

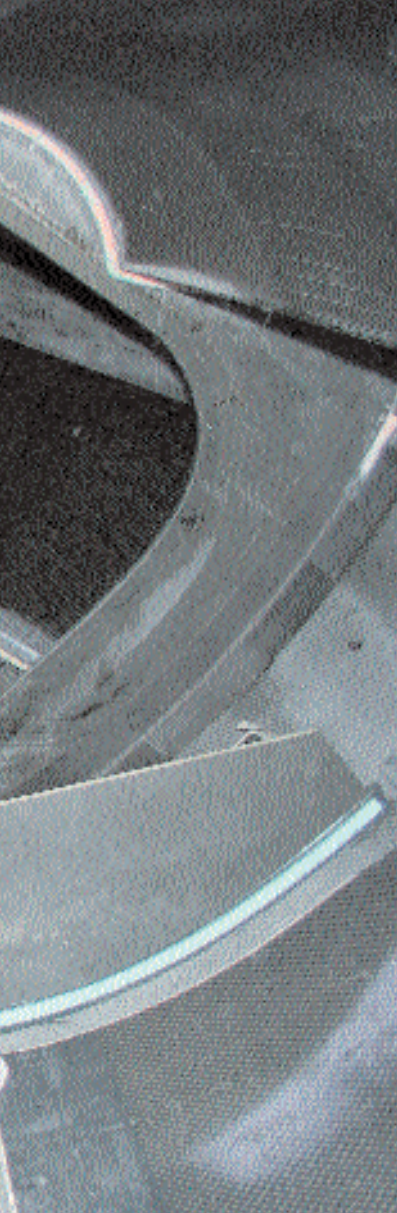


Der Stoff aus dem die Boote sind

Beidseits Quadraxialgelege aus R-Glas, zusätzlich unidirektionales Carbon an den hoch belasteten Stellen. Das Vorschiff wird mit Aramid verstärkt...jajawohl Kevlar im Bugbereich und die Püttings aus HM-Carbon...für den Kern nehmen wir 20 Millimeter PVC-Schaum. Ja, ja, natürlich, ein lösemittelfreies Epoxisystem. Die Verbände werden mit Hohlkehlen und Winkellaminat verbunden.

Die Fachgespräche zwischen Konstrukteur und Bootsbauer klingen für den Laien ähnlich verständlich wie die Manöverkritik der OP-Besatzung nach der letzten Herztransplantation. Früher waren die Boote aus Holz. Wer es sich leisten konnte, nahm Mahagoni, die anderen begnügten sich mit Lärche oder Gabun. Stahlschiffe waren zunächst eckig, wurden dann immer runder und irgendwann sah man auch Kunststoffboote auf dem See schwimmen.

„Pappdeckelschiffe“, wie die Puristen damals verächtlich meinten. Auch heute sprechen manche Holzbootbesitzer noch abfällig von den „Yoghurtbechern“. Die technischen Fertigkeiten der Bootsbauer stagnierten aber nicht bei den ersten „modernen Glasfaserbooten“, die mindestens so schwer waren wie Mahagoni auf Eiche geplankt. Die Entwicklung ging weiter. Immer auf der Suche nach Materialien und Bau-



Die leere „Carbonhöhle“ der „Sailovation“. Das Boot besteht aus 15 Millimeter starkem Schaum und ist im „Sprint-Verfahren“ gebaut. Dabei kommt kein flüssiges Epoxidharz zum Einsatz, sondern ein bei Zimmertemperatur fester Harzfilm, der durch Wärmezufuhr flüssig wird und aushärtet. Der komplette Rumpf des neun Meter langen und 3,15 Meter breiten Boots soll nur etwa 400 Kilogramm wiegen. Im Bereich der späteren Canting-Kiel-Mechanik wurde Glas statt Kohlefaser verwendet. Daneben sieht man einen Bereich, der sich vom Gewebe weiter außen unterscheidet. Das ist ein Band aus Unidirektionaler Kohlefaser, das beidseitig längs der Schale verläuft. Diese Bänder nehmen die Zugkräfte von Vor- und Backstagen auf, die unter dem Hauptschott hindurch laufen. Das Abreibgewebe befindet sich noch in der Schale und ist nur an den Stellen entfernt worden, wo Schotten, Püttings und andere Teile anlamiert wurden.

steht darin, dass die auftretenden Belastungen genau erfasst werden, und das Bauteil speziell dafür ausgelegt wird. Die Philosophie ist, dass Festigkeit, die nicht benötigt wird, nur das Gewicht erhöht und deshalb schädlich ist.

