

FASERVERBUNDWERKSTOFFE



Lehrerhandbuch

UNIA Universität Augsburg
Anwenderzentrum Material-
und Umweltforschung

**CARBON
COMPOSITES**

FASERVERBUNDWERKSTOFFE

Lehrerhandbuch

Erarbeitet von

Katharina Lechler, Carbon Composites e.V.

Katharina Lechler war an der Universität Augsburg im Bereich Lehrerbildung Arbeit-Wirtschaft-Technik tätig und wechselte 2012 zum CCeV. Dort verantwortet sie den Bereich Aus- und Weiterbildung in all seinen Facetten, von der Nachwuchsförderung bis zu Ingenieursweiterbildungen.

Marietta Menner, AMU Universität Augsburg

Marietta Menner absolvierte an der Universität Augsburg ein Lehramtsstudium (Gymnasium) und ist seit dem Jahr 2013 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Anwenderzentrum Material- und Umweltforschung der Universität Augsburg beschäftigt. Dort leitet sie das Bildungsprojekt „MAI Bildung“ und forscht im Rahmen ihrer Promotion an der Entwicklung innovativer, digitaler Lernszenarien für Schüler im MINT-Bereich.

Gestaltung: Bestmarke Werbeagentur GmbH & Co. KG, www.bestmarke-agentur.de

Augsburg, 2016

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Copyright: Carbon Composites e.V./Universität Augsburg, Augsburg

VORWORT

Faserverbundwerkstoffe entfalten zunehmend ihr Potential in unterschiedlichsten technischen Anwendungen, insbesondere in der Verbindung von Mobilität, Leichtbau und Energieeffizienz. Die einschlägigen Unternehmen, von denen viele in Bayern beheimatet sind, bieten somit beste berufliche Perspektiven.



Elfriede Ohrnberger

Für die Realschule als allgemeinbildende und berufsvorbereitende Schulart ist es daher selbstverständlich, den ihr anvertrauten Schülerinnen und Schülern zu vermitteln, welche Chancen die technische Verarbeitung dieser Werkstoffklasse für das persönliche berufliche Fortkommen bietet, sei es über neue Ausbildungsberufe oder über einschlägige Hochschulstudiengänge.

Folgerichtig wurden die Faserverbundwerkstoffe in das inhaltliche Repertoire des LehrplanPLUS für die Realschule aufgenommen, etwa im Fach Werken. Das vorliegende Handbuch informiert Sie als Lehrkraft über die fachlichen und technischen Hintergründe von Faserverbundwerkstoffen und gibt Anregungen für die Einbindung und praktische Anwendung im Unterricht.

Mein Dank gilt dem Carbon Composites e.V., der Universität Augsburg und den eingebundenen Werken-Lehrkräften, die die Erarbeitung dieses Lehrerhandbuchs mit großem Engagement und zusätzlichem Zeitaufwand übernommen haben.



Elfriede Ohrnberger
Ministerialdirigentin
Bayerisches Staatsministerium für Bildung und Kultus,
Wissenschaft und Kunst

Seit 2012 beschäftigt sich das Spitzencluster MAI Carbon mit der Zukunftsbranche der Faserverbundwerkstoffe.



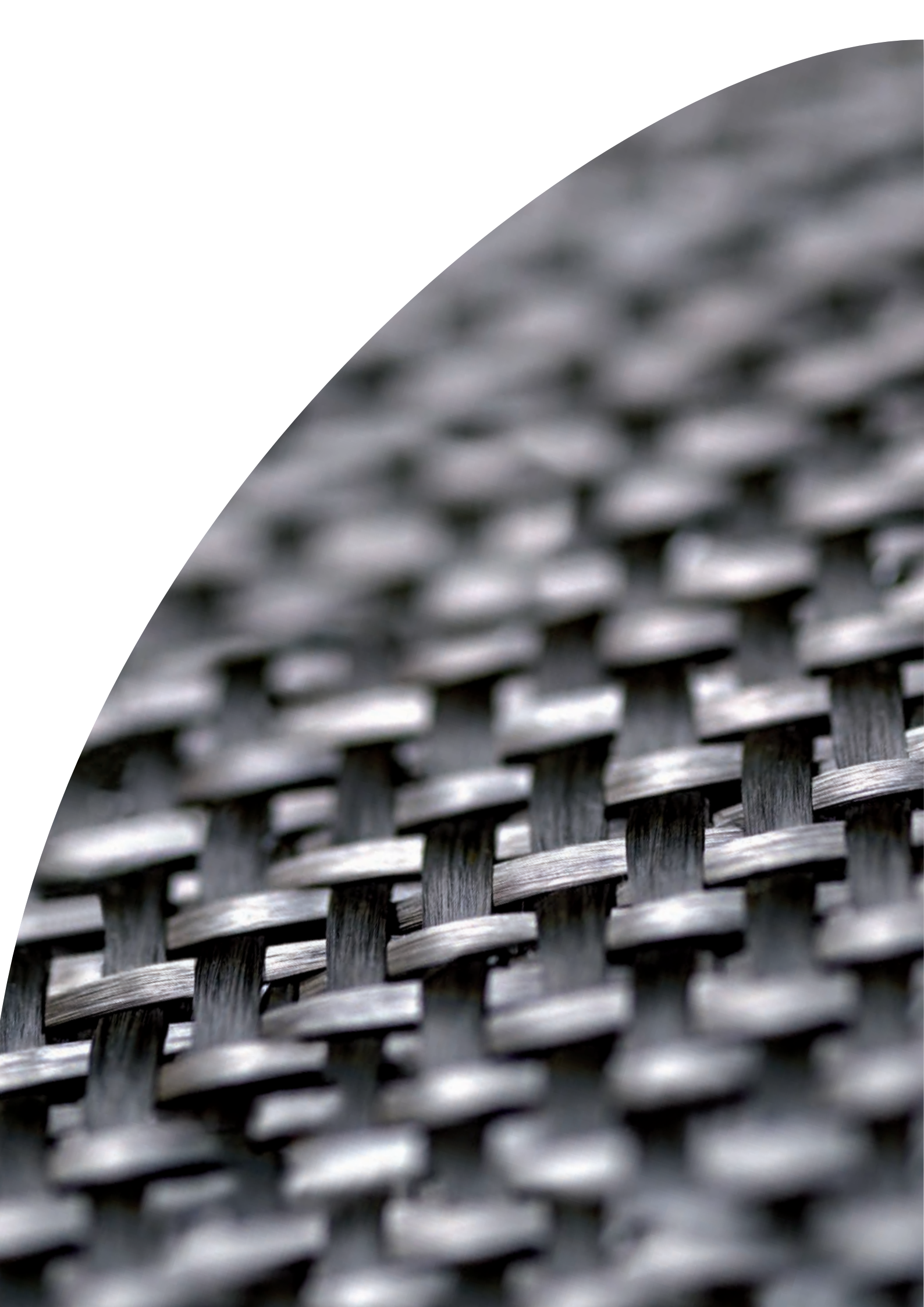
Prof. Dr. Klaus Drechsler

Im Rahmen des Projektes MAI Bildung hat man es sich explizit zur Aufgabe gemacht, alle Altersklassen mit geeignetem Lehr- und Lernmaterial an die neuen Werkstoffe heranzuführen: Sowohl die Kinder im Vorschulalter als auch Schülerinnen und Schüler der verschiedenen Schulzweige und -stufen können sich mittlerweile jeweils altersgerecht mit den Qualitäten und Möglichkeiten auseinandersetzen, die diese innovativen Materialien in sich tragen.

Das Lehrerhandbuch Faserverbundwerkstoffe wurde für Pädagogen entwickelt, die ihren Unterricht spannend und zukunftssträchtig gestalten wollen. Denn die Schülerinnen und Schüler von heute sind die Spezialisten von morgen. Ich danke daher dem Bundesministerium für Bildung und Forschung dafür, dass es dieses Projekt finanziell unterstützt hat. Und ich danke Ihnen dafür, dass Sie den Werkstoff der Zukunft den Fachkräften der Zukunft nahe bringen.

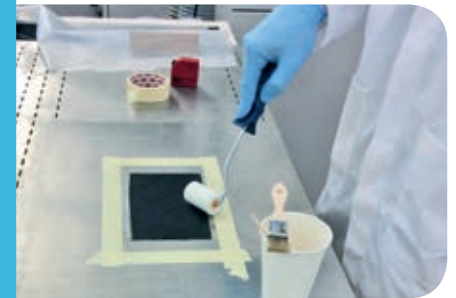
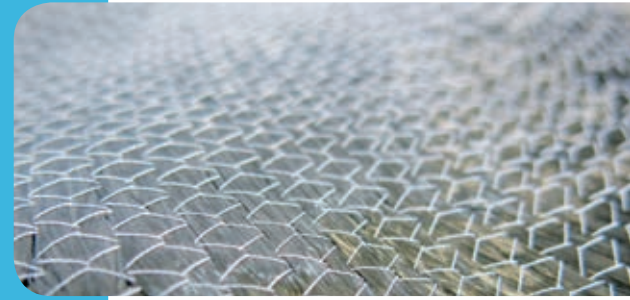


Prof. Dr. Klaus Drechsler
Lehrstuhlleiter
Lehrstuhl für Carbon Composites,
Technische Universität München
Mitglied des Vorstandes Carbon Composites e.V.



GLIEDERUNG

1	Einführung	6
2	Faserverbundwerkstoffe – Grundlagen	8
2.1	Anwendungsgebiete von Faserverbundbauteilen	9
2.2	Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen	10
2.3	Fasern	11
2.4	Faserherstellung	12
2.5	Textile Halbzeuge (Rohmaterial/Vorformen)	13
2.6	Faserorientierung	15
2.7	Matrix	16
3	Herstellungsverfahren Faserverbundbauteile	17
3.1	Werkzeuge	18
3.2	Laminieren	19
3.3	Faser-Harz-Spritzen	19
3.4	Vakuumverfahren	20
3.5	Vakuuminfusion – Resin-Transfer-Moulding (RTM)	20
3.6	Pultrusion (Pultrudieren = Strangzieh-Verfahren)	20
3.7	Wickeln	21
3.8	Prepreg/Autoklav	21
4	Faserverbund kontrovers	22
5	Berufsorientierung – Zukunftschance Faserverbund	24
5.1	Berufsausbildung	24
5.2	Weiterbildungsmöglichkeiten	24
5.3	Studienmöglichkeiten	24
6	Einführung Faserverbundwerkstoffe im Unterricht	25
6.1	Faserverbund im Lehrplan Plus	25
6.2	Theoretische Einführung Faserverbundwerkstoffe im Unterricht	27
6.3	Praktische Einführung Faserverbundwerkstoffe im Unterricht	27
6.4	Arbeitsschutz	30
7	Beispiele für den Werkunterricht (Erklärung der Beispiele als Anregung)	32
7.1	Beachball-Schläger	32
7.2	Lampenschirm	41
8	Begriffe	45
9	Literaturhinweise und Bildnachweise	46



1. EINFÜHRUNG

Die Anforderung, Emissionen zu reduzieren und das Streben nach Energieeffizienz stellen die Forschung, Entwicklung und Industrie der heutigen Zeit vor immer größere Herausforderungen. Jedes Kilogramm, das an einer bewegten Masse eingespart werden kann, trägt aktiv zum Klimaschutz bei. Dies gilt sowohl für Flugzeuge, wie auch für alle Arten erdgebundener Fahrzeuge. Damit eine Einsparung beim Gewicht der Enderzeugnisse erreicht werden kann, muss das Material, mit dem gefertigt wird, leichter werden. Viele traditionelle Konstruktionswerkstoffe, wie zum Beispiel Stahl und Aluminium, werden bereits durch die leichteren und trotzdem gleich und teilweise langlebigeren Faserverbundwerkstoffe ersetzt. ¹

Verbundwerkstoffe:

Kombination aus mehreren Werkstoffen, um neue Eigenschaften zu erzielen, die mit keinem der einzelnen Werkstoffe zu erreichen wäre.

Faserverbundwerkstoffe:

Spezielle Verbundwerkstoffe, bei denen man sich insbesondere die Eigenschaften von Faserstrukturen zu Nutzen macht.

Die in der Industrie gängigsten Faserverbundwerkstoffe sind:

GFK:

Glasfaserverstärkter Kunststoff
Glasfasern eingebettet in ein Polymer (Kunststoff)

CFK:

Carbonfaserverstärkter Kunststoff/Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
Kohlenstofffasern eingebettet in ein Polymer (Kunststoff)
Umgangssprachlich wird für CFK auch der Begriff Carbon verwendet.

Herkunft, Natur, Bionik

Faserverbundwerkstoffe sind keine Erfindung neuzeitlicher Technik, eher eine Evolutionslösung der Natur. Durch Evolution hat die Natur das Prinzip, Kräfte durch hochfeste Fasern tragen zu lassen, als bestgeeignetes Leichtbauprinzip herausgebildet.

Natürliche Faserverbundstrukturen sind z.B. Tragstrukturen von Pflanzen (tragende Stängel größtenteils aus Fasern in Lignin eingebettet aufgebaut), Muskulatur, Knochen (Fasern (Collagen) in anorganischer Substanz).

Faserverbundwerkstoffe wurden aber auch von den Menschen schon sehr früh für den Bau von Unterkünften verwendet. Lehmhütten bestehen in der Regel aus Reisig, Stroh oder Jutte (=Fasern) und Lehm (=Matrix).

Der älteste Konstruktionswerkstoff der Menschen ist Holz. Dieser Faserverbundwerkstoff besteht aus Cellulosefasern, eingebettet in einer Matrix aus Lignin.

Holz ist in vielen Bereichen ein nahezu idealer Werkstoff, da im Holz die Faserstruktur genau so entsteht, dass die Fasern die auftretende Last optimal aufnehmen können.

Aber während bei Holz die Faserstruktur durch das natürliche Wachstum vorbestimmt ist, kann diese bei künstlich hergestellten Faserverbundwerkstoffen so angepasst werden, dass sie genau den speziellen Anforderungen eines Werkstückes genügt. ²



Holz Faserstrukturen

¹ (vgl. Jäger/Hauke: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe, 2010.)

² (vgl. Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2007)

BEDEUTUNG FASERVERBUNDWERKSTOFFE (AKTUELL, ZUKÜNFTIG)

- Steigende Bedeutung des Leichtbaus mittels Faserverbundwerkstoffe für industrielle Produktion.
- Aktuell schon große Bedeutung für die Luft- und Raumfahrtindustrie.
- Großflächiger Einsatz in Windkraftanlagen
- Zukünftig große Bedeutung für Automobilbranche -> wenn Hemmnisse wie z.B. Entsorgungsproblematik oder unausgeschöpftes Serienfertigungspotential beseitigt sind.
- Aufkommende Bedeutung im Maschinen- und Anlagenbau
- Effizienter Ressourceneinsatz durch Materialkombinationen -> Bedeutung für die Umwelt

Faserverbundwerkstoffe sind nicht nur in der Weiterentwicklung der gängigen Fortbewegungsmittel stark nachgefragt. Durch ihre hervorragenden Eigenschaften und ihrem geringen Gewicht sind sie beispielsweise auch in der Medizintechnik sehr gefragt. Hier kommen sie bereits vor allem bei Orthesen und Prothesen zum Einsatz und werden derzeit in vielen weiteren Bereichen (zum Beispiel Rollstühle, medizinische Geräte etc.) erprobt. Die hohe Röntgentransparenz von CFK erlaubt die Umsetzung strahlungsärmerer Röntgengeräte.

Ein weiterer Zukunftsmarkt für den Einsatz von Faserverbundmaterialien ist die Baubranche. So können zum Beispiel tragende Betonstrukturen durch Carbongewebe-Gitter verstärkt werden. Die derzeit normalerweise eingesetzten Stahlmatten könnten in der Zukunft durch Carbonfasermatten ersetzt werden. So ließe sich beispielsweise das Eigengewicht von Brücken deutlich senken bei mindestens gleicher Belastbarkeit. Bei Gebäuden könnte diese Gewichtsreduzierung wiederum erheblich die Energieeffizienz steigern.

