

Werkstoffe:

Zwischen Harz und Matrix

Jörg Schmidt

„Kohlefaser ist viel zu teuer, Glasfaser tut’s auch“ oder „Da muß Kohlefaser rein, die ist hart und leicht“. Zum Thema Faserverbundwerkstoffe hört man oftmals solche Aussagen. Daß dem nicht ganz so ist und warum, erklärt OSM Jörg Schmidt in seinem Bericht.

Wenn von Faserverbundwerkstoffen gesprochen wird, dann meinen wir meist hochmoderne Materialien mit breiten Anwendungsgebieten, welche vom Innenschuh bis zum Kampfflugzeug reichen. Die Idee der Faserverbundwerkstoffe ist nicht neu und im Grunde wie so oft von der Natur abgekupfert. Ein Vogelnest besteht beispielsweise auch aus Faserverbundwerkstoffen.

Der Aufbau von Faserverbundwerkstoffen beruht auf der Einbettung von Fasern in eine zunächst flüssige Substanz, welche nach einiger Zeit erstarrt. Diese Substanz nennt man Matrix. Grundsätzlich ist ein Faserverbundwerkstoff aus den verschiedensten Materialien und in deren Kombinationen denkbar. So ist es problemlos möglich, bei einem Werkstück in einem Guß Stellen von höchster Festigkeit neben Stellen mit großer Flexibilität zu schaffen. Beim Laminieren für die Innenschuhtechnik können Faserverbundwerkstoffe für die übergangslose Hart-Weichtechnik eingesetzt werden.

Das beschreibt den wohl herausragendsten Vorteil von Faserverbundwerkstoffen: Da ich beim Arbeiten nicht nur das Werkstück, sondern auch den Werkstoff selbst erarbeite, kann ich „viel Wirkung mit wenig Nebenwirkungen“ hervorbringen. Oder anders – den Werkstoff den individuellen Beanspruchungen anpassen.

Um diese Möglichkeiten voll zu nutzen und für unseren Bereich richtig anzuwenden, bedarf es einiger

Kenntnisse über die Grundlagen dieser Materialien.

Grundlagen von Faserverbundstoffen

Die Harzsysteme (Matrix)

Die Matrix hat diverse Aufgaben zu erfüllen. Sie hält die Fasern in der gewünschten Form, stützt diese bei Druckbelastungen, überträgt die Kräfte zwischen ihnen und schützt vor äußeren Einflüssen. Für ein optimales Arbeitsergebnis muß der Matrixwerkstoff ein definiertes Verhalten aufweisen. Die Abstimmung von Fasern und Matrix aufeinander ist besonders wichtig. Je nach gewünschten Werkstückeigenschaften sind *Haftung* und *mechanische Verträglichkeit* zwischen Matrix und Faser zu beachten.

Die Haftung ist für die Spannungsübertragung von Matrix zu Faser entscheidend. Sie beruht auf chemischen und/oder physikalischen Bindekräften, kann – je nach verwendeter Matrix sowie dazugehöriger Faser – differieren und bestimmt somit die späteren Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Dämpfung.

Um eine gute mechanische Verträglichkeit zu erreichen, ist es wichtig, daß sich die mechanischen Eigenschaften der beiden verwendeten Werkstoffe ergänzen. Einfach ausgedrückt heißt das: wenn man hochflexible Perlonfasern in ein sehr sprödes Harz einbettet, wird dies unter Belastung zwangsläufig zum mechanischen Versagen des gesamten Werkstücks führen.

Die für die Orthopädieschuhtechnik gängigen Matrixwerkstoffe sind Polyester-, Acryl-, Epoxid- und Silikonharze.

