalle

- Richtungsabhängige Eigenschaften
- Vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten durch Variation von:
 - Faser- und Matrixwerkstoff
 - Faserrichtung
 - Lagenanzahl
- Werkstoffendzustand wird erst im Bauteil erreicht



Regeln für die Bauteilgestaltung

- Fasern in Richtung der angreifenden Lasten
- Möglichst symmetrischer Lagenaufbau
- Großflächige Kräfteinleitungen

(nach DLR Stuttgart)



Kennwerte von Duroplasten

Werkstoff	Dichte g/cm ³	Bruchdehnung %	Lieferform	Verarbeitungs- temperatur °C	Gebrauchstemperatur der Bauteile °C
UP ungesättigte Polyesterharze	1,12 - 1,25	unter 3	flüssig	Raumtemperatur bis 180	50 - 160
EP Epoxydharz	1,1 - 1,25	6 - 8	flüssig	Raumtemperatur bis 230	45 - 230
VE Vinylesterharze	1,07	3,5 - 7	flüssig	Raumtemperatur bis 175	100 - 150

Die **Bruchdehnung** von Laminierharzen sollte vorzugsweise gleich oder größer der Bruchdehnung der Verstärkungsfasern sein, damit im Belastungsfall kein Bauteilversagen durch Brüche und Risse im Harz eintritt.

Verarbeitungstemperatur

Der höchste Wert beschreibt die maximal erforderliche Temperatur bei der Warmhärtung. Diese Warmhärtung ist nur bei einigen Temperharzen mit entsprechend hoher Temperaturbelastbarkeit erforderlich.

Die überwiegend angebotenen kalthärtenden Harze erreichen bei Raumtemperatur nahezu ihre volle Festigkeit. Die Gebrauchstemperatur der Bauteile liegt meist bei 50-80 °C.

Werkstoff	Verarbeitungs- schwindung %	Nach- schwindung %	Reaktionswärme	Lager- fähigkeit
UP ungesättigte Polyesterharze	6 - 10 Linear um 2	bis 3	exotherme Reaktion mit teilweise hoher Wärme- entwicklung (besonders beim Vergießen zu berücksichtigen, Härter entsprechend auswählen).	dunkel, kühl, gut verschlossen bis 6 Monate
EP Epoxydharz	1 - 3	< 1		dunkel, gut verschlossen 12 Monate
VE Vinylesterharze	1	bis 1		dunkel, kühl, gut verschlossen bis 6 Monate

Verarbeitungsschwindung

Der Schwund erfolgt bei *Epoxydharzen* in der flüssigen Phase, also hauptsächlich innerhalb der Verarbeitungszeit. Sobald die Harzmasse fest wird, tritt praktisch kein weiterer Schwund auf.

Die **Nachschwindung** ist bei unverstärkten Harzmassen am größten. Verstärkungen, z.B. durch Glasgewebeeinlagen, verringern das Schwundmaß erheblich. Beim **Tempern** (Nachhärten bei erhöhter Temperatur) ist ebenfalls eine leichte Nachschwindung zu erwarten, da sich noch reaktionsfähige Harz- und Härtermoleküle verbinden und somit enger zusammentreten.

Werkstoff	Beständig gegen (Auswahl)	Nicht beständig gegen (Auswahl)	Brennbarkeit	Reparatur
UP ungesättigte Polyesterharze	Wasser, wäßrige Lösungen, Heizöl, Benzin	heißes Wasser, konzentrierte Säuren und Laugen, Benzol, Alkohol, Toluol	nicht selbstverlöschend	auflami- nieren und kleben
EP Epoxydharz	Benzin, Benzol, Mineralöle, Fette	Heißes Wasser, Ester, konzentrierte Säuren und Laugen, Ketone, Aceton	schwer entzündbar, brennt weiter	
VE Vinylesterharze	37% HCL, Chlordioxid, Seewasser, Kohlenwasserstoffe	75% H ₂ SO ₄ 80 °C, kochendes Wasser, 15% NaOH (65 °C)	nicht selbstverlöschend	

Werkstoff	Zugfestigkeit MPa	Zugmodul GPa	Biegefestigkeit MPa	Biegemodul GPa
UP ungesättigte Polyesterharze	50 - 70	3,5 - 4,7	60 - 120	4,0 - 5,0
EP Epoxydharz	70 - 90	2,8 - 3,6	140 - 160	4,5 - 6,0
VE Vinylesterharze	75 - 85	3,4 - 3,5	125 - 135	3,2 - 3,8

Faserverbundwerkstoffe

Verschiedenartige Materialien zu einem Werkstoffverbund zu kombinieren, um **verbesserte Eigenschaften** zu erzielen, ist in der Natur ein ebenso selbstverständliches Prinzip, wie der Leichtbau.