Die Korrosionsbeständigkeit von Carbonfasern ist ausgezeichnet. Somit verhalten sich CFK wie relativ edle metallische Werkstoffe. Dieses ist auf das elektrochemische Verhalten des vorhandenen Graphits in CFK zurückzuführen. Allerdings sollte man bei der Konstruktion von Pro-

dukten darauf achten, dass es bei dem Kontakt zwischen CFK- und Metall-Bauteilen oft zu Kontaktkorrosion kommen kann. Wird durch das Einbetten in der Kunststoffmatrix sichergestellt, dass jedes einzelne Filament gut elektrisch isoliert ist, kann es nicht zur Kontaktkorrosion kommen.¹

Neben der großen Bedeutung der Faserverbundwerkstoffe auf Grund des hohen Leichtbaupotentials, ist der Nutzen für die Umwelt durch den effizienten Umgang mit Ressourcen (sowohl in Form von Material als auch in Form von Kraftstoffen) nicht zu vernachlässigen. Es ist zu erwarten, dass in Zukunft der Einsatz von Faserverbundstrukturen stetig steigt, besonders, wenn gewisse Hindernisse beseitigt werden. Diese beruhen derzeit unter anderem auf den hohen Materialkosten, der Entsorgungsproblematik sowie der Wiederverwertung.

An diesen kurz skizzierten Beispielen lässt sich erkennen, dass in der Forschung, Entwicklung und Verarbeitung von Faserverbundmaterialien ein großes Zukunftspotential liegt.

Bildungswert, Erkenntnisse, Lernziele

- Interesse wecken für neue Werkstoffe
- Fortschritt der Technik erkennen
- moderne Technologien kennenlernen
- Herkunft und Bedeutung des Werkstoffes -> Werkstoffkunde – Werkzeuge – Arbeitsverfahren - Gesundheitsschutz
- neue Arbeitstechniken (Laminieren) lernen
- technische Schwierigkeiten meistern; genaues, sauberes Arbeiten
- Verknüpfung des theoretischen Inputs mit eigenem praktischen Tätigwerden
- Grenzen des Fortschritts, Ressourcenverbrauch erkennen, Entsorgung
- Berufsorientierung

¹ (vgl. Jäger/Hauke: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe, 2010.)
(Schreckenberger, Harald: Werkstoffe 4, 2013; doi:10.7395/2013/Schreckenberger1)

2. FASERVERBUNDWERKSTOFFE – GRUNDLAGEN

Verbundwerkstoffe ist ein Überbegriff für eine Vielzahl von Materialpaarungen, die in Kombination miteinander eine optimierte Werkstoffeigenschaft erzeugen.

Faserverbundwerkstoffe (engl. fiber reinforced composites) sind Verbundwerkstoffe, bei denen man sich die speziellen Eigenschaften von Faserstrukturen zu Nutze macht. Sie bestehen aus mindestens zwei Werkstoffen, den Fasern und der Matrix.

Die Fasern sind z.B. Kohlenstofffasern (umgangssprachlich Carbonfasern), Glasfasern, Keramikfasern oder Naturfasern. Die Matrix umschließt die Fasern und fixiert diese an der gewollten Position und schützt sie vor Umwelteinflüssen. Solche Matrices sind zum Beispiels Kunststoffe, Keramik oder Beton.

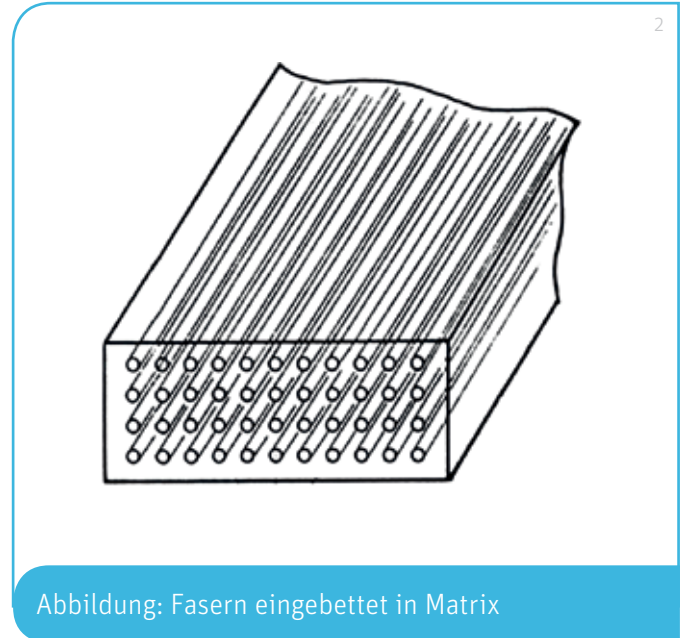
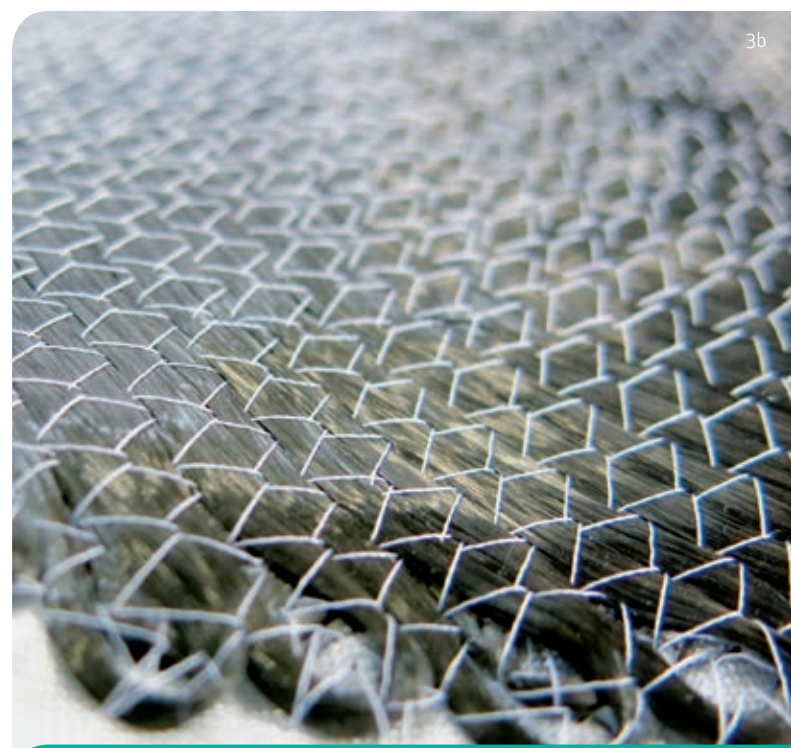


Abbildung: Fasern eingebettet in Matrix



Glasfasern



Kohlenstofffasern

2.1 ANWENDUNGSGEBIETE VON FASERVERBUNDBAUTEILEN

Faserverbundwerkstoffe werden genutzt, weil die positiven Eigenschaften von beiden Materialien kombiniert werden können. Zum Beispiel die hohe Festigkeit der Fasern und die chemische Beständigkeit eines Kunst-

stoffes. Wegen dieser und weiterer Vorteile findet der Werkstoff in vielen Bereichen immer mehr Verwendung. Faserverbundbauteile werden in vielen verschiedenen Sparten eingesetzt.



Luft- und Raumfahrt – Beispiel für Bauteil aus CFK: Rumpfschale des Airbus A350 XWB



Boots- und Yachtbau – Beispiel für Bauteil aus CFK: Rumpf, Mast



Automobilbau, Motorsport – Beispiel für Bauteil aus CFK: Monocoque, Fahrgastzelle, Spoiler/Anbauteile



Schienefahrzeuge – Beispiel für Bauteil aus CFK: Triebwagen-Kupplung, Zugarfang/-ende (Zugnasen), Fußboden



Windkraftanlagen – Beispiel für Bauteil aus GFK: Rotorblätter



Freizeit/Sport – Beispiel für Bauteil aus CFK: Fahrräder, Skistöcke, Snowboards, Surfbretter

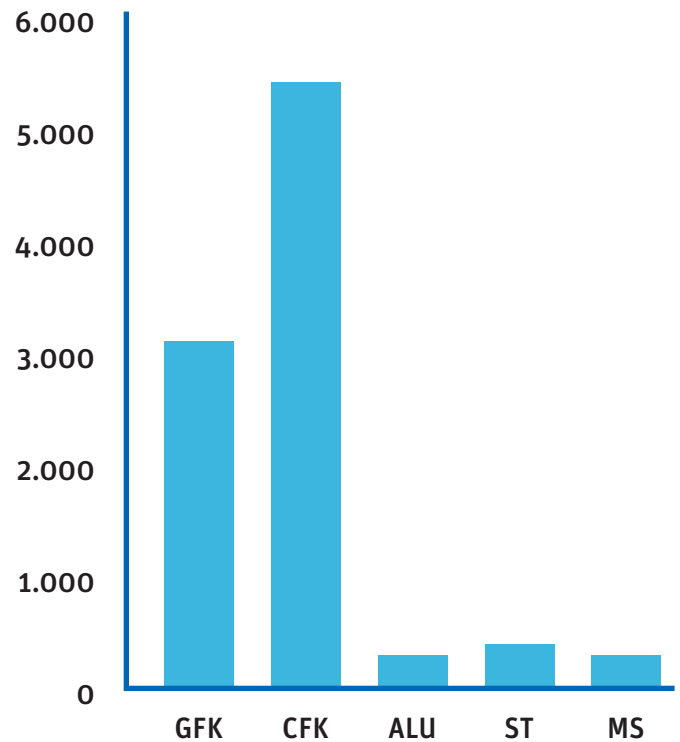
2.2 EIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN

Die Verstärkungsfasern mit ihren jeweiligen Eigenschaften und das dazu gewählte Matrixmaterial bilden den Faserverbundwerkstoff.

Allgemein kann man sagen, dass Faserverbundstoffe (GFK/CFK) folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Zug- und Biegefestigkeit
- geringes spezifisches Gewicht
- chemische Beständigkeit
- Temperaturbeständigkeit
- hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte
- freie Formgestaltung
- ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit
- hohes spezifisches Energieaufnahmevermögen
- Röntgenstrahltransparenz

Zugfestigkeit in N/mm²

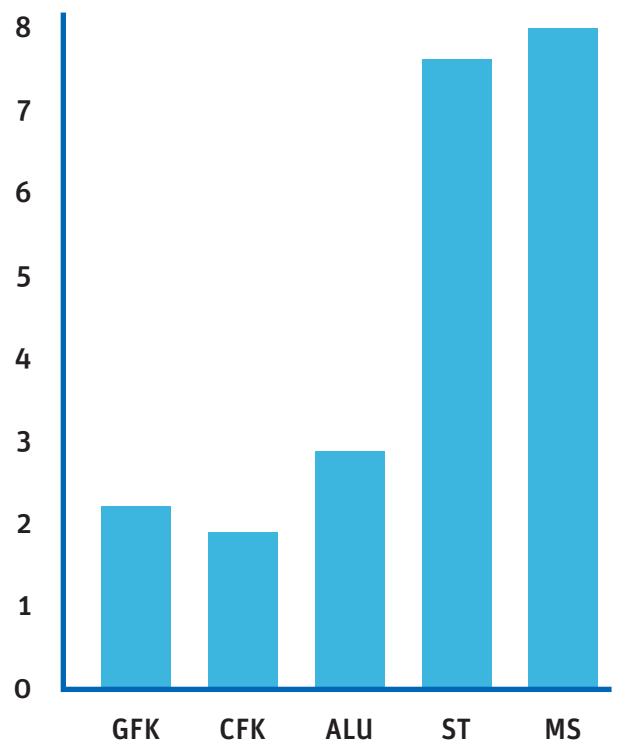


(Universität Augsburg/IHK Bildungshaus Schwaben)

FESTIGKEITS- WERTE	Zugfestigkeit in N/mm ²	Dichte in g/cm ³ (Gewicht pro Volumeneinheit)
Glasfaser GFK	3400	2,6
Kohlenstoff- faser CFK	5600	1,8
Aluminium ALU	400	2,7
Stahl ST	600	7,85
Messing MS	460	8

(Universität Augsburg/IHK Bildungshaus Schwaben)

Dichte in g/cm³



(Universität Augsburg/IHK Bildungshaus Schwaben)

2.3 FASERN

Die Verstärkungsfasern eines Faserverbands beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften eines Verbundbauteils.

Es gibt verschiedene Arten von Fasern:

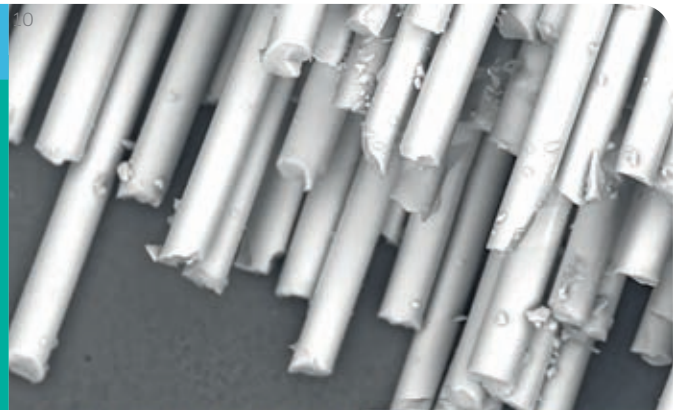
- **Glasfasern**
- **Kohlenstofffasern (Carbon)**
- **Aramidfasern (z.B. Kevlar)**
- **Keramikfasern**
- **Polymerfasern (Polyester, Nylon)**
- **Mineralfasern (Basalt)**
- **Naturfasern (Flachs)**

Da sich für einen Einsatz in der Schule nur der Gebrauch von Glasfasern empfiehlt (siehe Punkt 6.4 Arbeitsschutz), werden im Folgenden nur Glasfasern und Kohlenstofffasern (dazu im Vergleich) näher betrachtet.

Glasfasern

Glasfasern sind lange, dünne Fasern, die aus Glas bestehen. Zur Herstellung von Glasfasern zieht man geschmolzenes Glas zu dünnen Fäden. Das an sich spröde Glas besitzt, zu einem dünnen Faden ausgezogen, eine hohe Flexibilität. Außerdem tritt ein erheblicher Festigkeitszuwachs ein.

(Henning/Moeller: Handbuch Leichtbau, 2011)

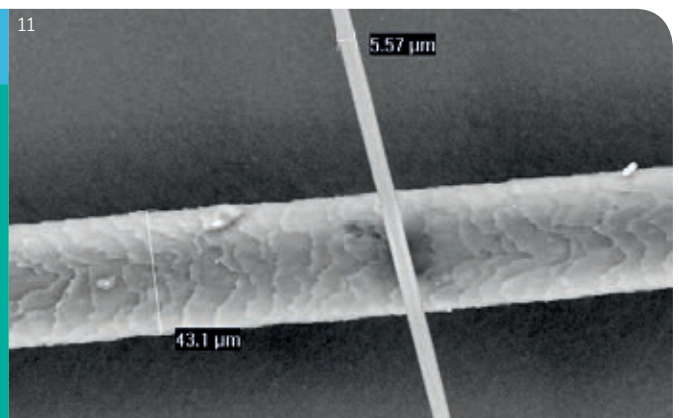


Glasfasern

Kohlenstofffasern

Auch Carbonfasern genannt (engl.: carbon fibre), sind industriell hergestellte Fasern. Eine Kohlenstofffaser hat einen Durchmesser von etwa 5-8 μm . Üblicherweise werden 1.000 bis 24.000 Einzelfasern (Filamente) zu einem Bündel (Roving) zusammengefasst. Diese Rovings werden auf Spulen gewickelt und unter anderem auf Webmaschinen zu textilen Strukturen weiterverarbeitet.

(Henning/Moeller: Handbuch Leichtbau, 2011)



Kohlenstoff-Faser im Vergleich zu einem Menschenhaar.

2.4 FASERHERSTELLUNG

2.4.1 Glasfaserherstellung

Glasfasern werden aus Glas (Quarz mit hohem Siliziumoxidanteil) hergestellt. Das Glas wird bei hohen Temperaturen von über 1800 °C geschmolzen und durch die Bohrdüsen einer Platte (Lochplatte) durchgedrückt. Daraus entstehen feine Filamente von etwa 24 µm Durchmesser. Einzelfilamente werden zu einem Roving zusammengeführt und auf Spulen für die Weiterverarbeitung gewickelt.