Einer grundsätzlichen Differenzierung bedürfen hierbei die Duro- und Thermoplaste. Während bei den Thermoplasten durch die Zufuhr von

Tabelle 1

Polyesterharz (Duroplast)	geringe Ermüdungsresistenz, mäßige Steifig- und Festigkeit bei schneller Versprödung, hohe Reaktionstemperatur und großer Reaktionsschwund
Acrylharz (Thermoplast)	gute Ermüdungsresistenz, hohe Steifig- und Festigkeit, gute Haftung und mechanische Verträglichkeit; durch Wärmezufuhr nachträglich verformbar
Epoxidharz (Duroplast)	gute Ermüdungsresistenz, hohe Steifig- und Festigkeit, lösungsmittelresistent, geringer Reaktionsschwund, langsamer Reaktionsablauf
Silikonharz (Duroplast)	gute Ermüdungsresistenz, große Flexibilität, gute Festigkeit, stark wasserabweisend, physiologisch gut verträglich

Wärme jederzeit eine Nachformung erreichbar ist, lassen sich Duroplaste nach dem Aushärten nicht mehr verändern (siehe hierzu Tab. 1).

Die Fasern

Stellen Sie sich die Situation beim Abschleppen eines Autos vor: würde man ein einzelnes dünnes Fädchen zwischen Wagen A und Wagen B spannen, es könnte nicht lange halten. Erst die Verarbeitung vieler Fädchen zu einem Seil mit der entsprechenden Faserausrichtung macht hier Sinn. Dieses ist dann der entstehenden Zugbelastung gewachsen.

Wenn nun das Seil zwischen beiden Wagen in Schleifen auf dem Boden liegt, kann keine Kraft übertragen werden. Auto A rollt so lange vorwärts, bis das Seil gespannt ist. Erst bei völlig gestrecktem Seil ist der Kraftfluß von A nach B möglich.

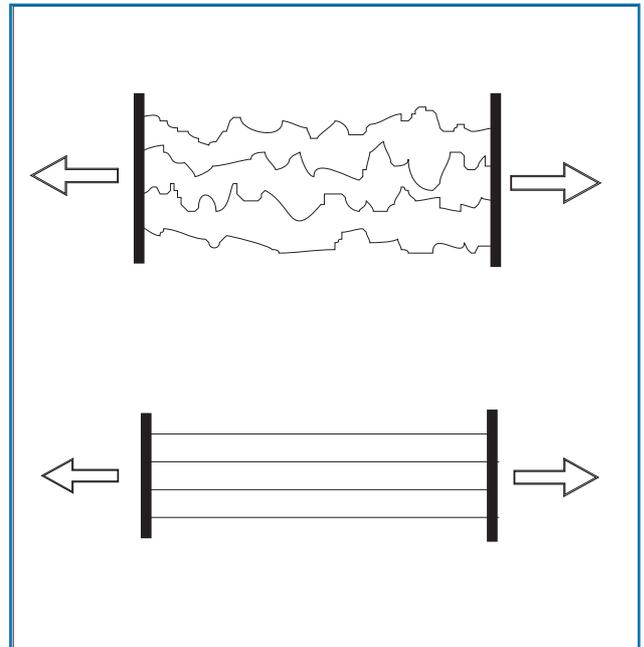
Neben dem Basismaterial einer Faser stellt, wie das Beispiel verrät, deren möglichst gestreckte Ausrichtung einen wesentlichen Faktor ihrer Eigenschaften dar. Liegt die Faser in der Matrix ungestreckt, ergibt sich die Kraftübertragung rein über die Matrix. Die Fasern werden zur Kraftübertragung nicht genutzt. Das Werkstück ist matrixdominiert (siehe Abb. 1).

Auch die textile Konstruktion der Faser hat Einfluß auf Haltbarkeit und Eigenschaften der Werkstücke.

Textile Konstruktionen

Die für unsere Branche wichtigsten Konstruktionstypen sind *Gelege*, *Gewebe*, *Geflechte* und *Maschenwaren*.