Eine Leine beispielsweise wird nur auf Zug belastet. Sie braucht weder biegesteif noch druckfest zu sein. Das ist ein typisches Beispiel für ein inhomogenes Material für eine ganz spezielle statische Aufgabe. Es kann nur Zugkräfte aufnehmen.

Das Gegenteil solcher spezialisierten Baustoffe sind homogene Materialien wie beispielsweise Metalle. Stahl kann Kräfte, die quer verlaufen genau so gut halten wie Kräfte die längs oder diagonal verlaufen. Darüber hinaus ist das Material auch noch außerordentlich druckstabil und biegesteif. Metalle haben keine definierten Lastlinien und decken ein breites Spektrum an Belastungsfällen ab. Das macht sie universell einsetzbar, aber schwer.

Massivholz

Das ursprüngliche Bootbaumaterial ist Holz. Es besteht, ähnlich wie Tauwerk, aus Fasern. Holz ist ein statisch nicht homogenes Material.

Es kann, längs der Faser, hohe Zugkräfte aufnehmen. Quer zur Faser hat es aber nur eine geringe Festigkeit. Das selbe gilt für Biegesteifigkeit und Elastizität.

verfahren, die bei möglichst wenig Gewicht hohe Festigkeiten boten.

Wichtige Impulse für diese Technologien kamen vor allem aus der Luft- und Raumfahrttechnik. „Weltraumprobt“ war in den siebziger Jahren, nach dem Apollo-Programm der Amerikaner, ein werbewirksames Schlagwort. Mit diesem Attribut versehen, liessen sich sogar potthässliche Sonnenbrillen verkaufen.

Homogene und inhomogene Materialien

Moderner Kunststoffbootsbau ist mittlerweile High-Tech und hat nichts mehr mit den zusammengeklebten „siebziger Jahre Raumwunder“ zu tun. Die „Kunst“, ein leichtes und trotzdem ausreichend festes Boot zu konstruieren be-



Auch bei Motorbooten werden Sandwichkonstruktionen sinnvoll eingesetzt. Speziell das Deck und die wenig gewölbten Bereiche der Schale können mit Schaum- oder Balsasandwich erheblich steifer und leichter ausfallen, als das mit Massivlaminat möglich wäre. Dann reicht vielleicht eine kleinere Maschine aus, die das Gewicht zusätzlich reduziert.



Die formverleimte Holzbaupweise ist technologisch gesehen eine moderne Bauweise. Die einzelnen Furnierlagen sind so ausgerichtet, dass die positiven Eigenschaften des Holzes genutzt werden, ohne dessen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Die Faserrichtung der inneren Lagen überkreuzen sich diagonal. Das ergibt eine hohe Torsionssteifigkeit des Rumpfes. Die äußere Furnierlage ist längs ausgerichtet.

leichte Boote gebaut werden. Die Philosophie der konsequenten Lastausrichtung kann um so gezielter angewendet werden, je kleiner die einzelnen Bauelemente sind. Bei sogenannten Hochmodulwerkstoffen geht das bis in die Molekülstruktur hinein. Hier zeigen möglichst viele Molekülketten in die selbe Richtung. Das erklärt die schier unglaublichen Zugfestigkeiten von Kevlar, Carbon, Dyneema & Co.

Daraus folgt, dass man aus Holz sehr leichte und feste Bauteile herstellen kann, solange das Material in der richtigen Richtung belastet wird. Sollen auch Querkräfte aufgenommen werden, muss unverhältnismäßig dickes Holz verwendet werden. Das Bauteil wird unnötig schwer und ist nicht „materialgerecht“ gestaltet. Dazu kommt ein weiteres Problem: Holz arbeitet. Es verändert seine Dimensionen, wenn es Feuchtigkeit aufnimmt oder abgibt. Aus diesem Dilemma hat sich Menschheit geholfen, indem sie Sperrholz entwickelte. Durch die Kombination verschieden ausgerichteter Furnierlagen verschieben sich die statischen Eigenschaften in Richtung der Eigenschaften eines homogenen Materials.

Je nach Anzahl und Richtung der einzelnen Furnierlagen kann ein Sperrholzbau teil für genau definierte Lastsituationen gebaut werden. Der Grad der Feinabstimmung steigt mit der Anzahl der Lagen.

Formverleimte Boote

Formverleimte Boote bestehen aus „Sperrholz“, das nicht als fertige Platte bezogen wird, sondern erst in der Werft über dem Kern, der Positivform, entsteht. Der Konstrukteur bestimmt Anzahl, Dimension und Richtung der einzelnen Furnierlagen. Die Holzfasern werden in Richtung der auftretenden Kräfte ausgerichtet. Der Anteil der Holzfasern, der zur Festigkeit beiträgt kann dabei optimiert werden.

Biegesteifigkeit hängt von der Dicke ab

Das Sperrholz hat noch eine interessante Eigenschaft. Nämlich die der Biegesteifigkeit. Es verhält sich in Längsrichtung der Außenlagen ähnlich wie ein Massivholzbrett gleicher Dimensionen, obwohl die quer verlaufende Mittellage praktisch nicht zur Steifigkeit beiträgt. Sie hält nur die beiden äußeren Furniere auf Distanz, von denen eines auf Zug und das andere auf Druck beansprucht wird. Dabei treten die höchsten Kräfte in den äußeren Bereichen auf, während genau in der Mitte des Bauteils weder Zug- noch Druckkräfte auftreten. Man spricht dabei von der „neutralen Faser.“ Mit der formverleimten Holzbauweise können, auch in der Zeit der High-Tech Komposite sehr feste und

Gewebe und Gelege

Aus Fasern, egal ob aus Glas oder Hochmodulwerkstoffen, werden Verstärkungsmaterialien für Kompositbauteile hergestellt. Matten bestehen aus kurzen, ungerichteten Glasfasern. Sie sind in alle Richtungen etwa gleich belastbar und mit einem styrollösllichen Kleber mit einander verbunden. Werden die Fasern gesponnen und verwoben erhält man ein Gewebe, das in zwei Richtungen belastbar ist. Der Ingenieur spricht von „biaxial“. Weitere Unterscheidungsmerkmale betreffen die Webart. Die „Leinwandbindung“ ist die gängigste Version. Hier verläuft jeweils

ein Garn über ein anderes. Verläuft ein Garn über zwei andere, spricht man von „Körpergewebe“. Dieses lässt sich besser sphärisch formen. Am besten lassen sich „Atlasbindungen“ drapieren, bei denen ein Faden über drei andere verläuft, bevor er wieder untertaucht.

Für die konsequente Umsetzung einer möglichst leichten Bauweise sind „Unidirektionalgelege“ die erste Wahl. Das sind Fasern, die parallel neben einander verlaufen und entweder überhaupt nicht oder nur locker mit einander verbunden sind. Alle Kräfte sind in eine Richtung gebündelt.

Eine Gelege unterscheidet sich vom Gewebe dadurch, dass die Fasern nicht abwechselnd über- und untereinander hindurch laufen sondern gestreckt neben einander liegen. Dadurch wird der „konstruktive Reck“ minimiert.

Gelege werden, wie die Furnierlagen beim Sperrholz, miteinander kombiniert und an den zu erwartenden Lastlinien des Bauteils ausgerichtet.

Außer Unidirektionalgelegen und Biaxialgelegen sind auch Tri- und Quadrixialgelege erhältlich. Da werden einfach mehrere Lagen in unterschiedlichen Richtungen miteinander vernäht.

Multiaxialgelege sparen Arbeitszeit, weil mit einem Arbeitsgang mehrere Lagen in die Form gebracht werden können.

Je leichter und leistungsorientierter ein Boot werden soll, um so mehr Überlegungen und Berechnungen sind beim Strukturaufbau notwendig. Schließlich soll jedes überflüssige Gramm vermieden werden.

Vergleicht man den Laminatplan eines Bootes aus dem unteren Preissegment mit dem Laminatplan eines Hochleistungsbootes, wird der Grund für den Preisun-

terschied deutlich. Ein „0815-Rumpf“ besteht aus groben Geweben zwischen Mattenlagen.

Die Struktur besitzt einen großen ungerichteten Anteil. Das macht das Bauteil schwer.

Bei einem Leichtbau wird man keine Matten finden. Da geht es darum, möglichst jede einzelne Faser in eine genau definierte Richtung zu legen und ihr eine spezifische Funktion zu weisen.

Auch die Bruchdehnung ist ein wichtiger Punkt. Die einzelnen Lagen müssen sich entweder ergänzen oder die auftretende Last allein tragen können.

Die für einen Belastungsfall zuständigen Fasern müssen gleichzeitig und gleichmäßig gespannt werden, sonst addieren sich ihre Festigkeiten nicht. Sie würden nacheinander abreißen. Nur gemeinsam macht stark.

Auch der Mix von verschiedenen Materialien ist kritisch, wenn diese nicht eine ähnliche Bruchdehnung aufweisen.

Es bringt wenig, einen Glasfaserrumpf punktuell mit Carbon zu verstärken. Die Bruchdehnung des Carbons ist wesentlich geringer als die der Glasfaser. Die Festigkeiten der verschiedenen Materialien addieren sich nicht, und das Carbon ist an seiner Belastungsgrenze angelangt, während sich die Glasfaser immer noch wie ein Gummi dehnt. In diesem Fall wäre es sinnvoller und leichter, die Glasstruktur von vornherein etwas fester auszulegen.

Exotische High-Tech Materialien führen also nicht automatisch zu einem Vorteil. Sie werden nur dann überlegene Eigenschaften haben, wenn sie ganz gezielt und unter Berücksichtigung vieler anderer Faktoren eingesetzt werden.

Zugkräfte sind beim Boots-

bau relativ einfach aufzufangen. Es müssen nur genug Fasern mit der selben Spannung zwischen zwei Punkten verlaufen.

Auch längs gerichtete Druckkräfte oder Biegekräfte lassen sich durch ein entsprechendes Fadenlayout und vorteilhafte Geometrie gut aufnehmen.

So erhöhen wechselseitig diagonal verlaufende Fasern die Torsionsfestigkeit oder auch die Druckfestigkeit eines Bauteils.

Wechselasten sind kritisch

Komplizierter wird es, wenn verschiedene Lastrichtungen abwechselnd auf das Bauteil einwirken.

Dann müssen die Fasern so angeordnet werden, dass sie sich entweder in allen auftretenden Lastfällen ergänzen oder für jeden Lastfall eine eigene, ausreichend feste Struktur vorhanden ist.

So sind beispielsweise Kiel-flossen oder Ruderblätter aus Kompositbauteilen immer noch schwierig herzustellen. Dort werden große Lasten in einem kleinen Bereich konzentriert. Und zwar abwechselnd Druck- und Zugkräfte, je nachdem, auf welchem Bug das Boot läuft. Auch bei Carbonmasten bestehen diese Schwierigkeiten. Daher sind solche Riggs erst ab einer gewissen Größe wirklich vorteilhafter als Aluminiumrohre.

Soll aber die selbe Sicherheitsreserve eingebaut werden, schwindet der Gewichtsvorteil.

Im Gegensatz zu Kompositmaterialien ist Metall ein zähes Material. Bevor es bricht, verformt es sich zunächst elastisch, dann plastisch.

Dynamische Überlastungen werden „abgefedert“. Gerade im Hochleistungsbereich, wo um jedes Gramm gefeilscht wird, ist es hohe

Ingenieurskunst, eine Kompositkonstruktion so zu planen, dass sie wirklich sinnvoll ist.

Konstruktion muss materialgerecht sein

Lange Zeit waren biege-steife Flächen im GfK-Bau problematisch. Je weniger diese Fläche gekrümmt ist, um so dicker und schwerer musste das Laminat sein.

Deshalb waren die Wandstärken der ersten GfK-Boote auf „Panzerkreuzer-Niveau“. Oft wurde die Form von Holzbooten kopiert und unverändert in Kunststoff produziert. Die Materialien haben aber unterschiedliche Eigenschaften und benötigen deswegen auch eine andere Geometrie. Die Geometrie der ersten Kunststoffboote war nicht materialgerecht.

Knickspanter, wie beispielsweise Vaurien oder Motorboote mit V-Spant waren aus Kunststoff kaum sinnvoll zu bauen. Entweder waren die Boote viel zu schwer oder wurden schnell weich. Erst mit der Entwicklung der Sandwichbauweise konnte man plane Bauteile sinnvoll aus GfK herstellen.

Plane Flächen als Sandwichbauteil

Dabei ersetzt man die wenig belasteten inneren Bereiche des Laminats durch leichteres Material. Wie beim Sperrholz auch, werden bei Biegelasten nur die äußeren Bereiche entweder auf Zug oder auf Druck belastet. Die inneren Bereiche haben nur die Aufgabe, beide Außenlagen auseinander zu halten. Zuerst wurde die Sandwichbauweise mit Balsa-Hirnholz populär. Bald wurde das Holz durch verschiedene Schäume ersetzt. Auch Leistenbauten, vor allem aus leichter Zeder, werden tragend überlaminiert. Das Holz dient also lediglich als

Sandwichkern und die eigentliche Last wird vom Laminat getragen.

Spektakulär war der Einsatz der „Honeycomb-Kerne“ Anfang der achtziger Jahre. Über diesem, ursprünglich aus dem Satellitenbau stammenden Kernmaterial, wurde das Laminat der Admirals-Cup Flotten unter immensem Fertigungsaufwand in riesigen Öfen „gebacken“. Die Boote hatten ein sehr gutes Verhältnis von Gewicht zu Steifigkeit, wurden vor der Vermessung aber mit Blei vollgepackt, damit sie ein günstiges Rating bekamen.

Die dänischen Gebrüder Bøjsen-Møller sorgten wenig später ebenfalls für Furore, als sie mit ihrem FD aus Honeycomb-Sandwich fast alle Internationalen Preise abräumten.

Bei gleichem Gewicht steifer oder bei gleicher Steifigkeit leichter war das Ergebnis der damals revolutionären Bauweise. Die bis dahin populären formverleimten FD konnten da nicht mehr mit-

halten, weil ein elastischer Rumpf auch ein elastisches Rigg bewirkt. Die Riggspannung schwankt mit jeder Welle.

Heute haben sich Schaumkerne weitgehend durchgesetzt. Die meisten Schäume im Bootsbau sind aus PVC, selten aus Polyurethan. Sie lassen sich einfach verarbeiten und sind weniger kritisch bei Überlastung als die Waben aus Aluminium oder aus Phenolharz getränktem Papier. Wabenkonstruktionen werden praktisch nur in reinrassigen Rennbooten verwendet.

Ein Schaumkern, zumindest im Deck und im Bereich des Freibords ist heute bei modernen Motor- und Segelbooten üblich.

Regionen mit hohen Wechsellasten, wie der Bereich um den Kiel, das Vorstagpütting oder das Ruder sind aus Massivlaminat. Dort wäre die Gefahr zu groß, dass sich das Gewebe vom Schaum löst und der Rumpf „delaminiert“.

Hochleistungsschäume wer-

den mittlerweile auch als Kern für den Bodenbereich von Motorbooten eingesetzt, obwohl dort die Belastungen extrem hoch sind.

Sandwich-Serienboote werden gleich wie massive GFK-Boote gebaut. In einer Negativ-Form laminiert man von aussen nach innen. Für einen Einzelbau lohnt sich eine solche Form nur, wenn das Gewicht eine größere Rolle als das Budget spielt.

Einzelne GfK-Rümpfe fertigt man nicht von aussen nach innen, sondern fängt mit dem Kern an, den man über Mallen verlegt. Vielerlei Sandwichmaterialien gibt es schon werkseitig als Streifen zu kaufen, die anderen müssen entsprechend zugeschnitten werden. Hier ähnelt die Bauweise dem traditionellen Leistenbau.

Die Kernleisten können auch aus leichtem Holz sein. Sogenannte Schnellbauleisten aus Zeder haben Nut und Feder. Die Arbeitersparnis erkaufte man sich aber durch ein etwas höhe-

res Flächengewicht, weil das Epoxi die Hohlräume zwischen Nut und Feder füllt. Alternativ verwendet man „Schaumleim“ wie beispielsweise „Balcotan“. Auch Epoxidharz kann man mit entsprechenden Zusatzstoffen aufschäumen.

Auch Schaumleisten, oder Leisten aus Balsahirnholz, die schon beidseitig mit Furnier belegt sind, werden verwendet. Alles, was leicht und druckfest ist, wird als Kern denkbar.

Bei der Wahl des Kernmaterials spielt die Bootsgröße eine entscheidende Rolle. Bei großen Booten ist die Auswahl größer, weil das Flächengewicht eines ausreichend dimensionierten Kerns in einer kleineren Relation zum Gesamtgewicht steht. mh

Standardmatte mit ungerichteten Fasern. Lasten werden in alle Richtungen gleich aufgenommen. Das ergibt sehr schwere Bauteile, weil im jeweiligen Lastfall nur wenige Fasern unter maximaler Spannung stehen. Meistens werden Matten als Außen- oder Zwischenlage bei dicken Rovinggeweben eingesetzt.



Gewebe in Leinwandbindung. Lasten werden längs und quer gleichmäßig aufgenommen. In Diagonalrichtung ist das Gewebe nur wenig belastbar. Es können aber, wie beim Sperrholz, mehrere Lagen in unterschiedlichen Richtungen mit einander kombiniert werden.



Das Abreißgewebe nimmt überschüssiges Harz auf und schafft eine saubere Oberfläche. Durch die feine Struktur kann auf einen Zwischenschliff verzichtet werden. Dieses Gewebe verbindet sich nicht mit dem übrigen Laminat. Es wird vom Bauteil entfernt, bevor dieses weiter verarbeitet wird.



Schaumplatten für die Mittellage. Die Qualitäten unterscheiden sich im wesentlichen durch Material und Gewicht. Die rechte Platte ist eingeschnitten und auf der Rückseite durch ein Glasgewebe verbunden. Damit kann sie um Rundungen gelegt werden