Es gibt unterschiedliche Arten von Glasfasern. Je nach gewünschter Eigenschaft unterscheiden sich diese untereinander in der Zusammensetzung. Der Grundanteil in allen ist Siliziumdioxid. Es kommen aber weitere Oxide, wie beispielsweise Eisen-, Boron-, Kalzium-, Natrium-, Aluminiumoxid, etc. in diversen Mengen hinzu. ¹

2.4.2 Kohlenstofffaserherstellung

Kohlenstofffasern werden aus organischen Ausgangsmaterialien mit einem hohen Anteil an Kohlenstoff hergestellt. Ausgangsprodukte sind unter anderem Polyacrylnitril (PAN), Cellulose oder Pechfasern. Der größte Teil der heute gebräuchlichen Hochleistungsfasern wird aus PAN gefertigt. Aus diesem Grund bildet dieses Herstellungsverfahren auch den Schwerpunkt der folgenden Ausführungen. ²

Polymerisation

Kohlenstofffasern werden in zwei Schritten gefertigt. Der erste Schritt ist die Polymerisation. Bei dieser wird aus einem kleinen Molekül, dem Monomer, durch Reaktion ein ketten- oder netzartiges Makromolekül, das Polymer. Das hier verwendete Monomer ist das farblose und flüssige Acrylnitril. Das bei der Polymerisation entstehende kettenartige Polymer heißt Polyacrylnitril (PAN). Nachfolgend wird die Reaktion genauer beschrieben.

Zu Beginn wird das monomere Acrylnitril in einem Lösungsmittel gelöst oder in Wasser emulgiert. Der Lösung oder Emulsion werden ein oder zwei weitere Monomere, wie beispielsweise Itacon- oder Methacrylsäure hinzugefügt. Um die Reaktion einzuleiten, werden zusätzlich sogenannte Initiatoren zugesetzt. Diese starten den Polymerisationsprozess, indem sie Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbin-

dungen (C=C) aufbrechen. An aufgebrochenen Bindungen lagern sich weitere Acrylnitrilmoleküle an. Dieser Prozess setzt sich fort, bis keine Monomere mehr verfügbar sind. Das entstandene PAN wird in einem weiteren Schritt zu dünnen Fasern verarbeitet. Diese Fasern sind Vorläufer der Carbonfaser. Sie werden als Precursor bezeichnet und für die weitere Verarbeitung gesponnen, gewaschen, getrocknet und verstreckt. Um die PAN-Fasern in Carbonfasern umzuwandeln, müssen diese weitere Wärmebehandlungen durchlaufen -> die Carbonisierung. ³

Carbonisierung

Der Prozess, der als eigentliche Carbonfaserherstellung verstanden wird, beinhaltet zwei bis drei Einzelschritte: die Stabilisierung, die Carbonisierung und optional die Graphitisierung.

- Die Stabilisierung der Precursorfasern findet bei 200 bis 300 °C an der Luft statt, um sie für weitere Prozessschritte bei sehr hohen Temperaturen beständig zu machen.
- Die Carbonisierung wird bei 1300 bis 1500 °C unter Schutzgas (Stickstoff) durchgeführt. Hier werden alle nicht Kohlenstoffelemente zersetzt und abgebaut, so dass eine reine Kohlenstoffstruktur zurückbleibt. Nach diesem Schritt ist der PAN-Precursor komplett in eine Carbonfaser umgewandelt.
- Gegebenenfalls kann eine Graphitisierung durchgeführt werden. Dies ist eine nachträgliche Wärmebehandlung, um die Eigenschaften der Carbonfaser weiter zu erhöhen (höhere Steifigkeit und Festigkeit). Dabei wird eine Temperatur oberhalb von 1800 °C verwendet.

Anschließend an diese Prozesse werden die Carbonfasern an der Oberfläche elektrochemisch aktiviert und durch ein Finish (je nach branchenspezifischer Anforderung) für die späteren textiltechnischen Verarbeitungsschritte handhabbar gemacht.

Im industriellen Prozess werden alle Carbonfasertypen nach der Oberflächenaktivierung getrocknet und zur weiteren Verarbeitung mit einer Schlichte (Beschichtung) überzogen. ⁴

¹ (vgl. Chawla, K.K.: Composite Materials: Science and Engineering, 2nd Ed., Springer-Verlag, 1998.)

² (Henning/Moeller: Handbuch Leichtbau, 2011)

^{3/4} (vgl. Jäger/Hauke: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe, 2010.)

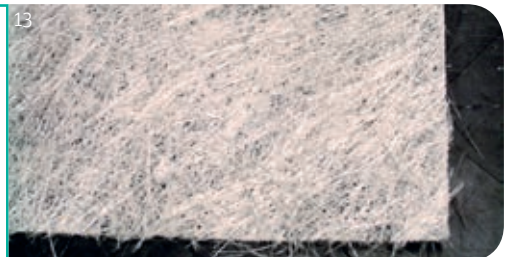
2.5 TEXTILE HALBZEUGE (ROHMATERIAL/VORFORMEN)

Nach dem Carbonfaser-Herstellungsprozess liegen die Fasern in Endlosform vor. Diese können in diversen Längen zugeschnitten werden. Dabei unterscheidet man zwischen Kurzfasern (<3 mm), Langfasern (>3 mm) und Endlosfasern. Zur Weiterverarbeitung werden die einzelnen Fasern nach der Herstellung als sogenannte Halbzeuge vorgeformt. Es gibt verschiedene Arten von Halbzeugen:

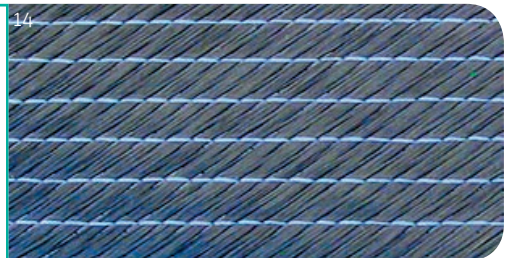
Roving (dt. Faserbündel oder Faserstränge): Rovings sind Bündel von endlosen, unverdrehten, gestreckten Fasern (Filamente). Üblicherweise werden 1.000 bis 24.000 Einzelfasern zu einem Bündel zusammengefasst. Sie werden auf Spulen, die von außen oder innen abgewickelt werden, gewickelt.



Matten/Vliese: Matten und Vliese sind die einfachste Form von Halbzeugen. Sie bestehen aus ungeordneten Lang- oder Kurzfasern.



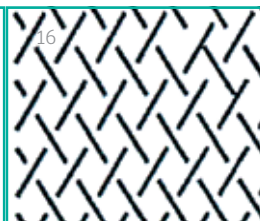
Gelege: Unidirektionale Fasergelege (UD-Gelege genannt) bestehen aus streng parallelen Fasersträngen (Rovings), so dass ein flächiges Textil vorliegt. Die nebeneinander liegenden Fasern werden mit einem Nähfaden fixiert. Durch die unidirektionale, parallele Lage der Fasern lassen sich höhere mechanische Festigkeiten erzielen als mit Geweben.



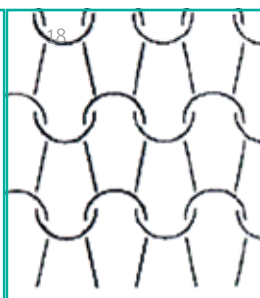
Gewebe: Gewebe sind Textilien, die aus rechtwinklig verkreuzenden Fäden zweier Fadensysteme gebildet werden. Die Fäden in Längsrichtung bezeichnet man als Kette oder Kettfäden. Die Querrfäden heißen Schuss oder Schussfäden. Je nach Webart entstehen verschiedene Halbzeuge. (Siehe Exkurs)



Geflecht: Geflechschläuche als Halbzeuge dienen der Herstellung von rohrförmigen Bauteilen. Sie entstehen, ähnlich wie beim Gewebe, durch zwei sich überkreuzende Faserrichtungen.



Gestricke: Gestricke sind Maschenware, bei denen die Fasern in Form von Maschen in der Textilstruktur liegen. Durch ihre hohe Flexibilität werden Gestricke dort eingesetzt, wo eine hohe Tiefziehfähigkeit oder Drapierbarkeit sowie Stoßdämpfung benötigt wird.



Fasergewebe weisen aufgrund der Webart verschiedene Eigenschaften auf.

Leinwand:

Die einfachste Gewebebindung ist die Leinwandbindung. Durch die gleichmäßige Verkreuzung beider Fadensysteme entstehen zwei identische Warensseiten.

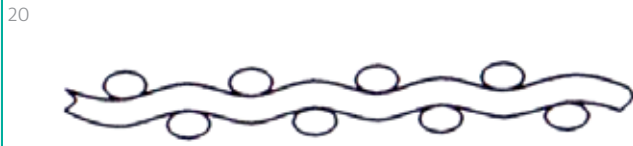


Abbildung Leinwandbindung

Eine häufige Fadenverkreuzung führt zu einer schlechteren Drapierfähigkeit (Verformbarkeit) des Gewebes. Auch führt die häufige Fadenverkreuzung bei einer Leinwandbindung zu vielen Abweichungen der Kett- und Schussfäden von der geraden Garnachse. Die Garne liegen wellenförmig im Gewebe, was die Zug- und Druckfestigkeit im Verbundwerkstoff reduzieren kann.

Leinwandgewebe eignen sich für große, gerade Flächen.

Köper:

Köperbindungen weisen weniger Fadenkreuzungen auf als die Leinwandbindungen, deshalb verfügen sie über eine bessere Drapierbarkeit.

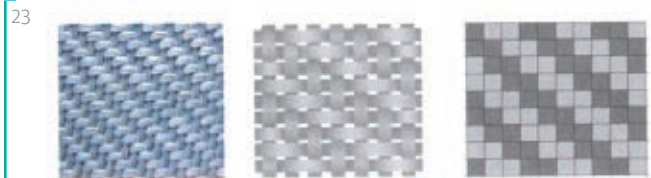


Abbildung: Köperbindung

Gewebe mit Köperbindung zeichnen sich durch eine hohe Anschmiegsamkeit aus.

Zudem weisen sie weniger Fadenverkreuzungen auf und ergeben somit im Laminat höhere Festigkeiten.

Atlas:

Gewebe in Atlasbindung (englisch: satin) weisen noch einmal deutlich weniger Fadenkreuzungen auf als Gewebe in Köperbindung. Das führt zu einer noch mal höheren Drapierfähigkeit.

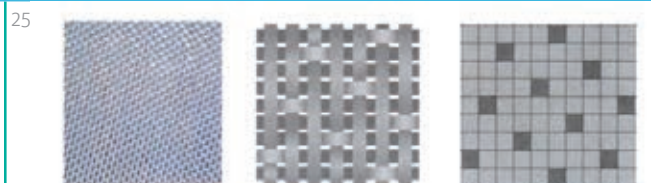
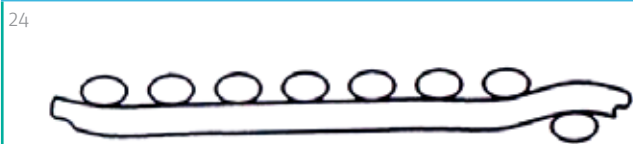


Abbildung: Atlasgewebe

Atlasgewebe kommen dort zum Einsatz, wo aufgrund der komplexen Bauteilgeometrie ein faltenfreies Ablegen von Leinwand- oder Köpergeweben nicht mehr möglich ist.

2.6 FASERORIENTIERUNG

Einfluss der Faserorientierung

Die hohe Zug- und Biegefestigkeit der Faserverbunderzeugnisse ist nur in Faserrichtung gegeben. Das bedeutet, dass die Faserrichtung in die entsprechende Krafrichtung ausgerichtet sein muss.

Lamine aus faserverstärkten Kunststoffen bestehen meist aus mehreren Schichten gleicher oder unterschiedlicher Faserdicke. Diese Schichten liegen je nach Beanspruchung verschieden orientiert aufeinander und bilden so das Laminat.

Liegen in allen Richtungen des Laminates gleiche Faserteile vor, so dass die Eigenschaften in allen Richtungen dieselben sind, spricht man von einem quasiisotropen Laminataufbau. Dadurch sind in alle Richtungen gleich große Kräfte übertragbar.

In der Praxis werden quasiisotrope Lamine durch Kombination von unter $0^\circ/90^\circ$ und $\pm 45^\circ$ verlaufenden Geweben und Gelegen aufgebaut.

Laminataufbau

Ein gutes Faser-/ Harzverhältnis im Laminat liegt bei 60 zu 40 Vol. %.

Das liegt daran, dass einerseits ein hoher Faservolumenanteil, für maximale Lasttragung, angestrebt wird. Andererseits müssen die Fasern auch mit einem Minimum an Binder (Matrix) zusammengehalten werden. Ist nicht jede Faser ausreichend mit dem Matrixsystem benetzt, kann keine Last von der Matrix auf die Faser übertragen werden. Die Fasern liegen dann lose in der Matrix vor und wirken wie Fehlstellen.

Bei Handlaminaten erreicht man durch den beschränkten Druck bei der Verarbeitung maximal einen Faseranteil von 40 Vol. %.

Die Festigkeit und Steifigkeit des Bauteils wird nicht von der Matrix, sondern von der in die Matrix eingebetteten Fasermenge und Faserrichtung bestimmt!

Symmetrie von Laminaten

Wie die Festigkeiten und Steifigkeiten, so sind auch die thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Faserlängs- und Querrichtung der verschiedenen Fasern stark unterschiedlich. Dieser Punkt muss beim Laminataufbau beachtet werden. Die Lagen gleicher Dicke und gleichen Werkstoffes müssen winkelsymmetrisch zur Mittellinie angeordnet werden. Werden diese nicht winkelsymmetrisch angeordnet, verformt sich das Laminat bei sich ändernder Temperatur oder Belastung.

26

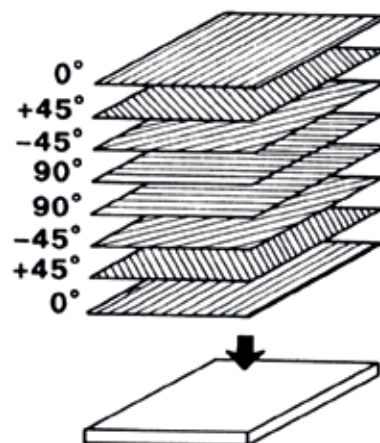


Abbildung: Symmetrischer Laminataufbau

2.7 MATRIX

Die zweite Komponente des Faserverbundes bildet die sogenannte Matrix, in der die Fasern eingebettet und gestützt werden (z.B. Harze, Dispersionskleber/Leim).

Beide Komponenten bilden im Verbund einen besonders leichten und hochbelastbaren Werkstoff.

Funktionen der Matrix:

- **Krafteinleitung sowie Übertragung von Spannungen in die Faser**
- **Fixieren und stützen der Faser**
- **Schutz der Faser vor mechanischen und chemischen Einflüssen**
- **Ideale Benetzung der Faser um hohe Werkstoffeigenschaften zu erzielen**
- **Formgebung von Faserverbundwerkstoffen**
- **Optische Gestaltung von Faserverbundbauteilen durch Einfärbung des Matrixmaterials ¹**

Für die Verwendung in der Schule eignet sich aufgrund der schulischen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten zum Gesundheitsschutz in der Regel nur Dispersionskleber (Weißleim/Holzleim) als Matrix.

Eine Harz-Matrix gehört zur Werkstoffklasse der Kunststoffe. In der Industrie werden zwei Arten von Kunststoffen eingesetzt, Thermoplaste und Duroplaste.



Thermoplaste

Als Thermoplaste bezeichnet man Kunststoffe, die sich durch Erhitzen in einem bestimmten Temperaturbereich weich werden und in fast jede Form verformen lassen. Das Material kann immer wieder erhitzt und neu geformt werden. Die meisten Kunststoffe, die im alltäglichen Leben verwendet werden, sind Thermoplaste (Plastiktüten, Plastikschüsseln etc.). Die Möglichkeit, den Kunststoff immer wieder erhitzen und verformen zu können, kann aber auch ein Nachteil sein, beispielsweise wenn eine Plastikschüssel auf einem heißen Herd steht.

Duroplaste

Duroplaste (auch Duromere genannt) sind in vielen Dingen das Gegenteil von Thermoplasten. Sie schmelzen nicht und werden auch nicht weich, wenn man sie erhitzt. Sie behalten also auch bei hohen Temperaturen ihre Festigkeit und verfügen über eine hohe Wärmeformbeständigkeit. Insgesamt sind sie wesentlich härter und spröder als Thermoplaste.