Diese, der Natur abgeschaut Bauweise hat viele technische Bereiche geradezu revolutioniert. Erstmals stehen hochfeste und dabei leichte Werkstoffe mit überragenden Eigenschaften zur Verfügung.

Insbesondere in der Luft- und Raumfahrt werden durch niedrige Strukturgewichte wesentliche Energieeinsparungen und Leistungssteigerungen erzielt.

Der Einsatz von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen in der Raumfahrt ist vor allem wirtschaftlich begründet. Wegen der hohen Energiekosten ist man bereit, in diesem Bereich bis zu Euro 25.000 pro kg Gewichtersparnis aufzuwenden. Bei der Luftfahrtindustrie sind dieses 250 - 750 Euro/kg, in der Fahrzeugindustrie 0 - 2,50 Euro/kg (ausgenommen im Rennsport).

Da FVW im allgemeinen teurer sind als Kompaktwerkstoffe (z.B. Metalle) und höhere Anforderungen an die Auslegung und die Verarbeitungstechnologie gestellt werden, ist dieser Anreiz für den normalen Fahrzeugbau relativ gering, während er in der Luft- und Raumfahrt deutlich zum Tragen kommt.

Mit sinkendem Preis und zunehmendem, allgemein zugänglichem Know-How für die Verarbeitung haben sich FVW auf breiter Ebene durchgesetzt. Kaum noch wegzudenken sind sie im Motorsport, Modell- und Sportgerätebau.

Anwendungen im Maschinenbau sind im Vormarsch.

Das Funktionsprinzip

Ein Faserverbundwerkstoff (FVW) wird durch Zusammenfügen mehrerer Werkstoffe hergestellt:

- 1.) der formgebenden **Matrix** (z.B. Epoxyd- oder Polyesterharz)
- 2.) den verstärkenden, hochfesten **Fasern** (meist Glas-, Aramid- und Kohlenstoff)



Herstellen eines Handlaminats mittels Schaumstoffwalze



FVW sind im Prinzip vergleichbar mit Stahlbeton, bei dem ein spröder, formgebender Werkstoff (Beton) durch Stahleinlagen verstärkt wird.

Die Fasern werden in eine flüssige Reaktionsharzmasse eingebettet und beim Härten des Harzes in dem so entstehenden festen Formstoff verankert. Auch kompliziert gestaltete und sehr große Teile können in einem Arbeitsgang mit verhältnismäßig geringem Aufwand hergestellt werden.

Die Wahl des Verarbeitungsverfahrens richtet sich nach der Stückzahl und der Größe der herzustellenden Teile sowie nach den Anforderungen in bezug auf mechanische Festigkeit und sonstige Eigenschaften, wie z.B. Transparenz, Beschaffenheit der Oberfläche, Maßhaltigkeit usw.

Generell gilt: Der Faserverbundwerkstoff entsteht erst durch das Zusammenfügen von Harz und Fasern, d.h.

der Verarbeiter stellt ihn selbst her.

Für die Eigenschaften des Endprodukts sind daher ein sorgfältiges Verarbeiten und Aushärten neben der Bauteilauslegung (Faseroorientierung, Faseranteil, Lagenzahl und Gewebe) zwangsläufig von entscheidender Bedeutung.

Festigkeit

Die Festigkeit eines FVW wird wesentlich durch die Verstärkungs-faser bestimmt.

Prinzip 1: Ein Werkstoff in **Faserform** hat eine vielfach größere Festigkeit als das gleiche Material in anderer Form. Zudem gilt: je dünner die Faser, umso größer ist die Festigkeit. (A.A. Griffith)

Prinzip 2: Ein **Verbundwerkstoff** kann als Ganzes Spannungen aufnehmen, die die schwächere Komponente zerbrechen würden, während von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden kann, als wenn sie alleine belastet würde. (G. Slayter)

Bei der Betrachtung der Festigkeiten unterscheidet man zwischen statischer und dynamischer Festigkeit.