1 Nur gestreckte Fasern können Kräfte übertragen.



Das einfachste Konstruktionsprinzip haben die *Gelege*. Hier liegen die einzelnen Faserbündel parallel und gestreckt nebeneinander. Der Faserverlauf ist unidirektional; die Kraftaufnahme nur in 0° und 180° möglich.

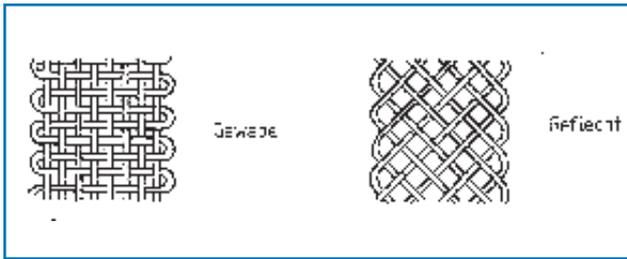
Bei den *Geweben*, welche sich aus vertikalen Kett- und horizontalen Schußfäden zusammensetzen, ist die Faserverlaufsrichtung entsprechend bidirektional. Diese sind in 0° , 90° , 180° und 270° belastbar. Da Kett- und Schußfäden jedoch an den sogenannten Bindungspunkten jeweils gegenseitig über- und untergeführt sind, liegen die einzelnen Faserbündel nicht gestreckt vor. Dies führt in Faserachse zu Festigkeitsverlusten gegenüber unidirektionalen Gelegen. Denken Sie an das Beispiel mit den beiden Autos.

Während Kette und Schuß bei den Geweben in 90° zueinander verlaufen, liegt der Winkel beim *Geflecht* bei etwa 45° . Der Vorteil besteht dar-

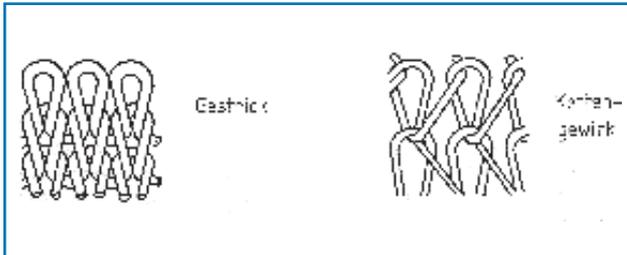
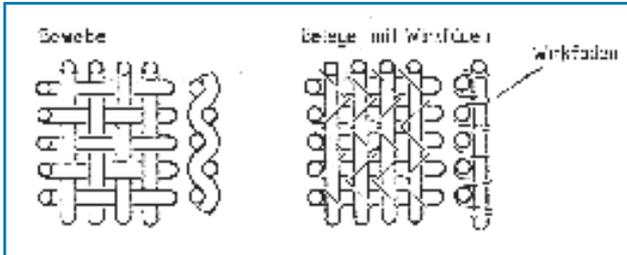
in, daß ein Geflechttextil leicht an beliebige Symmetrien angepaßt werden kann. Wenn Sie schon einmal mit Geflechtschlauch gearbeitet haben, kennen Sie die Anpassungsbereitschaft dieses Materials. Leichte Festigkeitsverluste infolge nicht vollständig gestreckter Auslegung des Werkstoffs sind allerdings auch hier ein Nachteil.

Maschenwaren sind auf Grund ihrer Schleifenbildung sehr anschmiegsam und gut zu verarbeiten. Diese Schleifenbildung widerspricht jedoch gänzlich dem Prinzip der gestreckten Verarbeitung der Fasern. Maschenwaren sind somit genauso wie Flechtwaren zur Erreichung höchster Steifigkeiten und Festigkeiten weniger geeignet (siehe Abb. 2, 3, 4).