Carbonfaser-Prepregs

Für die industrielle Fertigung gibt es bereits fertige Faser+Harz-Halbzeuge. Diese werden als Prepreg bezeichnet. Die Kohlenstofffasern werden mit einem noch nicht fertig reagiertem Harzsystem versehen. Dadurch liegt das Prepreg in einer flexiblen Form vor und wird erst bei der Bauteilherstellung, einem weiteren Verarbeitungsschritt, umgeformt und bei hohem Druck und hohen Temperaturen durch die Vollendung der chemischen Reaktion ausgehärtet. Somit müssen bei der Bauteilherstellung die Fasern nicht mehr extra mit einem Harzsystem benetzt oder imprägniert werden. Allerdings müssen die Prepregs sehr kalt (bei ca. -18° C) gelagert und innerhalb eines Monats nach Herstellung verarbeitet werden, um sicher zu stellen, dass die Vernetzungsreaktion noch nicht vorangeschritten und eine optimale Verarbeitung möglich ist. ²

¹ (vgl. Henning/ Moeller: Handbuch Leichtbau, 2011/Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2007)

² (vgl. Ziegmann G., Flemming M., Roth S.: Faserverbundbauweisen: Halbzeuge und Bauweisen, Springer 1996.)

3. HERSTELLUNGSVERFAHREN FASERVERBUNDBAUTEILE

Überblick über die gängigsten Herstellungsverfahren

VERFAHREN	Personalaufwand	Investitionskosten	Automatisierungsgrad	Produktionsrate	Bauteilqualität/ mechanische Eigenschaften	Sonstiges	Anwendungsbeispiele
Hand-laminieren	3	0	0	0	0	offenes Verfahren (gesundheitsgefährdend)	<ul style="list-style-type: none"> • Prototypen und kleine Serien • Schwimmbecken
Vakuum-infusion	3	0	0	0	1	für große Bauteile	<ul style="list-style-type: none"> • Rotorblätter für Windkraftanlagen • Schiffsbau
Pultrusion	0	3	3	3	3	nur für Profile geeignet	Rohre, Leitungen und Profile
Wickeln	0	3	3	1	3	kleine komplexe Strukturen möglich	Druckbehälter
RTM	1	2	2-3	2	2	großserientauglich	<ul style="list-style-type: none"> • Automobilbauteile • Kleine Luftfahrtbauteile
Prepreg/ Autoklav	2	2	1-2	1	3	begrenzte Haltbarkeit von Prepregs	Bauteile für Rennwagen, Luftfahrtbauteile, Reparatur

0: gering 1:mittel 2: hoch 3: sehr hoch

Abbildung: Lengsfeld/Wolff-Fabris/Krämer/Lacalle/Altstädt: Faserverbundwerkstoffe – Prepregs und ihre Verarbeitung, Tabelle 1.2.

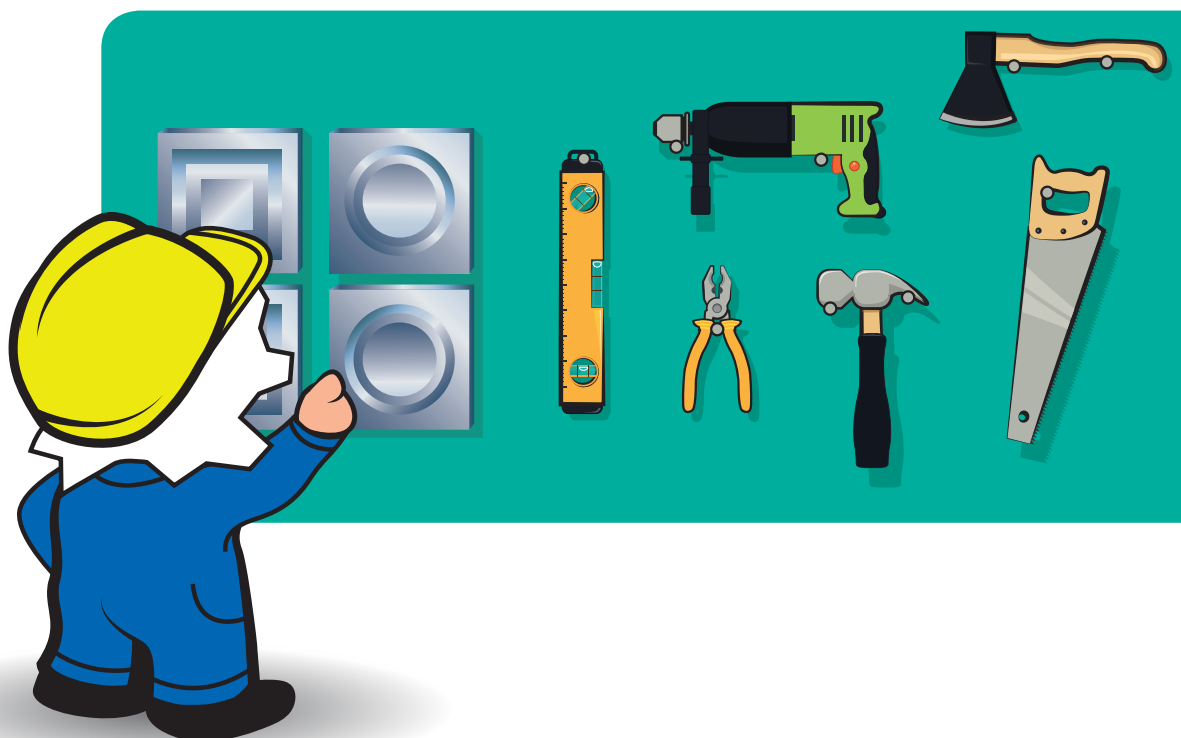
3.1 WERKZEUGE

Im Alltag versteht man unter dem Begriff „Werkzeug“ in der Regel Geräte wie Hammer, Säge etc. Im Zusammenhang mit der Herstellung von Faser-verbundbauteilen hat der Begriff „Werkzeug“ eine andere Bedeutung.

Im Allgemeinen ist ein Werkzeug ein für bestimmte Zwecke geformter Gegenstand, der unmittelbar auf ein mechanisch zu bearbeitendes Werkstück formend einwirkt. Ein Werkzeug ist ein wichtiges Hilfsmittel der Produktion und wird umgangssprachlich oft als Form bezeichnet.

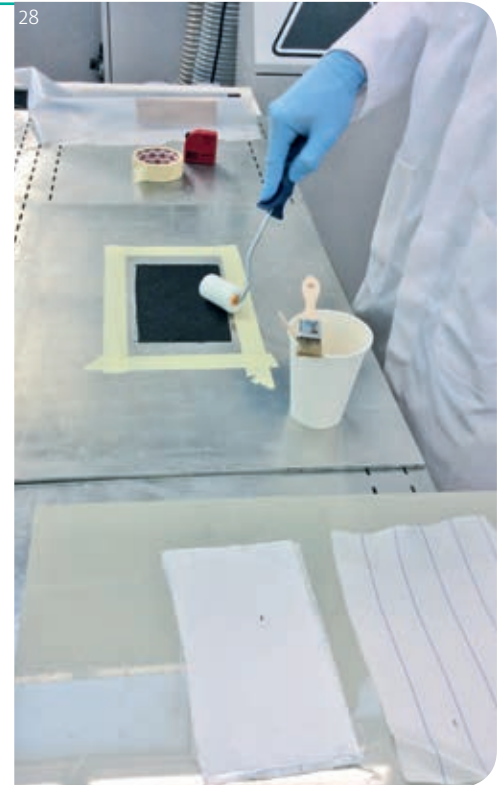
Bei der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen benötigt man Formwerkzeuge. Dies können geschlossene oder halbschalige Werkzeuge, bzw. Kerne für Hohlbauteile sein, welche die Endgeometrie des Bauteils vorgeben. Aufgrund hoher Ansprüche an das Bauteil, z.B. die spezifischen mechanischen Eigenschaften und das Gewicht, sowie komplexe Geometrien, werden an die Werkzeuge erhöhte Anforderungen gestellt.

Für die Nachbearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen werden ebenfalls Werkzeuge benötigt. Besondere Herausforderungen bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen, durch beispielsweise starken Verschleiß der Werkzeuge, durch Faserstäube, durch die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern sowie die gesundheitliche Belastung des Bedieners, führen auch hier zu erhöhten Anforderungen an die Werkzeuge.



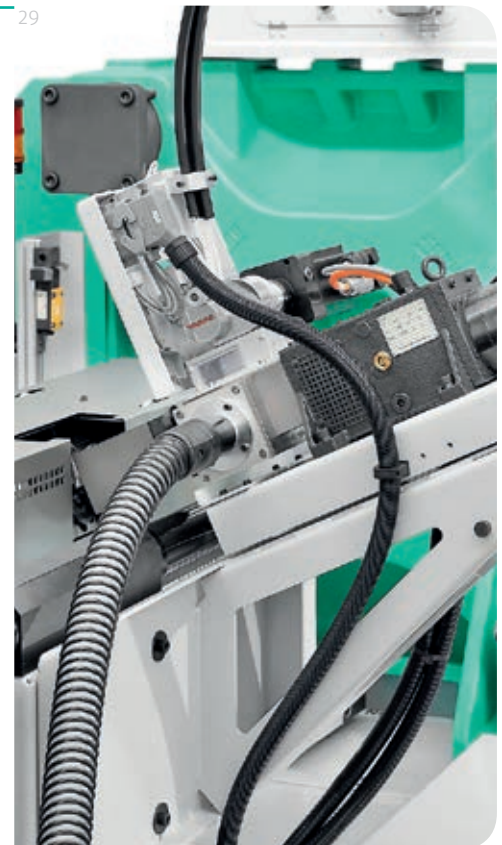
3.2 HANDLAMINIERN

Zu den gängigsten Herstellungsverfahren von Faserverbundbauteilen gehört das Hand- oder Nasslaminieren. Die Halbzeuge, wie zum Beispiel Rovings, Matten oder Gewebe, werden in eine Form oder auf einer Fläche abgelegt und mit Hilfe eines Pinsels oder einer Rolle mit Harz getränkt und angedrückt. Es kommen dabei fast ausschließlich duroplastische Kunststoffe als Matrixwerkstoffe zur Anwendung. Diese liegen anfangs in flüssiger Form vor und ermöglichen auf Grund ihrer geringen Viskosität eine sehr gute Benetzung der Fasern. Faserablage und Benetzung der Fasern mit der flüssigen Matrix erfolgen hier gleichzeitig mit dem Formgebungsverfahren. Es entsteht ein schichtweise aufgebautes Faserverbundbauteil, ein Laminat. Nach anschließender Aushärtung der Matrix können die Bauteile entformt und nachbearbeitet werden. Im Handlaminierverfahren können Bauteile in beinahe beliebiger Größe hergestellt werden. Durch einen geringen Automatisierungsgrad und den hohen Personaleinsatz ist die Reproduzierbarkeit von handlaminierten Bauteilen nur bedingt gegeben. Das Verfahren eignet sich für eine Seriengröße < 1.000 Stück.. (Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)



3.3 FASER-HARZ-SPRITZEN

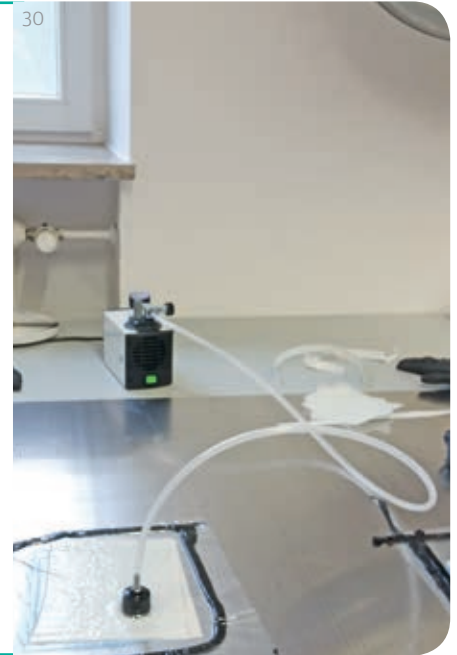
Unter der Bezeichnung „Faser-Harz-Spritzen“ versteht man die teilmechanisierte Form des Handlaminierens. Es ist geeignet für kleine Serien, großflächige Teile und für Beschichtungen. Faser-Harz-Spritz-Geräte spritzen die Werkstoffkomponenten (Harz, Reaktionsmittel, Fasern) auf die Werkzeugoberfläche. In der Regel wird das Harzkomponentengemisch durch eine Spritzpistole einer Dosieranlage gefördert, während die Textilfaserstränge zeitgleich eingezogen und durch ein aufgesetztes Schneidwerk an der Spritzpistole in kurze Faserabschnitte von 20 bis 50 mm geschnitten werden. Durch den Spritzkopf wird sowohl das Harz- bzw. Härter/Beschleuniger-Gemisch als auch die geschnittene Faser mittels Druckluft auf das beschichtete Werkzeug gespritzt. Die Steuerung des Spritzkopfes wird in der Regel von Robotern vorgenommen. So kann eine reproduzierbare Faserverteilung und Dickentoleranz der Bauteile garantiert werden. Durch die unkontrollierte Lage der Rovingschnitze wird das Verfahren nur für Bauteile mit geringen mechanischen Anforderungen verwendet. Durch Zwischenlagen aus Geweben/Gelegen kann die Festigkeit bzw. die Kraftaufnahme in einer definierten Richtung verbessert werden. (Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)



3.4 VAKUUMVERFAHREN

Beim Vakuumverfahren wird das Laminat wie beim Laminierverfahren in einer einseitigen Werkzeugform aufgebaut. Dann deckt man das Laminat mit einer porösen Trennfolie ab, legt darauf ein grobes Sauggewebe (auch Fließhilfe) und dichtet schließlich die Form mit einer Vakuumfolie und einer umlaufenden Dichtung ab. Durch einen Vakuumstutzen wird dann der gesamte Aufbau evakuiert (die Luft abgesaugt). Der Atmosphärendruck bewirkt eine gleichmäßige Verdichtung des Fasermaterials. Durch das anliegende Vakuum erreicht man eine weitgehende Entgasung des Laminates (Befreiung von Sauerstoff und Reaktionsgasen) sowie das Entfernen von Feuchtigkeit. Das überschüssige Harz wird dabei vom eingelegten Sauggewebe oder einer umlaufenden Rinne aufgenommen. Durch Verwendung einer zweiseitigen Form mit umlaufender Vakuumdichtung lassen sich nach diesem Verfahren auch Teile mit beidseitig glatter Oberfläche herstellen.

(Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)



3.5 VAKUUMINFUSION – RESIN-TRANSFER-MOULDING (RTM)

Bei der Vakuuminfusion wird das Harz unter Vakuum in die Fasern injiziert. Zunächst werden die zugeschnittenen trockenen Verstärkungsmaterialien in das Werkzeug eingelegt. Die verwendeten zweiteiligen Werkzeuge bestehen meist aus faserverstärkten oder gefüllten Gießharzen, bei großen Stückzahlen oder geheizten Werkzeugen werden auch leicht gebaute Stahlformen eingesetzt.

Das Matrixmaterial wird, anders als beim Vakuumverfahren, unter Druck (max. 5 bar) in die geschlossene Werkzeugform injiziert. Das zusätzliche Anlegen eines Vakuums unterstützt die Durchtränkung des Fasermaterials und das Entgasen der Harzmasse. Mit diesem Verfahren lassen sich hochwertige Bauteile mit hohem Verstärkungsfaseranteil und sehr geringem Luftblasengehalt gut reproduzierbar herstellen.

(Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)

3.6 PULTRUSION (PULTRUDIEREN = STRANGZIEH-VERFAHREN)

Das Pultrusionsverfahren ist ein Strangziehverfahren zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffprofile in einem kontinuierlichen Ablauf. Bei diesem Verfahren werden trockene Faserrovings und/ oder –halbzeuge durch ein Harzbad gezogen. Dadurch werden die Fasern benetzt und mit Harz getränkt. Danach werden die getränkten Verstärkungsfasern durch ein formgebendes und beheiztes (100 bis 200 °C) Werkzeug gezogen. Durch die Wärmezufuhr im Werkzeug wird die Vernetzung angestoßen. Somit erfolgt während dem Durchzug der Fasern durch das Werkzeug kontinuierlich eine Vernetzung bzw. eine Aushärtung. Im Pultrusionsverfahren können hohe Faservolumenanteile bei gleichzeitig sehr guter Tränkung erreicht werden. Der gesamte Prozess wird durch ein Ziehwerkzeug in Gang gehalten, welches das fertige Profil und somit die Fasern mitsamt dem Harz und dem Verstärkungsmaterial aus dem Härtingwerkzeug herauszieht (daher auch die englische Bezeichnung Pultrusion – to pull = ziehen – to extrude = durchdrücken). Nach einer Abkühlphase kann das Zuschneiden der Profile erfolgen. Die Profilgeometrie der Produkte ist variabel, in Faserlängsrichtung kommt es zu sehr guten mechanischen Eigenschaften wohingegen die Querfestigkeit der Profile gering ist. (Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)

3.7 WICKELN

Die endlosen Glas- oder Kohlenstofffasern werden über eine Wickelmaschine in einem Harz-Bad getränkt und um eine rotierende Form (Dorn) gewickelt. Durch Einstellen der Fadenspannung kann der Harzgehalt des Bauteils bestimmt werden, die Harzfilmdicke nimmt mit zunehmender Fadenspannung ab. Nach dem Wickeln wird der Dorn aus dem Bauteil entzogen.

Das Wickelverfahren eignet sich vor allem zur Herstellung hohler rotationssymmetrischer Bauteile wie Rohre, Wellen, Balken oder Behälter. Bei diesem Verfahren kommen häufig Industrieroboter zum Einsatz. Als Wickelkern bzw. Dorn kann Holz verwendet werden, sowie PVC und Stahl. Wachs als Kernmaterial ist nach dem Wickelprozess durch Temperaturerhöhung entfernbar. Ebenso gibt es mineralische, wasserlösliche Kernmaterialien, welche sich auswaschen lassen. (Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)

3.8 PREPREG/AUTOKLAV

Ein Autoklav ist ein heizbarer Druckkessel, welcher eine exakte und reproduzierbare Steuerung der Temperatur-, Druck- und Vakuumzyklen bei der Aushärtung von Verbundwerkstoffen ermöglicht. Durch die Kombination von Überdruck, Temperatur und zusätzlich ggf. aufgebrachtem Vakuum wird eine besonders effiziente Entgasung und Verdichtung des Laminates erreicht. Der allseitige Druck verhindert größeres Fließen der Matrix, wie es z.B. in Pressen auftritt. Ein großer Vorteil der Autoklavtechnologie ist die Möglichkeit, auch sehr komplexe Strukturen, wie etwa mehrteilige Flugzeugflügel, in einem Verarbeitungsgang zu einer Gesamtstruktur auszuhärten. Für die Herstellung von Formteilen im Press- und im Autoklav-Verfahren werden in den meisten Fällen vorimprägnierte Verstärkungsmaterialien, sog. Prepregs (preimpregnated fibers) verwendet. Prepregs haben den Vorteil, dass der sehr komplexe Tränkungsprozess der Fasern mit dem Matrixharz vom eigentlichen Formvorgang getrennt durchgeführt wird. Zudem besitzt das Material einen hohen Faservolumengehalt und sehr gute mechanische Eigenschaften. (Vgl. Ehrenstein: Faserverbundkunststoffe, 2006)



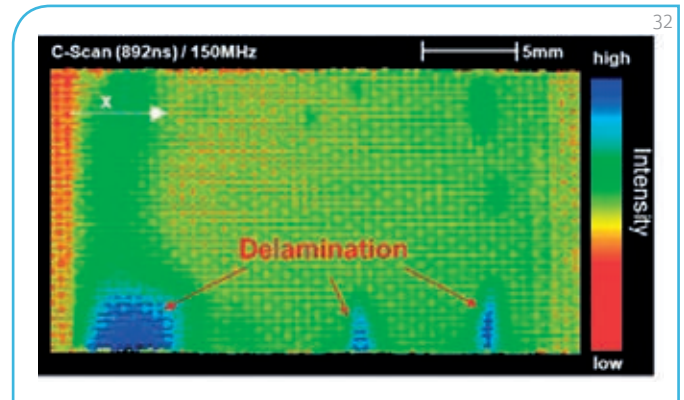
4. FASERVERBUND KONTROVERS

Faserverbundmaterialien und -Werkstoffe sind für viele Anwendungsbereiche und spezielle Fertigungsansprüche der Industrie ein großer Gewinn. Trotzdem ist das Material kein „Wundermaterial“, das gängige Materialien wie beispielsweise Aluminium, Stahl etc. einfach ersetzen oder dauerhaft ablösen kann.

Die Nachteile von Faserverbundwerkstoffen im Vergleich zu anderen Werkstoffen sind unter anderem:

- hoher Materialpreis im Vergleich zu Metall
- hohe Komplexität in der Entwicklung
- hoher Energieaufwand in der Herstellung
- aufwendige Be- und Verarbeitungsprozesse
- unausgeschöpftes Serienfertigungspotential

Ein weiterer Nachteil des Materials ist, dass Verarbeitungsfehler und Materialschäden nur mit aufwändigen technischen Untersuchungen erkennbar werden (z.B. Ultraschallprüfung).



Des Weiteren erfordern Arbeiten mit Faserverbundmaterialien umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen.

Arbeiten mit Kohlenstofffasern und fertigen CFK-Bauteilen erfordern umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen, da gesundheitsgefährdende Gase und Stäube entstehen können. Die Räumlichkeiten, in denen mit Fasermaterialien und Harz gearbeitet wird, müssen mit einem Luft-Absaugesystem ausgestattet sein. Die Kosten für die notwendige Absaugtechnik können hier je nach Raumgröße sehr hoch sein.

Des Weiteren müssen die Arbeiter, die mit Faserverbundmaterialien und Harz arbeiten, eine entsprechende Arbeitsschutzkleidung tragen. Hierzu gehören unter anderem eine Schutzbrille, ein Schutzkittel, Handschuhe und ggf. ein Mundschutz, wenn Schleifarbeiten zu verrichten sind.



Recyclingmöglichkeiten von CFK

Der zunehmende Einsatz von CFK erfordert auf Grund ökonomischer und ökologischer Aspekte sowie gesetzlicher Bestimmungen die Entwicklung einer Recycling-Prozesskette für Carbonfasern. Wichtig hierbei ist, dass Reststoffmengen aus der Produktion und Verarbeitung von CFK, sowie CFK-Strukturen nach Ende ihrer Lebensdauer (Bauteile nach ihrem End-of-Life) berücksichtigt werden.

CFK-Bauteile können durch verschiedene Verfahren recycelt werden. Es ist möglich, die Fasern wieder vom Harz zu trennen, sie können aber auch im Verbund recycelt werden. Die Recyclingmöglichkeiten für CFK können in mechanische, thermische und chemische Verfahren unterteilt werden.

Mechanisches Verfahren

Zu den mechanischen Verfahren zählen beispielsweise das Mahlen oder das Schreddern von unbehandeltem CFK. Beim Mahlen entsteht CFK-Pulver. Es kann dann als Füllstoff in anderen Verbundwerkstoffen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu anderen Verfahren findet bei dieser Vorgehensweise keine Trennung von Faser und Matrix statt. Trockene Fasern (Reststücke aus der Verarbeitung) können beim Schreddern in Fasern unterschiedlicher Längen zerkleinert werden. Die Reste beim Schreddern sind größer als beim Mahlen, es handelt sich um Faserstücke unterschiedlicher Länge. Die Produkte können als Kurzfasermasse oder als Langfaser-Gewebematten, sowie beim Spritzguss wiederverwendet werden.

Thermisches Verfahren

Ein gängiges thermisches Verfahren ist die sogenannte Pyrolyse. Die Verbundwerkstoffe werden bei Temperaturen bis ca. 600°C unter Sauerstoffabschluss behandelt. Dabei wird die Kunststoffmatrix zersetzt und als Pyrolysegas abgetrennt. Dieses Gas kann als Energiequelle genutzt werden. Zurück bleiben die Fasern, welche anschließend einem mechanischen Aufbereitungsverfahren unterzogen werden.

Chemisches Verfahren

Ein übliches chemisches Verfahren ist die sogenannte Solvolyse. Anders als beim thermischen Verfahren wird hier die Matrix chemisch zersetzt und zurück bleibt die Verstärkungsfasern, die nachträglich einem mechanischen Aufbereitungsverfahren unterzogen werden kann.

Der Recyclingprozess bildet in der aktuellen Forschung zu Faserverbundmaterialien einen großen Schwerpunkt. Anzumerken ist, dass die recycelten Fasern ein neues Material darstellen. Sie besitzen unter Umständen nicht mehr die gleichen mechanischen Eigenschaften und müssen anders verarbeitet werden. Beispielsweise können rückgewonnene Fasern zerkleinert werden und für Spritzguss-Bauteile mit geringeren Anforderungen und mechanischen Eigenschaften verwendet werden. Recycelte Fasern stehen für andere Anwendungen zur Verfügung als Primärfasern.



5. BERUFSORIENTIERUNG – ZUKUNFTSCHANCE FASERVERBUND

Faserverbundmaterialien sind aus dem alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Der Markt entwickelt sich stetig weiter, es kommen immer neue Bereiche dazu, in denen das spannende Material zukünftig eine bedeutende Rolle spielen wird. Die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten in der Faserverbundindustrie (speziell im CFK-Bereich) werden auf 13-17% geschätzt. Eine dynamisch wachsende Industrie benötigt natürlich Fachkräfte, die die neue Technologie anwenden und das neue Material verarbeiten können. Im Folgenden sollen exemplarische Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten im Themenfeld Faserverbund vorgestellt werden.

5.1 BERUFSAUSBILDUNG

Im Bereich der technischen Berufsausbildungen gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, sich beruflich mit Faserverbundmaterialien zu beschäftigen. Beispielsweise kann der anerkannte duale Ausbildungsberuf „Verfahrensmechaniker/in für Kunststoff- und Kautschuktechnik – Fachrichtung Faserverbundtechnologie“ erlernt werden. Die Ausbildungsdauer beträgt in der Regel drei Jahre und findet sowohl im Betrieb, wie auch in der Berufsschule statt.

Es gibt weitere Ausbildungsberufe mit Bezug zur Faserverbundtechnologie, wie zum Beispiel Fluggerätmechaniker/in, Leichtflugzeugbauer/in, Laminierer/in, Kunststoffpresser/in, Bootsbauer/in. Mit jeder neuen Branche, die Faserverbundmaterialien einsetzt, entstehen auch neue Arbeitsfelder und Berufsmöglichkeiten.

5.2 WEITERBILDUNGSMÖGLICHKEITEN

Die Faserverbundbranche bietet neben ansprechenden Ausbildungsberufen auch spannende Weiterbildungsmöglichkeiten. So kann zum Beispiel auf eine technische Ausbildung eine Aufstiegsweiterbildung zum/r staatlich geprüften Techniker/in - Kunststofftechnik und Faserverbundtechnologie folgen. Diese kann sowohl Vollzeit als auch berufsbegleitend absolviert werden und endet mit einer staatlichen Prüfung. Mit dem erfolgreichen Abschluss besteht auch die Möglichkeit zur Erlangung der fachgebundenen

Hochschulreife (hierzu erteilen die zuständigen Schulen Informationen).

Des Weiteren ist es möglich, im Anschluss an eine Berufsausbildung eine Weiterbildung zum/r geprüften Industriemeister/in Faserverbundtechnologie zu machen. Diese Aufstiegsweiterbildung ist bundeseinheitlich geregelt und nach erfolgreich abgelegter IHK-Prüfung erhält die/der Teilnehmer/in einen Meisterbrief.

5.3 STUDIENMÖGLICHKEITEN

Es besteht auch die Möglichkeit, ein Studium im Themenbereich Faserverbund aufzunehmen. Diverse Bachelor- und Master-Studiengänge mit Teilbereich oder Schwerpunkt Fa-

serverbund werden an vielen bayrischen Universitäten und Hochschulen angeboten.

6. EINFÜHRUNG FASERVERBUNDWERKSTOFFE IM UNTERRICHT

Faserverbundmaterialien eignen sich für den Einsatz im Unterricht in vielfältiger Art und Weise. Sie können nicht nur theoretisch mit den Schülern erarbeitet werden, sondern mit einfachsten Mitteln auch praktisch erforscht werden. Die Selbsttätigkeit der Schüler kann bei der Gestaltung von Unterrichtseinheiten mit Faserverbundmaterialien in den Vordergrund gestellt werden, da theoretisch vermitteltes Wissen von den Schülern praktisch umgesetzt werden kann. Die Schüler können eventuell aufgetretene Verarbeitungsmängel in eigenständig hergestellten Bauteilen selbst erkennen und die Folgen ableiten. Mit dieser aktivierenden Herangehensweise kann die intrinsische Motivation der Schüler verstärkt werden, sich mit Naturwissenschaften zu beschäftigen.

Die Schüler kennen Faserverbundwerkstoffe oftmals bereits aus dem Alltag, so dass der Transfer des erarbeiteten Wissens auf Alltagsphänomene leicht fällt.

Insgesamt sollte ein Gefühl für die Chancen und Grenzen von Faserverbundmaterialien vermittelt werden. Auf diesem Weg kann einem Hochleistungsmaterial der Zukunft der Weg geebnet werden, sich zu einem Standardmaterial zu etablieren.

6.1 FASERVERBUND IM LEHRPLAN PLUS

Die Lehrpläne der allgemeinbildenden Schulen haben das Thema „Kunststoffe“ und „Carbon“ verschieden intensiv integriert. Es besteht in jeder Schulart die Möglichkeit, das Thema Faserverbund im Unterricht aufzugreifen.

Die folgenden Beschreibungen sollen als Orientierungshilfe dienen.

Mittelschule

Im LehrplanPlus der Mittelschulen gibt es im Fach Natur und Technik der Jahrgangsstufe 9 (M9 und R9) den Lernbereich 2 „Lebensgrundlage Kohlenstoff“. In diesem Themenblock findet sich der Unterpunkt „Kunststoffe“. Die Schüler sollen sich in den Unterrichtssequenzen mit Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren beschäftigen und deren Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten kennenlernen. Weiterhin sollen sie Kunststoff-Steckbriefe (z.B. Polyethylen, Polystyrol) erstellen und Fertigungsverfahren kennenlernen (z.B. Spritzgusstechnik). Ein weiterer Schwerpunkt bildet das Themenfeld „Recycling von Kunst-

stoffen“. Die Schüler sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Werkstoff-, Rohstoff-, Energierecycling kennenlernen. In der Jahrgangsstufe 10 des LehrplanPlus der Mittelschulen gibt es im Fach Natur und Technik (M10) die Lerneinheit „Chemie des Kunststoffs“. In dieser sollen die Schüler Reaktionstypen, die zur Herstellung von Kunststoffen notwendig sind, kennenlernen. Hierzu gehören die Polymerisation, wichtige Polymere (z.B. Polyethylen, Polypropylen); Polykondensation, wichtige Polykondensate (z.B. Polyamide, Polyester) und Produkte (z.B. PET-Flaschen, Kleidung). Auch in der zehnten Klasse sollen sich die Schüler noch einmal mit dem Thema „Möglichkeiten und Grenzen des Kunststoff-Recyclings; Umweltbelastung“ beschäftigen.

Realschule

Im Lehrplan Plus der Realschulen gibt es im Fach Werken den Lernbereich 3 „Arbeiten mit dem Werkstoff Kunststoff“. Die Schüler sollen die Entwicklungsgeschichte von Kunststoffen und die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen kennenlernen, sowie sich mit deren Eigenschaften

beschäftigen. Abgeleitet daraus sollen die Schüler in der Lage sein, die Bedeutung dieser Materialien für die heutige Gesellschaft in nahezu allen Bereichen (z.B. Medizintechnik, Fahrzeugtechnik, Verpackungsindustrie) einzuschätzen und die gewonnenen theoretischen Erkenntnisse selbstständig anhand der Fertigung eines Werkstücks aus Kunststoff/Faserverbund anzuwenden.

In der 10. Jahrgangsstufe gibt es im Fach Werken einen weiteren Themenblock zu Kunststoff/Faserverbund im Lernbereich 2 „Arbeiten mit dem Werkstoff Kunststoff“. Die Schüler sollen spezifische Eigenschaften neuer Kunststoffe/Faserverbundwerkstoffe analysieren, um deren Bedeutung als maßgeschneiderte, sich ständig weiterentwickelnde Werkstoffe beurteilen zu können. Weiterhin sollen sie Kunststoffe anhand ihrer Vorzüge und Nachteile im Vergleich zu alternativen nachhaltigen Werkstoffen (z.B. Holz) bewerten, um diese bei der Herstellung eines Werkstückes oder beim alltäglichen Konsumverhalten bewusst in Betracht zu ziehen.

Außerdem sollen die Schüler selbstständig bei der Herstellung eines individuell gestalteten funktionalen Werkstücks die spezifischen Materialeigenschaften des Kunststoffs/Faserverbundwerkstoffs berücksichtigen und diese in den Gestaltungsprozess mit einbeziehen. Dabei werden die entsprechenden geeigneten Arbeitsverfahren (z.B. thermisches Verformen oder Laminieren) fachgerecht angewandt.

Gymnasium

Im LehrplanPlus der Gymnasien wird das Thema Kunststoffe in der 12. Klasse im Fach Chemie aufgegriffen. Unter Punkt „Synthetische Makromoleküle – Werkstoffe nach Maß“ sollen die Schüler Kunststoffe den Gruppen Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste zuordnen und bewerten. Aufgrund dieser Einteilung sollen die Schüler die Eignung ausgewählter Kunststoffe für verschiedene Einsatzgebiete abwägen können. Weiter sollen sie die Struktur und Eigenschaften der Kunststoffe und deren Schmelzverhalten, Zersetzung, Härte und Elastizität kennenlernen. Ein weiterer Schwerpunkt der Unterrichtseinheit soll auf der Verwendung von Polymeren in Alltag und Technik liegen. Die Schüler sollen sich in diesem Zusammenhang mit Na-

tur- und Kunstfasern (u.a. Wolle, Seide, Baumwolle, Nylon, Polyethylenterephthalat (PET)) und dem Ersatz von klassischen Werkstoffen beschäftigen und Spezialkunststoffe (z.B. Klebstoffe, Carbonfasern, Kunststoffe in der Nanotechnologie) erforschen.

P-Seminare

Das Gymnasium bietet mit dem Format „P-Seminar“, welches zur Studien- und Berufsorientierung dient, viele weitere Anknüpfungspunkte für die Schüler, die Faserverbundbranche sowohl theoretisch, wie auch praktisch kennenzulernen. Schüler können praktisch mit Faserverbundmaterialien experimentieren und selbstständig Werkstücke erstellen. Viele faserverbundverarbeitende Unternehmen in Bayern bieten Betriebsbesichtigungen an. So können die Schüler einen Einblick in die beruflichen Chancen der Faserverbundbranche erhalten.

Projekttag

In allen Schularten ist es möglich, Projekttag für eine theoretische und praktische Auseinandersetzung mit Faserverbundwerkstoffen zu nutzen. In Arbeitsgruppen können sich die Schüler die theoretischen Inhalte selbstständig erarbeiten. Die Praxisteile können je nach gewähltem Faserverbundmaterial in den Werk- oder Chemieräumen der Schulen durchgeführt werden.

6.2 THEORETISCHE EINFÜHRUNG FASERVERBUNDWERKSTOFFE IM UNTERRICHT

Damit Faserverbundmaterialien von Schülern erforscht und richtig eingeordnet werden können, ist es notwendig, den praktischen Unterrichtseinheiten theoretische Einführungen voranzustellen. Das Handbuch bietet hierzu eine

umfassende Grundlage. Des Weiteren gibt es bereits fertige Materialien und Medien, die für den Unterricht genutzt werden können.

6.3 PRAKTISCHE EINFÜHRUNG FASERVERBUNDWERKSTOFFE IM UNTERRICHT

Damit Schüler die Vor- und Nachteile von Faserverbundwerkstoffen, sowie deren Verarbeitungsweisen richtig einordnen und verstehen können, ist eine praktische Auseinandersetzung mit Faserverbundmaterialien notwendig. In diesem Handbuch finden sich Vorschläge für Werkstücke, die mit Schülern gefertigt werden können. Um die Eigenschaften von Faserverbundmaterialien und Bauteilen mit Schülern praktisch zu erkunden, gibt es auch Experimente, die ohne großen Materialaufwand durchgeführt werden können.

Zum Beispiel können Fasern gut unter gängigen Mikroskopen betrachtet werden. Spannend ist ein Vergleich mit einem menschlichem Haar. Glas- und Naturfasern können in jedem Baumarkt günstig erworben werden. Carbonfasern oder Carbonfasermatten sind über Bezugsadressen für z.B. Modellbauer auch in kleinen Mengen beziehbar. Wenn einzelne Fasern betrachtet werden sollen, bietet es sich an, diese in Petrischalen zu präparieren.



Leichtbau ist ein Schlüsselfaktor für die Gesellschaft und Industrie von morgen. Die Einsparung von Gewicht, Material und Energie ist angesichts einer stetig wachsenden Weltbevölkerung sowie schwindender Ressourcen eine Grundvoraussetzung für eine zukunftsfähige intakte Welt. Leichtbau kommt mittlerweile branchenübergreifend zur Anwendung. Er umfasst alle Stufen im Produktlebenszyklus: vom Produktkonzept über Konstruktionsweisen bis hin zu neuen Werkstoffen.

Der Leichtbau kann überdies sich widersprechende Anforderungen erfüllen: hohe Stabilität trotz geringem Materialeinsatz durch möglichst leichte aber auch stabile und sichere Bauteile, Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei Automobilen und dennoch höhere Fahrzeugsicherheit. Das Ziel des Leichtbaus liegt also nicht nur in einzelnen Faktoren wie der Gewichtsreduzierung, sondern im Gesamtoptimum – technologisch, ökonomisch und ökologisch. Beim Leichtbau kommen nicht nur leichte und stabile Materialien zum Einsatz, sondern auch spezielle Leichtbauweisen.

Sandwichbauweise

Im Zusammenhang mit Faserverbundbauteilen wird man immer wieder den Begriff „Sandwichbauweise“ lesen. Dabei werden hochsteife Deckschichten (Lamine) mit schubfesten, aber wenig steifen Kernmaterialien verbunden. Somit kann der meist teurere Hochleistungswerkstoff (beispielsweise Laminat aus Kohlenstofffasern und Harz) in nur geringem Anteil im Bauteil eingesetzt werden und

dieses profitiert trotzdem von den hervorragenden Eigenschaften der Faserverbundbauteile. Die Sandwichbauweise wird immer dann eingesetzt, wenn eine Erhöhung der Biegesteifigkeit und Torsionssteifigkeit bei möglichst geringem Gewicht erzielt werden soll. Gängige Einsatzbereiche sind der Flugzeugbau, sowie der Fahrzeugbau. Beispielsweise werden die Fußböden von ICE- Zügen in dieser Fertigungsweise hergestellt. Für den Fahrgast sind diese nicht sichtbar, da sie in der Regel mit Teppichen und Schutzkanten versehen sind.

Hochsteife Deckschicht (CFK-Laminat aus Fasern und Harz):

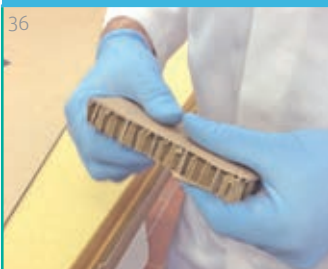


34 Untersuchung auf Biegesteifigkeit

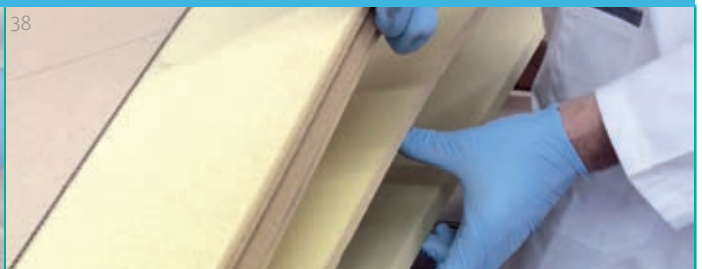


35 Untersuchung auf Torsionssteifigkeit

Schubfeste Kernmaterialien:



36
37
Falt- oder Wabenstrukturen
(finden sich auch in einfachen Paketkartons)



38
Schaumkern

Aufbau eines Sandwichs:



Laminat wird mit Harz versehen und mit dem Kernmaterial verklebt.



Auf das Kernmaterial wird Harz aufgebracht und das zweite Laminat damit verbunden.

Schülerexperiment: Ein Sandwich mit Schülern bauen

Um Schülern den Einsatz der Sandwichbauweise zu demonstrieren, kann man entweder bereits „fertige“ Sandwichmaterialien, wie sie sich zum Beispiel in jedem Versandkarton befinden, als Anschauungsmaterial verwenden, oder die Schüler selbst ein Sandwich bauen lassen. Den Begriff „Sandwich“ können sich die Schüler leicht merken, wenn man ihn mit dem im Alltag bekannten Begriff Sandwich (zwei Brotscheiben/Brötchenhälften mit Belag dazwischen) erklärt. Ein Faserverbund-Sandwich ist gleich aufgebaut - zwei Lagen mit einem Kern dazwischen.

Hierzu erhalten die Schüler beispielsweise drei Blätter Papier und Kleber mit dem Auftrag, ein möglichst stabiles Sandwich zu bauen.

Ein gängiges DIN A4 Blatt Papier wiegt ca. 5 Gramm, die Schüler können sich meistens nur schwer vorstellen, dass drei dieser Blätter stark genug sind, das 40-fache ihres Gewichts zu tragen.

Die Schüler dürfen kreativ arbeiten. Der Kern kann mit einer Falttechnik gebaut werden, es können Papierrollen als Kern zum Einsatz kommen etc. Die Sandwich-Aufbauten der

Schüler können dann zwischen zwei Stühlen (je nach Größe) oder in einen einfachen Holzaufbau (siehe Abb.) gelegt und mit Gewicht belastet werden. Auf dem Bild sieht man, dass 3 Blätter Papier so verarbeitet werden können, dass sie mindestens einen Liter Flüssigkeit tragen können. Drei Blätter Papier, die einfach nur übereinandergelegt werden würden, könnten diese Last nicht tragen.



6.4 ARBEITSSCHUTZ

Zum Arbeitsschutz gehören alle Maßnahmen, Methoden und Hilfsmittel, die eine Sicherheits- und Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz verhindern sollen. Oberstes Ziel ist die Unfallverhütung und der Schutz der beteiligten Personen.

Aufgrund der in der Schule nur schwer umzusetzenden Maßnahmen zum Gesundheitsschutz bei Arbeiten mit Kohlenstofffasern in Verbindung mit Epoxidharz empfiehlt es sich, für die Umsetzung im Unterricht auf Glasfasern in Verbindung mit Dispersionskleber zurückzugreifen.

Die Art und Weise der Tätigkeiten (Handlaminieren) bei Verwendung von Glasfasern und Dispersionskleber weist einen hohen Grad an Analogie zur Art und Weise der Tätigkeiten bei Verwendung von Kohlefasern und Epoxidharz auf. Hinzu kommt, dass Glasfasern und Dispersionskleber deutlich kostengünstiger in der Anschaffung sind als Kohlenstofffasern und Epoxidharz.

In der industriellen Produktion werden üblicherweise Kohlenstoff- bzw. Glasfasern mit unterschiedlichen Harzsystemen als Matrix verwendet. Mit Dispersionskleber lassen sich hierfür keine ausreichenden Festigkeits- und Steifigkeitswerte erzielen. Für einen anschaulichen Zugang zum Thema Faserverbundstoffe in der Schule sind die Materialien Glasfasern und Dispersionskleber aber durchaus geeignet.

Vor Aufnahme der Tätigkeit ist vom Schulleiter bzw. dem Fachlehrer eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Die Gefährdungsbeurteilung schließt die Festlegung der erforderlichen Schutzmaßnahmen ein. Das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung muss dokumentiert werden. Die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen muss überprüft werden.

Bei der Gefährdungsbeurteilung sind insbesondere folgende Gefährdungsarten zu berücksichtigen:

- Mechanische z.B.: Schneiden, Sägen, etc.
- Chemische z.B.: Gefährdungen durch Klebstoffe, Holzstaub, etc.

Dies macht Maßnahmen technischer, organisatorischer und verhaltensbedingter Art zur Sicherheit und zum Gesundheitsschutz bei der Umsetzung der Unterrichtsinhalte unverzichtbar.

Die Sicherheitsdatenblätter der verschiedenen Materialien können bei den Herstellern angefordert werden. Bei Sägearbeiten sind die Tätigkeitsbeschränkungen für Schüler an Maschinen und Geräten nach GUV SI 8070, I-4.3.2 sind zu beachten.

Schule:		Fachlehrer:	
Tätigkeit: Herstellung Beachballschläger aus Glasfasern			
Versuchsbeschreibung: Siehe Lehrerhandbuch „Faserverbundstoffe“.			
Ausgangsstoffe: Glasfasermatte (Sicherheitsdatenblatt liegt bei); Hautreizung durch Glasfasern ist möglich! Holzleim (zB. Produkt XY; Sicherheitsdatenblatt liegt bei) Sperholzplatte (Material: XY; keine Hartholzer)			
Substitution? Die verwendeten Produkte sind ungefährlich und enthalten keine Gefahrstoffe! Bei der Bearbeitung werden keine Gefahrstoffe freigesetzt.			
Gefahren:			
Reizung bei Hautkontakt:	x	Beurteilung:	gering
Freisetzung von Stäuben:	x	Beurteilung:	gering
Gefährliche Dämpfe:	x	Beurteilung:	gering durch Produktauswahl
Gefährdung durch Sägearbeiten:	x	Beurteilung:	nach bei Bandsäge
Sonstige Gefahren: _____			
Schutzmaßnahmen:			
X		X	X
			Weitere Maßnahmen: Langärmelige Kleidung; Hände waschen nach Beendigung der Tätigkeit; Arbeiten an der Bandsäge nur durch Lehrer möglich.
Datum:		Unterschrift:	

Mustervorlage zur Gefährdungsbeurteilung

Grundsätzliche Vorgehensweise zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung für diesen Prozess:

- Sicherheitsdatenblätter der verwendeten Stoffe (Kleber, Glasfaser) organisieren
- Bei Einhaltung der Randbedingungen (keine formaldehyd- oder lösungsmittelhaltigen Kleber) entsteht keine erhöhte Gesundheitsgefährdung durch Ausgangsstoffe
- Beurteilung der Gefährdungen durch weitere Tätigkeiten (Sägen, Schleifen etc.) durchführen
- Festlegen der Schutzmaßnahmen: Unterweisung der Schüler; Betriebsanweisung/Werkraumordnung (enthält Verhaltensregeln, Erste Hilfe, Notruf, Hygienemaßnahmen); Lüften des Raumes; Saugen mit Staubsauger mit Feinstaubfilter; Sicherstellen von Erste-Hilfe Maßnahmen (Verbandskasten, Notruf); Festlegen, welche Tätigkeiten Schüler durchführen dürfen
- Dokumentation

HINWEISE ZUM GESUNDHEITSSCHUTZ FÜR DEN SCHULBETRIEB

Hygiene im Arbeitsraum

Allgemeine Hinweise zum Hautschutz beim Umgang mit Werkstoffen:

- Nach dem Arbeitsende und vor der Benutzung der Toilette sind die Hände gründlich zu reinigen.
- Zum Abtrocknen der Hände sind nur Einweghandtücher zu verwenden.
- Keine Lösungsmittel (Aceton oder ähnliches) zur Reinigung von Händen verwenden. Diese lassen die Haut austrocknen und verspröden.

Der Arbeitsraum ist stets sauber und ordentlich zu halten. Nach dem Unterrichtsende sollte ausreichend gelüftet werden.

Gesundheits- und Arbeitsschutz bei Verarbeitung von Glasfaser/Dispersionkleber

Die Verarbeitung (Zuschneiden und Verkleben) von Glasfasern und Dispersionkleber ist grundsätzlich nicht gesundheitsschädlich.

Beim Zuschneiden von Glasfasern entstehen keine lungengängigen Stäube und beim Anmischen von Dispersionkleber/Leim mit Wasser oder Acrylfarbe entstehen üblicherweise keine gesundheitsgefährdenden Dämpfe.

Beim Arbeiten mit trockenen Glasfasermatten, empfiehlt es sich dringend, Einweg-/Gummihandschuhe zu tragen, um eventuelle Hautreizungen zu vermeiden.

- Einweghandschuhe öfters wechseln.
- Keine beschädigten Handschuhe tragen.
- Handschuhe niemals über schmutzige oder feuchte Hände ziehen.

Keine Handschuhe verwenden, die innen verunreinigt sind. Beim Bearbeiten von **ausgehärteten** Bauteilen ist darauf zu achten, dass die anfallenden Stäube bei Säge- und Schleifarbeiten nicht über längere Zeit eingeatmet werden.

ACHTUNG!

Beim Sägen und Schleifen des gehärteten Verbundes aus Glasfasern und Dispersionkleber entstehen gesundheitsgefährdende Feinstäube!

Die anfallenden Stäube sind umgehend mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter (Staubklasse M oder H) aufzusaugen, um eine Gefährdung der nachfolgenden Klassen im Arbeitsraum zu vermeiden!



Staubsauger mit Feinstaubfilter



Schutzbrille

7. BEISPIELE FÜR DEN WERKUNTERRICHT

(ERKLÄRUNG DER BEISPIELE ALS ANREGUNG)

7.1 BEACHBALL-SCHLÄGER



Überblick Arbeitsschritte:

- Sperrholzplatte aussägen
- Glasfasern zuschneiden
- Arbeitsplatz vorbereiten
- Laminieren (= Glasfaserlagen schichten und mit Kleber tränken)
- Pressen
- Bearbeiten
- Säubern des Arbeitsplatzes

Benötigte Materialien

Für einen Schläger werden folgende Materialien benötigt:

Ausstattung Werkraum:

In der Regel ist die Ausstattung der Werkräume in den Schulen ausreichend.

- Staubsauger mit Feinstaubfilter (Industriestaubsauger der Staubklasse M oder H nach DIN EN 60335-2-69)

Verbrauchsmaterial:

- Sperrholzplatte, Stärke: ca. 3 mm, Größe: ca. 30x40 cm
- Glasfasergewebe: Stärke: 160-280 g/m²; Größe: ca. 1 m²; Webart: Leinwand oder Köper
- 2x Plastik- bzw. Kunststoffolie (PE-Folie, großer Müllsack; keine Frischhaltefolie!): Größe: ca. 40x60 cm
- Formaldehydfreier Dispersionskleber (Weißbleim/Holzleim): ca. 150 g
- Evtl. Acrylfarbe (zum Einfärben des Klebers) nach Bedarf

Hilfsmittel:

- 2x stabiles Holzbrett (als Laminierunterlage): beschichtet (glatte Oberfläche!); Stärke: ca. 15-20 mm; Größe: 40x60 cm
- Dünnes Brett mit glatter Oberfläche (z.B. beschichtetes Holzbrett, beschichtete Spanplatte, Kunststoffplatte, Blech): Größe: ca. 30x40 cm
- Mischbecher aus Kunststoff oder Pappe
- Klebeband
- Filzstifte

Werkzeuge:

- Pinsel
- Schere (gute Haushaltsschere oder Schere mit Mikroverzahnung)
- Stich- oder Bandsäge, feines Sägeblatt
- Schleifpapier, Körnung 120

Persönliche Schutzausrüstung:

- Evtl. Latex- oder Baumwollhandschuhe
- Langärmeliger Arbeitskittel
- Schutzbrille

Bezugsadressen:

Faserverbundwerkstoffe (z.B. Glasfasern), Materialien zur Verarbeitung, Materialien zum Gesundheitsschutz:

Göbl & Pfaff GmbH · www.goessl-pfaff.de (Online-Shop oder Katalogbestellung)

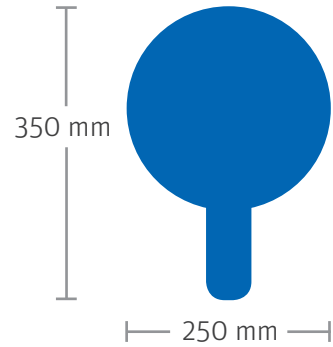
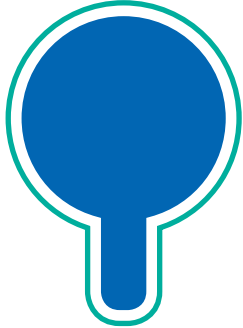
R & G Faserverbundwerkstoffe GmbH · www.r-g.de (Online-Shop)

Baumärkte · Handel für Künstler- und Bastelbedarf · Modellbau-Fachhandel

ARBEITSSCHRITTE

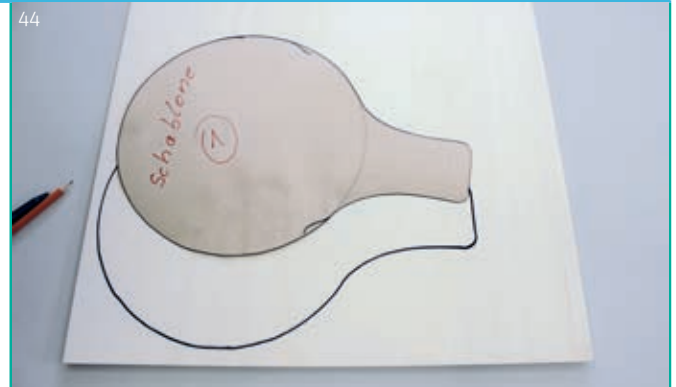
Sperrholzplatte aussägen

1. Drei Papierschablonen in Schlägerform vorzeichnen und ausschneiden.



- Schablone 1 = Originalgröße + 2 cm Rand (für Sperrholz- und Faserzuschnitt)
- Schablone 2 = Originalgröße

2. Schlägerform nach Schablone 1 auf eine 3mm Sperrholzplatte aufzeichnen.



3. Zeichnung mit Stich- oder Bandsäge aus Sperrholzplatte heraussägen.



- Die Tätigkeitsbeschränkungen für Schüler an Maschinen und Geräten nach GUV SI 8070, I-4.3.2 sind zu beachten. Arbeiten an der Bandsäge dürfen nur von Lehrkräften ausgeführt werden. Arbeiten an der Stichsäge dürfen ab der Jahrgangsstufe 7 auch teilselbständig durch die Schüler durchgeführt werden.

4. Kanten säubern (z.B. mit Schleifpapier).

Glasfasern zuschneiden

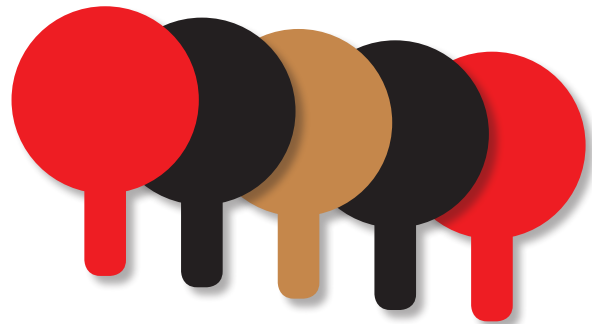
- Pro Schläger werden 4 Faserzuschnitte benötigt.
- Pro Seite des Schlägers jeweils 1 Zuschnitt mit Faserrichtung 90° bzw. 0° (= gerade)
- und 1 Zuschnitt mit Faserrichtung 45° bzw. -45° (= diagonal).

HINWEIS! AUF GESUNDHEITSSCHUTZ ACHTEN!

- Bei Säge- und Schleifarbeiten sind die anfallenden Stäube mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter aufsaugen!
- Herumfliegende Glasfasern sind aufgrund ihrer Größe nicht lungengängig und in der Regel daher nicht gesundheitsschädlich!

Dennoch empfiehlt sich das Tragen von Kleidung mit langen Ärmeln. Bei direktem Kontakt der Glasfasern auf der Haut kann es zu Juckreiz kommen. Es empfiehlt sich deshalb das Tragen von Schutzhandschuhen.

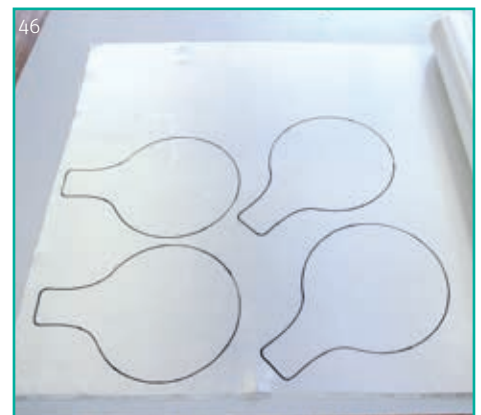
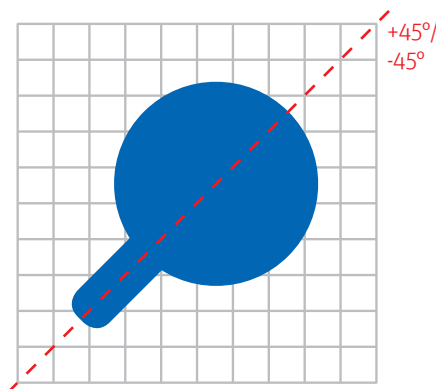
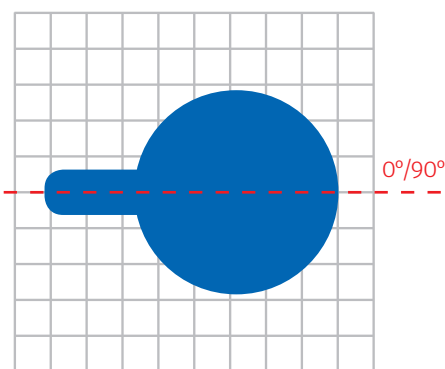
1. Laminataufbau



■ Sperrholzplatte ■ Glasfasergewebe $45^\circ/-45^\circ$ = diagonal ■ Glasfasergewebe $90^\circ/0^\circ$ = gerade/längs

2. vorzeichnen und ausschneiden

- Glasfasergewebe auf einer sauberen und glatten Unterlage ausbreiten/ausrollen (Leinwand- oder Körpergewebe, $160-280 \text{ g/m}^2$).
- Schlägerform nach Schablone 1 mit einem Filzstift (z.B. Edding®) auf das Glasfasergewebe aufzeichnen.



- **Zweimal** die Schablone 1 **gerade** zur Faserrichtung des Gewebes auf das Glasfasergewebe legen, um Zuschnitte mit Faserrichtung 90° bzw. 0° zu erhalten.
- **Zweimal** die Schablone 1 **diagonal** zur Faserrichtung des Gewebes auf das Glasfasergewebe legen, um Zuschnitte mit Faserrichtung 45° bzw. -45° zu erhalten.
- Die **vier** aufgezeichneten Formen mit einer guten Haushaltschere (besser: Schere mit Mikroverzahnung) ausschneiden.

Arbeitsplatz vorbereiten

- Werkunterlage/Laminierunterlage = stabiles Brett, z.B. beschichtete Spanplatte (glatte Oberfläche!). Größe: ca. 40x60 cm; Stärke: ca. 15-20 mm.
- Handelsübliche Plastikfolie/PE-Folie, z.B. Abdeckfolie aus dem Baumarkt, große Müllsäcke (keine Frischhaltefolie, da zu dünn!).



- **Plastikfolie faltenfrei auf die Laminierunterlage kleben/befestigen** (z.B. mit Tesa®, Kreppband). Die Folie bildet die Trennschicht, damit der Schläger nach dem Laminieren und Trocknen wieder abgelöst werden kann.
- **Dispersionskleber (Weißleim) für jeden Schüler einzeln in Plastik- oder Pappbecher abfüllen; ca. 150 g.**
- **Dispersionskleber mit Wasser verdünnen (ca. 10% Wasser). Gegebenenfalls kann Dispersionskleber zusätzlich auch mit Acrylfarbe eingefärbt werden.**



- Pinsel, Kunststoff- oder Pappbecher mit Kleber (Leim) für jeden Schüler bereitstellen

Laminieren



- Kontur der Schablone 1 auf die Plastikfolie aufzeichnen.



- Fläche gleichmäßig mit Kleber einstreichen.

HINWEIS!

Beim Laminieren auf die Symmetrie der Faserrichtungen des Gewebes achten, da sie sich sonst beim Aushärten verziehen!



- Glasfasergewebe $45^{\circ}/-45^{\circ}$ = diagonal
- Glasfasergewebe $90^{\circ}/0^{\circ}$ = gerade/längs





• **Erste Lage Glasfasergewebe: Glasfaserzuschnitt faltenfrei auf die eingestrichene Fläche auflegen.**

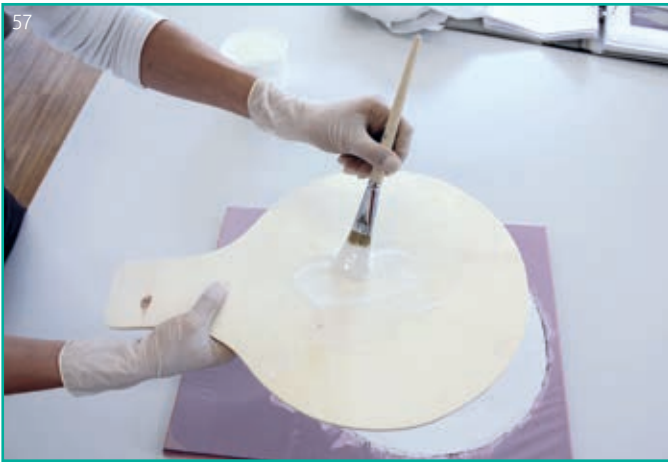
Das Gewebe dazu am besten von einem dünnen und glatten Brett verzugsfrei auf die Fläche herunterschieben. Bei händischem Auflegen können sonst leicht die Fasern verschoben werden.



• **Glasfasergewebe mit einem Pinsel leicht andrücken und in Faserrichtung ausstreichen bis der Kleber von unten durch die Fasern dringt.**

- Die Fasern sollten immer in gestrecktem Zustand bleiben; deshalb immer in Faserrichtung arbeiten!
- Erst wenn die Schicht komplett mit Kleber durchtränkt ist, kann mit der zweiten Lage begonnen werden. Es kann auch etwas Kleber von oben aufgestrichen werden.

- **Zweite Lage Glasfasergewebe:** Glasfaserzuschnitt auf die mit Kleber getränkte erste Glasfaserlage auflegen
Auf Faserrichtung achten! Die zweite Lage muss eine **andere** Faserrichtung aufweisen wie die erste Lage

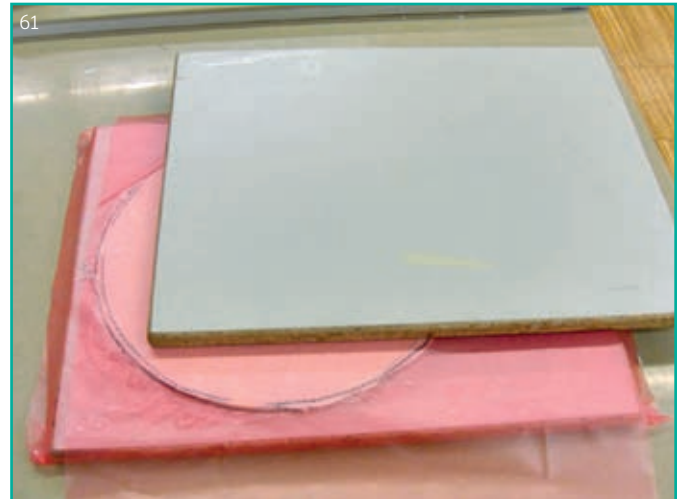


- **Mittellage Sperrholz:** Holzzuschnitt auf beiden Seiten mit Kleber einstreichen und auf die bereits getränkten Glasfaserlagen legen und leicht andrücken.
- **Dritte Lage Glasfasergewebe:** Glasfaserzuschnitt auf den mit Kleber bestrichenen Holzzuschnitt auflegen.
Auf Faserrichtung achten! Die dritte Lage muss die **gleiche** Faserrichtung aufweisen wie die zweite Lage.
- Auch die vierte Lage muss komplett mit Kleber durchtränkt sein. Dazu am besten etwas Kleber von oben aufstreichen.



- **Vierte Lage Glasfasergewebe:** Glasfaserzuschnitt auf die mit Kleber getränkte dritte Glasfaserlage auflegen.
Auf Faserrichtung achten! Die vierte Lage muss die **gleiche** Faserrichtung aufweisen wie die erste Lage!

Pressen

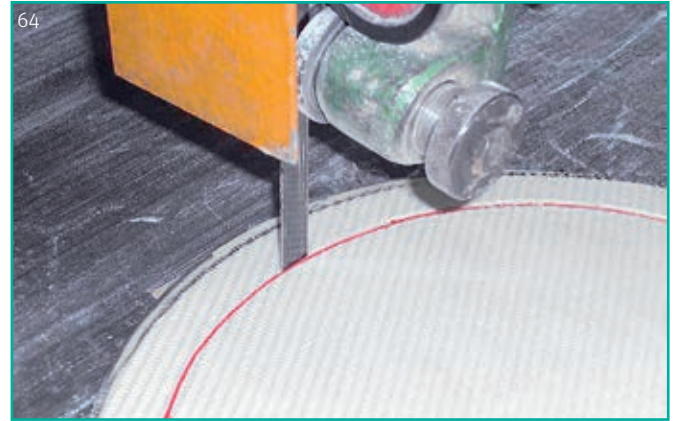
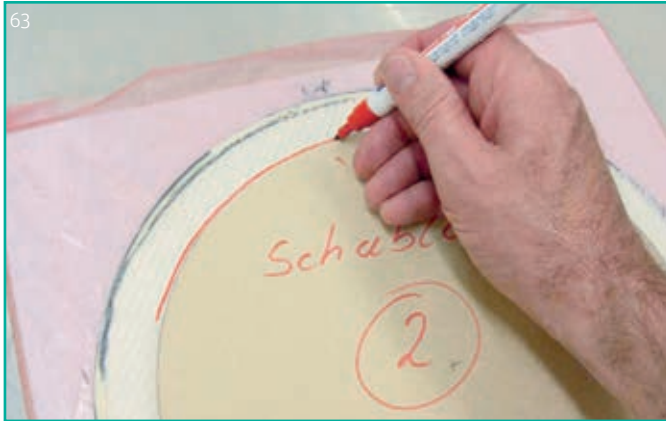


- Eine weitere Laminierunterlage mit Folie bekleben und mit der Folienseite auf die vierte Glasfaserlage legen. Bei der Produktion mehrerer Schläger kann auch jeweils nur die Folie faltenfrei auf die vierte Glasfaserlage aufgelegt werden und die Platten mit den Schlägern können gestapelt werden.



- Die laminierten Schläger in den Laminierunterlagen mit Hilfe von Spindelpressen oder Schraubzwingen pressen.
- Schläger mindestens einen Tag in den Pressen aushärten lassen.
- Schläger aus den Pressen nehmen und die Folien vorsichtig von den Schlägerseiten lösen.
- Schläger anschließend an der Luft komplett aushärten und trocknen lassen (ca. 1-2 Tage).

Bearbeiten



- **Kontur der Schablone 2 auf den ausgehärteten Schläger aufzeichnen.**
- **Schlägerform nach Schablone 2 mit einer Stich- oder Bandsäge aussägen (feines Sägeblatt!)** Die Tätigkeitsbeschränkungen für Schüler an Maschinen und Geräten nach GUV SI 8070, I-4.3.2 sind zu beachten.
 - Arbeiten an der Bandsäge dürfen nur von Lehrkräften ausgeführt werden.
 - Arbeiten an der Stichsäge dürfen ab der Jahrgangsstufe 7 auch teilselbständig durch die Schüler durchgeführt werden.
- **Kanten mit Schleifpapier bearbeiten (Körnung 120)**



- **Holzgriffe in passender Form und Größe aussägen und zurechtschleifen.**
- **Holzgriffe mit Leim bestreichen und auf den Schläger aufkleben.**

Säubern des Arbeitsplatzes

- Pinsel und Laminierunterlagen reinigen.
- Arbeitsplatz säubern.
- Angefallene Stäube mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter aufsaugen.
- Arbeitsraum lüften.

HINWEIS! AUF GESUNDHEITSSCHUTZ ACHTEN!

Alle entstehenden Stäube bei Säge- oder Schleifarbeiten sind grundsätzlich immer mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter (Staubklasse M oder H) aufzusaugen. Dies gilt nicht nur für Glasfaserstaub, sondern auch für Holzstaub, Kunststoffstaub, Acrylglasstaub usw.!

7.2 LAMPENSCHIRM

67



Überblick Arbeitsschritte:

- Glasfasern zuschneiden
- Arbeitsplatz vorbereiten
- Laminieren (= Glasfaserlagen schichten und mit Kleber tränken)
- Kanten bearbeiten
- Säubern des Arbeitsplatzes

Benötigte Materialien

Für einen Lampenschirm werden nachfolgende Materialien benötigt:

Ausstattung Werkraum:

In der Regel ist die Ausstattung der Werkräume in den Schulen ausreichend.

- Staubsauger mit Feinstaubfilter (Industriestaubsauger der Staubklasse M oder H nach DIN EN 60335-2-69)

Verbrauchsmaterial:

- Glasfasergewebe: Stärke: 160-280 g/m²; Größe: ca. 0,5 m² (= 4x DIN A4 Format); Webart: Leinwand oder Köper
- Formaldehydfreier Dispersionskleber (Weißleim/Holzleim): ca. 150 g
- Evtl. Acrylfarbe (zum Einfärben des Klebers) nach Bedarf
- Wand- und Leuchtenhalterung aus Weißblech

Hilfsmittel:

- Arbeitsplatzunterlage
- Kunststoffeimer (für jeden Schüler)
- Mischbecher aus Kunststoff oder Pappe

Werkzeuge:

- Pinsel
- Rollschneider (für Glasfaserzuschnitt) oder gute Haushaltsschere
- Pappschere
- Evtl. Laubsäge
- Schleifpapier, Körnung 120

Persönliche Schutzausrüstung:

- Evtl. Latex- oder Baumwollhandschuhe
- Langärmeliger Arbeitskittel
- Schutzbrille

ARBEITSSCHRITTE

Glasfasern zuschneiden

- Pro Lampenschirm werden 4 Faserzuschnitte benötigt.
- Glasfasergewebe auf einer sauberen und glatten Unterlage ausbreiten/ausrollen
- (Leinwand- oder Körpergewebe, 160-280 g/m²).
- 4x DIN A4-Form mit einem Filzstift (z.B. Ed-ding®) auf das Glasfasergewebe aufzeichnen.
- Aufgezeichnete Formen mit einer guten Haushaltsschere (besser: Schere mit Mikroverzahnung) ausschneiden.

Arbeitsplatz vorbereiten

- Arbeitsunterlage auf Tische (zum Schutz vor Verschmutzung durch Leim)
- Pinsel, Kunststoff- oder Pappbecher mit Kleber (Leim) für jeden Schüler bereitstellen.
- Dispersionskleber (Weißleim) für jeden Schüler einzeln in Plastik- oder Pappbecher abfüllen; ca. 150 g.
- Dispersionskleber mit Wasser verdünnen (ca. 10% Wasser).
- Gegebenenfalls kann Dispersionskleber zusätzlich auch mit Acrylfarbe eingefärbt werden.

Laminieren

- **Innenfläche (DIN A4-Form) des Eimers gleichmäßig mit Kleber einstreichen.**
Wenn die Innenfläche des Eimers eine glatte Struktur hat, ist kein Trennmittel als Zwischenschicht notwendig. Der Leim sollte sich nach dem Trocknen wieder vom Eimer lösen.
- **Erste Lage Glasfasergewebe**
Glasfaserzuschnitt faltenfrei auf die eingestrichene Fläche auflegen.
- **Glasfasergewebe mit einem Pinsel leicht andrücken und in Faserrichtung ausstreichen bis der Kleber von unten durch die Fasern dringt. Es kann auch etwas Kleber von oben aufgestrichen werden.**



Es ist hilfreich, den Eimer am Tisch zu fixieren, damit er beim Laminieren nicht wegrollt.

HINWEIS!

Herumfliegende Glasfasern sind aufgrund ihrer Größe nicht lungengängig und in der Regel daher nicht gesundheitsschädlich! Aber dennoch empfiehlt sich das Tragen von Kleidung mit langen Ärmeln. Bei direktem Kontakt der Glasfasern auf der Haut kann es zu Juckreiz kommen.



Erst wenn die Schicht komplett mit Kleber durchtränkt ist, kann mit der zweiten Lage begonnen werden.



- **Zweite Lage Glasfasergewebe**

- Glasfaserzuschnitt auf die mit Kleber getränkte erste Glasfaserlage auflegen. (Unidirektionaler Lagenaufbau wie beim Beachballschläger)
- Glasfasergewebe mit einem Pinsel leicht andrücken und in Faserrichtung ausstreichen bis der Kleber von unten durch die Fasern dringt. Es kann auch etwas Kleber von oben aufgestrichen werden.

- **Dritte Lage Glasfasergewebe**

- Glasfaserzuschnitt auf den mit Kleber bestrichenen Holzzuschnitt auflegen.
- Glasfasergewebe mit einem Pinsel leicht andrücken und in Faserrichtung ausstreichen bis der Kleber von unten durch die Fasern dringt. Es kann auch etwas Kleber von oben aufgestrichen werden.

- **Vierte Lage Glasfasergewebe**

- Glasfaserzuschnitt auf die mit Kleber getränkte dritte Glasfaserlage auflegen.
- Auch die vierte Lage muss komplett mit Kleber durchtränkt sein. Dazu am besten etwas Kleber von oben aufstreichen.



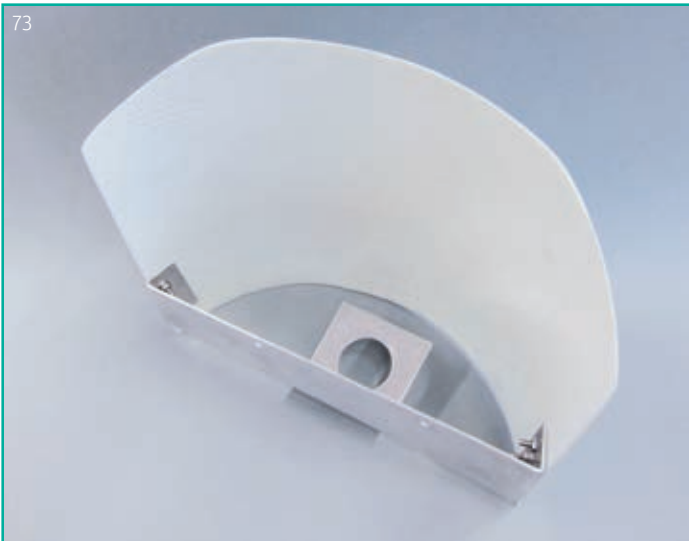
- Aushärten/Trocknen

Lampenschirme mindestens einen Tag aushärten lassen. Das gewölbte Laminat anschließend vorsichtig aus den Eimern lösen. An der Luft komplett aushärten und trocknen lassen (ca. 1-2 Tage).

Bearbeiten



- **Zuschneiden der Kanten.**
 - Gewünschte Form (z.B. abgerundete Kanten) mit einem Stift auf die Innenseite des gewölbten Laminats aufzeichnen.
 - Form mit einer Pappschere oder Laubsäge ausschneiden/-sägen. Die Tätigkeitsbeschränkungen für Schüler an Maschinen und Geräten nach GUV SI 8070, I-4.3.2 sind zu beachten.
- **Kanten mit Schleifpapier bearbeiten (Körnung 120).**
- **Anbringen von Bohrlöchern am Lampenschirm zur Befestigung der Wandhalterung.**
- **Verschrauben der Bauteile**



HINWEIS!

Keine Glühlampen verwenden, da diese sehr heiß werden können! Dispersionskleber ist nicht hitzebeständig. Besser LED-Leuchten verwenden.

HINWEIS! AUF GESUNDHEITSSCHUTZ ACHTEN!

Alle entstehenden Stäube bei Säge- oder Schleifarbeiten sind grundsätzlich immer mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter (Staubklasse M oder H) aufzusaugen. Dies gilt nicht nur für Glasfaserstaub, sondern auch für Holzstaub, Kunststoffstaub, Acrylglasstaub usw.!

Säubern des Arbeitsplatzes

- Arbeitsplatz säubern.
- Angefallene Stäube mit einem Staubsauger mit Feinstaubfilter aufsaugen.
- Arbeitsraum lüften.

8. BEGRIFFE

Anisotropie: Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften, z.B. in Faserrichtung besitzt ein unidirektional verlaufendes Gelege hohe Festigkeiten und Steifigkeiten, quer dazu geringe.

Bidirektional: Hier verlaufen die Fasern in zwei Richtungen, meist im Winkel von $0^\circ/90^\circ$.

Composite: Verbundwerkstoff aus zwei oder mehr verbundenen Materialien.

CFK: Carbonfaserverstärkter Kunststoff (Kohlenstofffaserkunststoff).

Delamination: Versagen eines Verbundes durch Trennung zwischen den Schichten. Mechanische Spaltung oder Verlust der Bindung zwischen benachbarten Schichten oder Fasersträngen.

Faserorientierung: Ausrichtung der Fasern.

Filament: Einzelfaser.

FVW: Faserverbundwerkstoff, besteht aus Matrix und Verstärkungsfasern.

GFK: Glasfaserverstärkter Kunststoff.

Isotropie: Die Eigenschafteskennwerte sind in alle Richtungen gleich, z.B. ein Kurzfaservlies hat in allen Richtungen gleich hohe Festigkeit. Metalle sind durch ihre Kristallgitterstruktur auch isotrope Werkstoffe.

Kurzfaser: Bündel geschnittener Fasern < 3 mm Länge

Langfaser: Bündel geschnittener Fasern > 3 mm Länge

Laminat: flächiges Produkt, welches schichtweise, aus einem Verbund von Matrix und Faser besteht, unabhängig von seiner Form und dem Fertigungszustand (feuchtes Laminat, ausgehärtetes Laminat).

Matrix: Einbettungsmaterial für Verstärkungsfasern (z.B. Epoxidharz).

Multi-axial: auch multidirektional: Hier verlaufen die Fasern in mehreren Richtungen (min. 2 Richtungen von $0^\circ/45^\circ/90^\circ$)

Prepreg: Matten, Gewebe, Rovings usw. die mit einer Kunststoffmatrix vorimprägniert sind.

Quasi-Isotropie: Die Eigenschaftskennwerte sind in fast allen Richtungen gleich.

Unidirektional: Hier verlaufen die Fasern parallel in eine Richtung.

Viskosität: Zähflüssigkeit; Niedrigviskos=dünnflüssig; Hochviskos=zähflüssig.

24 k-Fasern: die Bezeichnung k impliziert 1000 Einzelfilamente. Somit bestehen 24 k Fasern aus 24000 Einzelfilamenten.

9. LITERATUR

- Ehrenstein, Gottfried W.: Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften, 2. Aufl., München/ Wien 2006.
- Henning/ Moeller: Handbuch Leichtbau – Methoden – Werkstoffe – Fertigung, München/ Wien 2011.
- Klein, Bernd: Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, Wiesbaden 2009.
- R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Handbuch Faserverbundwerkstoffe, Edition 6/2009. Download unter www.r-g.de.
- Schürmann, Helmut: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Aufl., Berlin/ Heidelberg 2007.
- Witten, Elmar: Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen – Verarbeitung – Anwendungen, Wiesbaden 2010.
- Jäger/Hauke: Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe. Herstellungsprozesse, Anwendungen und Marktentwicklung, München, 2010.
- Lengsfeld/Wolff-Fabris/Krämer/Lacalle/Altstädt: Faserverbundwerkstoffe – Prepregs und ihre Verarbeitung, München, 2015.
- Schreckenberger, Harald: Werkstoffe 4, 2013; doi:10.7395/2013/Schreckenberger1.
- Chawla, K.K.: Composite Materials: Science and Engineering, 2nd Ed., Springer-Verlag, 1998.
- Ziegmann G., Flemming M., Roth S.: Faserverbundbauweisen: Halbzeuge und Bauweisen, Springer 1996.

BILDNACHWEISE

Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart: 1, 3b
AIRBUS S.A.S.: 4
Sika Deutschland GmbH: 5
Magna Steyr AG & Co. KG: 6
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: 7
Schäfer MWN GmbH (:CCOR)/
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW): 8
Institut für Forschung und Entwicklung von Sportgeräten (FES): 9
ARBURG: 29
Anwenderzentrum für Material- und Umweltforschung, Universität Augsburg: 10, 11, 27, 30, 32, 41
IHK Bildungshaus Schwaben: 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 42
R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: 2, 14, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26
Staatliche Technikerschule für Kunststofftechnik und Faserverbundtechnologie Donauwörth: 28, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40
Katharina Lechler/Jonas Schmuttermair: 3a, 43 bis 66
Elisabeth Mehrl, Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung: 67 bis 73
Bestmarke Werbeagentur: Illustrationen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Universität Augsburg
Anwenderzentrum Material-
und Umweltforschung

Kontakt:

Marietta Menner,
AMU – Anwenderzentrum Material-
und Umweltforschung, Universität Augsburg,
Universitätsstraße 1a, 86159 Augsburg,
Telefon +49 (0) 8 21/5 98 35 98,
E-Mail: marietta.menner@amu.uni-augsburg.de,
www.universitaet-augsburg.de

Kontakt:

Katharina Lechler,
Carbon Composites e.V.,
Am Technologiezentrum 5, 86159 Augsburg,
Telefon +49 (0) 8 21/26 84 11 05,
E-Mail: katharina.lechler@carbon-composites.eu,
www.carbon-composites.eu