Die **statische Festigkeit** bezieht sich auf einfache Belastungsfälle (Zug, Druck, Biegung etc.) während die **dynamische Festigkeit** das Verhalten bei häufig wechselnder Belastung (Biegewechsel mit wechselnder Kraft und Frequenz, entsprechend kombiniert auftretende Zug-, Druck- und Schubkräfte) bestimmt.

Vor allem dort, wo häufige Biegewechsel auftreten, ist eine gute dynamische Festigkeit erforderlich (z.B. Holmkonstruktionen im Flugzeugbau).

Epoxydharze zeigen selbst bei mehreren zehntausend Lastwechseln den geringsten Festigkeitsabfall und damit die größte dynamische Festigkeit.

Matrix (Harz-Einbettung)

Das Reaktionsharz als Bindemittel (Matrix) hat die Aufgabe, die Fasern zu stützen und die auf das Formteil einwirkenden Kräfte auf sie zu verteilen. Dies macht eine gute Haftung des Harzes auf den Fasern notwendig.

Das Reaktionsharz bestimmt im wesentlichen folgende Eigenschaften: Chemikalienfestigkeit, Alterungsbeständigkeit, Kratzfestigkeit, elektrische Eigenschaften sowie den Schwund beim Härten.

Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wärmedehnung und spezifische Wärme hängen ab vom Mengenverhältnis der Komponenten Reaktionsharz, Reaktionsmittel, Fasern und Füllstoffe.

Fasern

Die mechanischen Eigenschaften der Formstoffe, z.B. Zug-, Biegefestigkeit und Schlagzähigkeit sowie die Fähigkeit zur Arbeitsaufnahme, sind hauptsächlich durch die Eigenschaften der Fasern bedingt. Sie können durch Wahl der Fasererzeugnisse, den Fasergehalt und die Orientierung der Fasern beeinflusst werden.

Härten

Die Eigenschaften des gehärteten Reaktionsharzformstoffes und damit des Formteiles hängen nicht nur vom Ausgangsmaterial ab, sondern auch in hohem Maße von der Führung des Härtingsprozesses. Kenntnisse über die Vorgänge beim Härten des Reaktionsharzes sind daher für den Verarbeiter unerlässlich.

Beim Härten, d.h. beim Übergang der flüssigen Reaktionsharzmassen in dreidimensional vernetzte Produkte, wird zwischen drei Reaktionsarten unterschieden:

Polymerisation

(z.B. ungesättigte Polyesterharze)

Unter dem Einfluß von Reaktionsmitteln, z.B. Peroxiden und Beschleunigern, reagieren die Doppelbindungen der Ausgangskomponenten unter Freiwerden von Reaktionswärme miteinander; es entstehen durch Vernetzen der Moleküle der Ausgangskomponenten hochmolekulare Substanzen.

Liegen mehrere Ausgangskomponenten vor, wie z.B. ungesättigte Polyester und Styrol bei UP-Harzen, so spricht man von Mischpolymerisation.

Die Polymerisationsreaktion benötigt nach dem Zugeben der Reaktionsmittel eine gewisse Anlaufzeit. Anschließend geht die Reaktionsharzmasse ohne Freiwerden flüchtiger Produkte verhältnismäßig schnell unter Erwärmung und raschem Ansteigen der Viskosität in den festen Zustand über. Der einmal eingeleitete Härtungsvorgang kann nicht mehr unterbrochen werden und ist irreversibel.

Polyaddition

(z.B. Epoxyd-Harze)

Im Gegensatz zur Polymerisationsreaktion werden hier dem Reaktionsharz wesentlich größere Mengen an Reaktionsmitteln zugegeben, und zwar in stöchiometrischen Mengen.

Die Eigenschaften des Endproduktes hängen daher sowohl vom eingesetzten Reaktionsharz als auch vom Reaktionsmittel ab. Der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand vollzieht sich bei der Polyaddition im allgemeinen langsamer und gleichmäßiger als bei der Polymerisation. Bei der Reaktion wird Wärme frei.