Gewebe, Geflechte und Maschenwaren sind gerade für uns einfach einzusetzen; nicht nur wegen



2-4 Beispiele der textilen Konstruktion von Fasern.



der leichteren Verarbeitung. Bedingt durch ihre mehrachsigen Faserverlaufesrichtungen sind sie auch unempfindlicher gegenüber mehrachsigen Belastungen als unidirektionale Gelege. Dies sollte immer bedacht werden, wenn nicht genau definierbare Belastungen auf ein Werkstück entfallen oder Kraftverläufe tatsächlich mehrachsige sind (siehe Abb. 5).

Die Faser-materialien

Nylon/Perlon

Sie gehören zur Gruppe der Polyamide und sind thermoplastisch verformbar. Beide besitzen eine mittlere Festigkeit, sind sehr elastisch und ermüdungsstabil.

Glasfasern

werden im Düsenziehverfahren gewonnen oder wie Zuckerwatte durch

das sogenannte Gravitationspinnverfahren hergestellt. Grundmaterial ist immer das Siliziumoxid. Auf dem Markt befinden sich mittlerweile eine Vielzahl unterschiedlicher Glasfaserarten. Die wichtigsten sind E-, R/S- und C-Glas (E – für elektrisch, da diese Faser leitfähig ist, R/S – für Resistance/Strength mit besseren Zugfestigkeitswerten und C – für chemisch, ein Hinweis auf die gute Chemikalienbeständigkeit dieser Sorte).

Aramidfasern (Kevlar)

werden mit Hilfe von Lösungsmitteln versponnen. Eine Differenzierung bezüglich der Eigenschaften erfolgt lediglich zwischen Normal- und Hochmodulfasern. Die Aramidfaser zeichnet sich durch ein hohes Energieaufnahmevermögen aus. Sie beweist das in einer hohen Schlagbeanspruchbarkeit bei, allerdings geringerer Druckfestigkeit. Dieses Impactverhalten der Aramidfaser wird zum Beispiel in schuhsicheren Westen genutzt.

Kohlenstofffasern

werden nicht aus Kohle gewonnen. Der Ausgangsstoff ist meist das Polyacrylnitril (PAN). Nach dem Verspinnen werden die Fasern bei er-

Das Elastizitätsmodul (E-Modul) gibt die Zugsteifigkeit eines Materials an; je größer der E-Modul, um so steifer das Material.

Faser	Dichte g/cm ³	Zugfestigkeit GPa	E-Modul GPa
Glas	2,5	3,0 – 4,6	71 – 87
C-Faser	1,78	2,7 – 7,0	230 – 490
Aramid	1,44	2,8 – 3,4	60 – 186
PE-Faser	0,97	2,6 – 3,3	85 – 172

Tabelle 2 Die Tabelle stellt die Eigenschaften der wichtigsten Versteifungsfasern dar.

höher Temperatur verstreckt. Bei Temperaturen bis zirka 1800° C (der sog. Carbonisierung) wird das Ausgangsmaterial um bis zu 100 % in Kohlenstoff (Graphit) umgelagert. Bei weiteren Wärmebehandlungen oberhalb 2000° C kann die Fasercharakteristik noch verbessert werden. Auch hier gibt es – wie bei der Glasfaser – viele unterschiedliche Faserarten. Erwähnen möchte ich hier nur die HF- (hohe Festigkeit) sowie die HM-Faser (High Modulus). Letztere besitzt die größeren Steifigkeitswerte.

Besonderheit:

Im Gegensatz zu Glas- und Nylon-/Perlonfasern weisen Aramide und Carbone eine Schrumpfung unter Wärmeeinfluß auf. Das heißt, sie kontrahieren in Faserverlaufsrichtung und wirken so der Ausdehnung der anderen Materialien entgegen. Da es hierdurch zu Spannungen innerhalb des Werkstücks kommen kann, ist dies gerade beim Arbeiten mit reaktionsfreudigen Acrylharzen zu bedenken (siehe hierzu auch Tab. 2).