Polykondensation

(z.B. Phenolformaldehyd-Harze)

Im Gegensatz zur Polymerisation und Polyaddition reagieren hier die Ausgangskomponenten unter Abspalten von Nebenprodukten, z.B. Wasser.

Die Reaktion kann stufenweise durchgeführt werden. Im allgemeinen werden vorkondensierte Harze verarbeitet, zu deren Härtung meist nur noch Wärme notwendig ist.

Bruchdehnung

Bei einer Zugbeanspruchung darf das Harz nicht vor der Faser brechen, da es sonst durch Risse zu einem Versagen des gesamten Bauteils kommt. Die Bruchdehnung der Harze sollte daher vorzugsweise größer sein, als die der üblichen Verstärkungsfasern.

Harz/Faser-Haftung

Die Güte eines Verbundwerkstoffes hängt vor allem auch von der Haftung des Harzes auf den Verstärkungsfasern ab. Je besser diese Haftung, umso höher ist die Festigkeit.

Um dies zu erreichen, werden **Glasgewebe** mit Haftvermittlern (Silanen, verschiedenen Finishes) behandelt, damit eine möglichst feste (chemische) Verbindung mit dem Harz entsteht.

Eine Ausnahme bilden **Aramidfasern** (Kevlar®, Twaron®) und Polyethylengarne (Dyneema), für die kein chemischer Haftvermittler verfügbar ist.

Kohlenstofffasern werden mit einer Epoxydharzschichte versehen.



Handlaminat








Tränken eines Kohle/Aramid-Gewebes mit Epoxydharz für einen Segelflugzeugrumpf.



Handlaminat

Verkleben von Tragflächenrippen auf einen Holm aus GFK (Flugzeugbau-Workshop der Aero-Luftfahrtmesse, Friedrichshafen)

Einsatzbereiche von FWW

Einsatzbereich	Anwendungsbeispiele	Besondere Eigenschaften
	Antennenkomponenten, Satellitenstrukturen, Druckbehälter, Parabolspiegel, Hohlleiter, Gestelle für optische Geräte und Meßapparaturen.	Geringes Gewicht, Wärmedehnung durch ausgewählte Verstärkung bis Null einstellbar.
	Komplette Rümpfe, Holmkonstruktionen und Tragflächen/Leitwerke (z.B. im Motor- und Segelflugzeugbau, Ultraleichtflugzeuge), Sekundärstrukturen (Fußboden und Wandverkleidungen) sowie Teile der Primärstruktur (Leitwerk) bei Verkehrsflugzeugen (Airbus), Hubschrauberzellen, Rotorblätter, Propeller, Tanks.	Geringes Gewicht, ausgezeichnete statische und dynamische Festigkeit, sehr gute Ermüdungsbeständigkeit, integrierte Bauweise, Einsparungen bei der Montage aufgrund weniger Bauteile, korrosionsbeständig.
	Modellbau, Boots- und Surfbrettbau, Skier, Schläger aller Art, Angelruten.	Geringes Gewicht, kostengünstige Fertigung, gute Anpassungsmöglichkeit an schnellelebige Produkte.
	Großflächige Karosserieteile, Kardanwellen, Blatt- und Spiralfedern, Drehstäbe, Stoßfänger, Chassisrahmen, Versteifungselemente, Zwischenwände und Verkleidungen bei Eisenbahnwaggons, LKW-Aufbauten.	Kraftstoffeinsparung durch besonders niedriges Gewicht, gute Dämpfungseigenschaften, korrosionsbeständig.
	Flügel von Windenergieanlagen, Windkanalgebläse, Gasleitsysteme.	Dynamisch hoch belastbar, lange Lebensdauer, korrosionsbeständig.
	Schnell bewegte Teile in Verpackungs-, Druck-, Strick- und Webmaschinen, Behälter, Rohrleitungssysteme, Rührwerke, Pumpenelemente- und Gehäuse.	Geringe Massenträgheit, hohe Schwingfestigkeit, Wartungsarmut, sehr gute chemische Beständigkeit, einfache, anforderungsgerechte Gestaltung.
	Arm- und Beinprothesen, Orthesen, Implantate, medizinische Geräte (z.B. Liegen für Röntgenapparate).	Geringes Gewicht, gute Körperverträglichkeit.