Mechanische Eigenschaften und Eigenheiten

Ich habe bislang nur über die zu verwendenden Materialien geschrieben. Wie sieht es nun mit ihren mechanischen Eigenschaften aus? Hierzu einige Grundüberlegungen:

Unsere Werkstücke unterliegen bestimmten mechanischen Belastungen, insbesondere Zug-, Druck- und Biege-(Torsions-)belastungen. Zugbelastungen werden hauptsächlich von den Faseranteilen aufgenommen. Die Beständigkeit gegenüber Druckbelastungen hängt jedoch in erheblichem Maße von den Eigenschaften der Matrix ab.

Denken Sie nochmals an das Beispiel mit den beiden Autos. Das Abschleppen oder besser das Ziehen

von Auto B durch Auto A ist mit einem Seil möglich, ein Anschieben durch A jedoch nicht. Das Seil würde sich in Schleifen vor Wagen A zusammenlegen; es könnte keine Kraftübertragung stattfinden. Erst wenn das Seil gestützt wird (z. B. durch eine feste Matrix), könnten die notwendigen Kräfte fließen. Mit einer Stange kann man sowohl Zug- als auch Druckkräfte übertragen.

Aber bleiben wir beim matrixverstärkten Seil. Würde der Druck nun stärker, würden sich an einer Stelle einzelne Fasern ausbeulen. Es käme zur Delamination, danach zum Einknicken und schließlich zum Bruch des Seils. Haftung und mechanische Verträglichkeit zwischen Matrix und Faser bestimmen diesen Zeitpunkt.

Im direkten Zusammenhang mit Druck- und Zugkräften stehen die Begriffe Steifigkeit und Festigkeit:

- als **Steifigkeit** bezeichnet man die Fähigkeit, unter Belastungen Deformationen zu vermeiden;
- unter **Festigkeit** verstehen wir die Eigenschaft, Belastungen zu widerstehen ohne zu zerbrechen.

Steifigkeit und Festigkeit folgen neben materiellen auch geometrisch-konstruktiven Prinzipien.

Stellen Sie sich einen Stapel Papier vor, der an einer Seite fixiert über die Tischkante nach unten hängt. Durch die Biegung verkürzt sich der Weg auf der Unterseite des Stapels. Dadurch schiebt sich das unterste Blatt am weitesten nach vorne. Gleichzeitig verlängert sich der Weg auf der Oberseite des Stapels und erzeugt den Eindruck, das oberste Blatt würde sich verkürzen. Es weicht am weitesten zurück. Das mittlere Blatt, „die Seele des Stapels“, scheint in seiner Länge jedoch unverändert.

Wenn man nun die Blätter untereinander verklebt, damit sie sich nicht mehr verschieben können, entsteht zum obersten Blatt hin eine Zug- und zum untersten eine Druckbelastung, welche sich mit jeweils zunehmendem Abstand vom Kern des Stapels vergrößert. Das heißt, die jeweils äußeren Blätter sind auch den

größten Druck- bzw. Zugkräften ausgesetzt. Das mittlere Blatt unterliegt weder Zug- noch Druckbelastungen, es bleibt neutral.

Je dicker dieser Stapel nun wird, respektive je mehr Blätter miteinander verklebt werden, desto steifer wird das Paket.

Mehrere Grundprinzipien

Die Druck- und Zugbelastungen in einem auf Biegung beanspruchten Werkstück werden in den äußeren Bereichen größer. Sie wachsen proportional mit ihrem Abstand zur neutralen Faser.

Hieraus ergibt sich die Forderung, Hochmodulfasern bei entsprechenden Werkstücken möglichst weit an den Außenseiten zu plazieren. Eine „Seele aus Kohlenstoff“ macht das Arbeitsergebnis nur unwesentlich steifer, dafür aber unnötig teuer.

Da auf der Stapelunterseite Druckbelastungen entstehen, droht – ähnlich wie bei unserem Beispiel mit dem Seil – die Gefahr der Delamination. Für Faserverbundwerkstoffe erklärt sich deshalb die absolute Notwendigkeit einer guten Matrixvernetzung. Delamination der einzelnen Fasern untereinander ist in jedem Falle zu vermeiden.

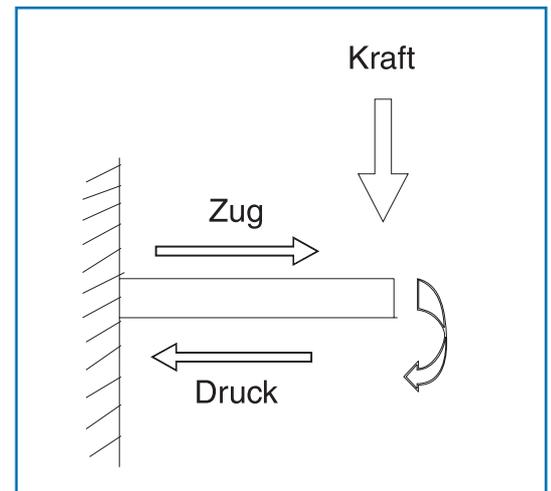
Von der Theorie zur Praxis

Was bedeutet dies alles nun für uns? Welche Konsequenzen ergeben sich bei der Umsetzung dieser theoretischen Grundlagen in die Praxis?

- Das Herstellen hochwertiger Werkstücke bedingt die Verwendung ebensolcher Materialien. Da sollte man nicht beim Matrixwerkstoff sparen. Verwenden Sie Acryl- oder Epoxidharze. Allein die höhere Reaktionstemperatur von Polyesterharzen könnte beim Verarbeiten von Kohlenstoff- oder Aramidfasern unbrauchbare Werkstücke hervorbringen (temperaturbedingte Schrumpfung der Fasern!). Darüber hinaus sprechen die mangelnde Alterungsbeständigkeit sowie geringere Festigkeiten gegen Polyesterharze.

- Versuchen Sie, das Fasermaterial immer gestreckt und in Kraftverlaufrichtung zu verarbeiten. Ziehen Sie beispielsweise beim Laminieren von Innenschuhen das Schlauchmaterial straff über den Leisten. Keine Restzügigkeit bedeutet direktere Kraftübertragung im Werkstück.
- Zusätzliche Verstärkungslagen sollten immer in Richtung der auftretenden Kräfte liegen.
- Bedenken Sie die „neutrale Faser“. Die Verwendung einer Hochmodulfaser als „Seele des Werkstücks“ ist sinnlos. Daher sollten Kohlenstoff- oder Kevlarmaterialien immer in den äußeren Bereichen eines Werkstücks plaziert werden.
- Profile vertragen deutlich mehr Biegebelastung als Plattenmaterialien. Eine Sohlenversteifung muß deshalb nicht flächig hergestellt werden.

5 Durch die einseitige Fixierung entsteht bei Krafteinwirkung ein Drehmoment. Dies führt zur Verformung und somit zu entsprechenden Zug- und Druckkräften.



den. Sie kann auch als „Rohrprofil“ aus Glas- oder Kohlefaserschlauchband gearbeitet werden. Die Biegefestigkeit wird durch die Einarbeitung von Profilierungen entscheidend verbessert.

Anschrift des Verfassers:

OSM Jörg Schmidt
Nachtsheimstr. 1
66763 Dillingen

Literatur:

- O. Schwarz, Glasfaserverstärkte Kunststoffe kurz und bündig, Vogel-Verlag 1975.
- Michaeli/Wegener, Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe, Hanser-Verlag 1990.
- Dr. F. Stoll, Verstärkungsfasern und Faserverbundwerkstoffe, OT Serie 90.
- Brüssel/Kording, Gewebe – Gewirke – Gelege, OT Serie 90.
- B. Klasson, Grundlagen der Carbonfaser – Anwendung in der Orthopädie-Technik, OT Serie 90.

Abbildungen:

Aus: Michaeli/Wegener, Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe.