

EIN BEITRAG ZUR STRUKTUR UND DIMENSIONIERUNG DÜNNWANDIGER, NORMAL- UND TANGENTIALKRÄFTE AUFNEHMENDER BAUTEILE AUS GFK-LAMINATEN*

Von

Prof. Dipl. Ing. H. LANDMANN

Technische Universität Dresden

1. Einleitung

Wenn ein Konstrukteur einen Bauteil für einen bestimmten Zweck neu entwickeln will, braucht er außer den äußeren Kräften und den allgemeinen Abmessungen des Bauteiles noch Angaben bzw. Erfahrungen über den zu verwendenden Werkstoff und dessen spezielle Eigenschaften, denn diese erst versetzen ihn in die Lage, die beanspruchten Querschnitte so zu dimensionieren, daß er zu vernünftigen Relationen zwischen Festigkeit bzw. Steifigkeit einerseits und Massenaufwand andererseits gelangt. Zu diesem Zweck findet er in seinen Taschenbüchern meist sehr konkrete Angaben, sofern er bei den herkömmlichen Werkstoffen bleibt. Das Versagen eines daraus gebauten Maschinenteiles ist dann fast nie eine Materialfrage, sondern eine unzutreffende Belastungsannahme, örtliche Spannungsspitzen, hervorgerufen durch unsachgemäße Querschnittsübergänge, ein Überschreiten der vorgesehenen gesamten Lastwechselzahlen, irgendwelche Korrosionseinflüsse oder ähnliches. Man könnte vielleicht in diesem Zusammenhang auch noch zu knapp angesetzte Sicherheitszahlen gegen Bruch, gegen Fließgrenze etc. anführen, sollte aber davon Abstand nehmen, wenn man weiß, daß z. B. im Flugzeugbau Sicherheitszahlen bis herunter zu 1,5 gegen Bruch bzw. 1.1 gegen Fließ- oder $\sigma_{0.2}$ Grenze sich durchaus bewährt haben. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß

1. die verwendeten Theoreme für die Festigkeitsrechnung der Wirklichkeit entsprechen, wie z. B. bei Spannungsüberlagerung, Spannungsverteilung im Biegequerschnitt oder beim Kräfteverlauf der örtlichen Krafteinleitung.

2. die Lastannahmen sorgfältig erarbeitet sind und durch die Praxis bestätigt werden,

3. die Festigkeitszahlen der Werkstoffe garantierte Mindestwerte darstellen.

Diese letztgenannte Voraussetzung ist der bisherige Hauptgrund für die bedauerliche Tatsache, daß das Konstruieren in GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) noch auf große Schwierigkeiten stößt. Garantierte Mindestfestigkeiten etwa im Sinne der relativ geringen Schwankungen innerhalb mehrerer

* Text eines im Juli 1963 am Lehrstuhl für Flugzeugbau der Technischen Universität Budapest gehaltenen Vortrages.

Chargen ein- und derselben Metallegierung von ein und demselben Anlieferungszustand gibt es für GFK praktisch nicht, es sei denn, daß man diese »Mindestwerte« so stark herabsetzte, daß ein Konstruieren mit so »minderwertigem« Werkstoff nicht mehr reizvoll ist, da das Ergebnis zu schwer und damit zu teuer wird.

Hiermit schneiden wir einen wichtigen Gesichtspunkt an, indem wir uns — zumindest bei größeren Bauteilen — gleich zu Anfang die Frage beantworten sollten, ob GFK für diesen Fall wirklich das geeignete Material ist. In manchen Fällen wird man die Frage ohne weiteres bejahen müssen, z. B. wenn bestimmte spezifische Eigenschaften unumgänglich gefordert werden müssen, wie: größte Biegsamkeit (bei Angelruten), große mechanische Arbeitsaufnahme (bei Schutzhelmen), geringstmögliche Dichte (bei Vorrichtungen, Lehren, Schablonen für große Bauteile), gute Lichtdurchlässigkeit (bei gewissen Elementen des Bauwesens), gute elektrische Isolierfähigkeit und Wärmedämmung. In anderen Fällen, insbesondere wo es nicht einmal auf Massenverminderung ankommt, dürfte der Übergang zu GFK sehr oft unwirtschaftlich sein.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung interessieren uns GFK in der Hauptsache als Konstruktionswerkstoffe für tragende Teile, die man mit dem Begriff »Schalen« zu umreißen pflegt, d. h. also für flächige (ebene, ein- bzw. mehrfache gekrümmte) Elemente, die geeignet sind, in ihrer Ebene Normal- und Tangentialkräfte weiterzuleiten, wobei in der Regel die Forderung nach minimalem Massenaufwand gestellt wird (Leichtbau!). Für diese Aufgaben kann die Verwendung von GFK sinnvoll, ja sogar empfehlenswert sein, zumal dort, wo noch weitere erwünschte Eigenschaften, wie gutes Aussehen, Unempfindlichkeit gegen Atmosphärien und Chemikalien, bequeme Herstellungsmöglichkeit (z. B. Handauflegeverfahren bei komplizierten Formen), lange Lebensdauer sowie andere, oben schon genannte Qualitäten gleichzeitig übernommen werden können.

Leichtbau bedingt bekanntlich Werkstoffe hoher Festigkeit, hohen E- bzw. G-Moduls bei gleichzeitiger geringer Dichte!

Als Vergleichsgrößen hat man Begriffe wie

$$\begin{aligned} \text{»Reißlänge«} &= \frac{\sigma_{ZB}}{\gamma} = \frac{\sigma_{ZB}}{\rho \cdot g} \text{ [km]} \\ \text{»Elastizitätslänge«} &= \frac{E}{\gamma} = \frac{E}{\rho \cdot g} \text{ [km]} \end{aligned}$$

gebildet, wo die hochwertigen GFK erfolgreich mit bewährten Konstruktionsstoffen konkurrieren (Abb. 1).

Dieser willkürliche Vergleich einer bestimmten GFK-Auslegung mit anderen hochwertigen Konstruktionswerkstoffen zeigt, daß die »Reißlänge«

σ_{ZB}/γ in gleicher Größenordnung wie bei Holz und Dural, jedoch etwa doppelt so hoch wie bei St. 60 liegt. Dagegen liegt die »Elastizitätslänge« E/γ bei der gewählten GFK-Qualität nur bei knapp 40% jener von Stahl und Dural bzw. bei 56% jener von Flugzeugkiefer. Das zeigt, daß es einfacher ist, mit GFK leicht zu bauen als steif.

Mechanische Werte verschiedener Konstruktionswerkstoffe

Werkstoff	Bruchzug-	E-modul	Wichte	Reißlänge	»E-Länge«
	festigkeit			$\frac{\sigma_{ZB}}{\gamma}$	$\frac{E}{\gamma}$
	$\sigma_{ZB} \cdot 10^{-2}$	$E \cdot 10^{-5}$	γ	km	km
	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/dm ³		
Stahl St 60.11	60	2.100	7.8	7.7	2690
Dural Al Mg Cu	43	0.725	2.8	15.4	2590
Flugzeug-Kiefer 4002	8	0.100	0.56	14.3	1790
GFK aus Kreuzgewebe mit 57% Glas	28	0.180	1.8	15.6	1000

Abb. 1

Wir greifen jedoch dem Ablauf unserer Betrachtungen vor! Leider ist es in der Praxis nicht so, daß man kennzeichnende Werte von GFK aus Tabellen einfach entnehmen kann. Wenn man Werte, wie oben dargestellt, irgendwo findet, so sind sie zumeist labormäßig gewonnen worden und in der Regel nicht reproduzierbar. Das kann auch nicht erwartet werden, da GFK alles andere sind als ein konkret zu definierendes und erst recht als ein homogenes Material. Schon der Name sagt, daß es sich um eine Kombination von Glasfasern und Kunststoffen handelt, wobei allerdings der Akzent noch auf den Kunststoffen liegt, während das eigentliche tragende Element die Glasfasern sind. Insofern ist der Name GFK nicht glücklich. Doch das nur nebenbei.

Die erwähnte Kombination zweier grundverschiedener Komponenten birgt schon eine schier unendliche Vielfalt der Variationsmöglichkeiten in sich. Untergruppen bilden unter anderem etwa folgende Probleme:

1. der Einfluß der Glasanteils $\frac{\text{Glasmasse}}{\text{Gesamtmasse}}$,
2. der Einfluß der Glasart (Alkaligehalt),
3. der Einfluß der Harzart,
4. der Einfluß der Elementarfaserstärke,
5. der Einfluß der Schlichte bzw. Entschlichtung,
6. der Einfluß der textilen Weiterverarbeitung (Webarten, Mattenarten),
7. der Einfluß des Finishs,
8. der Einfluß der verwendeten Aktivatoren,

9. der Einfluß der Aushärteverfahren (kalt — heiß),
10. der Einfluß der Erfahrung, Sorgfalt und Sauberkeit bei der Herstellung des Prüfkörpers,
11. der Einfluß der verschiedenen Belastungsarten und Prüfkörperformen,
12. der Einfluß des Winkels zwischen Kraftrichtung und Hauptfaserichtung,
13. der Einfluß der Zeit (Kriechen, Dauerfestigkeit),
14. der Einfluß des späteren Betriebsklimas (Temperatur und Feuchtigkeit).

Es dürfte kein anderes Baumaterial geben, bei dem eine ähnliche Vielfalt von Parametern Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften hat wie bei den GFK, und das ist der Grund dafür, daß bisher keine eindeutigen Angaben gemacht werden können. Ein Trost in dieser reichlich trüben Perspektive ist jedoch, daß man wenigstens die Tendenzen innerhalb dieser Teilprobleme kennt. So kann man ungünstige Einflüsse von vornherein ausschalten bzw. sich auf Teileinflüsse beschränken, die zu günstigen Ergebnissen führen.

Es besteht die Hoffnung, daß man, wenigstens bei Erfüllung gewisser unumgänglicher Anforderungen an die Herstellungs- und Verarbeitungsbetriebe, in absehbarer Zeit doch noch zur Aufstellung von Richtwerten kommen wird, nach denen GFK-Konstruktionselemente berechnet, geprüft und zugelassen werden können. Z. Zt. sind eigene Versuche unter wirklichen Betriebsbedingungen noch unentbehrlich, wenn man vor der Aufgabe steht, Optimallösungen für größere Leichtbauteile zu finden. Bei der Entwicklung solcher Teile sollte man etwa so vorgehen, daß man nach Anfertigung einiger erster Funktionsmuster (V_1 usw.) in Zusammenarbeit zwischen Chemiker, Technologen, Konstrukteur, Kaufmann und Vertreter der Werkstatt eine Nullserie des betr. Gerätes baut, diese nach allen Richtungen hin intensiv prüft und bei Bedarf weiter verbessert, solange eine Verbesserung noch sinnvoll erscheint. Solche Entwicklungen werden meist viel Zeit und Geld kosten und zwar um so mehr, je geringer die speziellen Erfahrungen des Betriebes auf dem GFK-Gebiet sind. Betriebe, die die Fertigung von GFK-Teilen neu aufnehmen wollen, können damit rechnen, daß sie viel Lehrgeld zahlen müssen. Die hier geschilderten Schwierigkeiten bezüglich noch zu wenig vorhandener Festigkeitsunterlagen von GFK sind jedoch nur ein Teil dessen, was sie erwartet.

Als vor etwa 9 Jahren an meinem damaligen Institut für Flugzeugkonstruktion die ersten tastenden Versuche begannen, tragende Flugzeugteile in GFK zu bauen, zuerst kleine Teile wie Leitwerksflossen, später jedoch auch ganze Tragflügel, Rumpfe, ja sogar Behälter und Fahrwerksfederelemente, haben wir Schwierigkeiten aller Art kennengelernt. Das Gebiet der Festigkeits- und Steifigkeitswerte haben wir uns mühselig durch lange Versuchsreihen erarbeiten müssen. Wir haben gelernt, was es heißt, werkstoff-

gerecht zu konstruieren; wir haben aus dem Stamm unserer besten Holz- und Metallarbeiter die geeigneten Kräfte ausgesucht und sie in die völlig neue Materie sich einarbeiten lassen, wir haben Bezugsquellen für die neuen Baustoffe (Harze, Härter, Beschleuniger, Glasgewebe, Rovings etc.) erschlossen, haben technologische Möglichkeiten und Prüfmethode von Fall zu Fall neu entwickelt u. v. a. m.

Allerdings erstreckten sich unsere Arbeiten zum größten Teil auch auf Randgebiete, wie Papierwaben, Schäume, Klebharze und technologische Dinge, zumal uns die GFK-Sandwichbauweise für unsere damaligen Zwecke als die aussichtsreichste erscheinen mußte. Die Schalenbauweise stellt ja den Konstrukteur bekanntlich nicht nur vor reine Festigkeitsprobleme, sondern bei Beanspruchung der Schalen auf Druck, Schub, Torsion bzw. bei überlagerten Beanspruchungsarten vor Stabilitätsprobleme, die bekanntlich mit dünnen Platten nicht zu bewältigen sind. Diese Knick-, Beul- und Faltenbildungsprobleme sollen heute nicht behandelt werden, da sie Gegenstand unserer im Januar d. Js. stattgefundenen Sandwichelemente-Tagung waren. Diese gegenwärtige Veranstaltung soll sich mit dem Werkstoff GFK befassen, d. h. soweit es sich um dünnwandige Lamine handelt, haben wir lediglich über Festigkeits- und Elastizitätsfragen zu sprechen. Der weitaus überwiegende Teil unserer seinerzeitigen Untersuchungen behandelte gleichmäßig verteilte Kraftflüsse in relativ dünnwandigen Laminen aus Glasgeweben und Harzen verschiedener Art und verschiedener Hersteller. Lamine aus Glasfasermatten hatten für unsere Zwecke keine Bedeutung und wurden nicht untersucht.

Die gewonnenen Erfahrungswerte sind die Ergebnisse folgender am Institut abgeschlossener Arbeiten:

1. 5 *F*- und *E*-Themen auf einschlägigem Gebiet
 2. 8 große Belege
 3. 16 Diplomarbeiten
 4. 1 Dissertation (im wesentlichen Sandwichproblem).
- } von ehemaligen Studenten

Mag auch vieles daraus spezifisch Flugtechnisches enthalten, was Sie wahrscheinlich weniger interessiert, so scheint mir andererseits manches so bemerkenswert zu sein, daß sich breitere Kreise dafür interessieren dürften, vor allem natürlich solche, die nicht nur Kunststoffe schlechthin verarbeiten wollen, sondern gleich uns in den GFK-Leichtbauschalen besonders interessante und aussichtsreiche Bauelemente erkennen.

2. Einfluß der Struktur auf Festigkeit und Steifigkeit

Das zweifellos interessanteste Moment dieser Art von Schalen ist die Tatsache, daß der Konstrukteur den ihm für seine Zwecke geeigneten Werkstoff, der zwar mit dem Sammelnamen GFK bezeichnet wird, der jedoch

erstaunlich variabel ist, von Fall zu Fall mit dem Bauteil mit konstruieren kann bzw. muß. Damit kommen wir zur Frage der Struktur, die neben den verwendeten Ausgangs-Werkstoffen und ihren Raum- bzw. Massenanteilen von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffkombination Glas — Harz ist.

Es ist einleuchtend, daß die Festigkeit — wenigstens bis zu einem gewissen Grade — mit dem Anteil der in Beanspruchungsrichtung liegenden Fasern wächst. Demnach hat man die geringsten Werte bei Laminaten aus Matten mit geringem Glasanteil zu erwarten und die höchsten bei Stängen

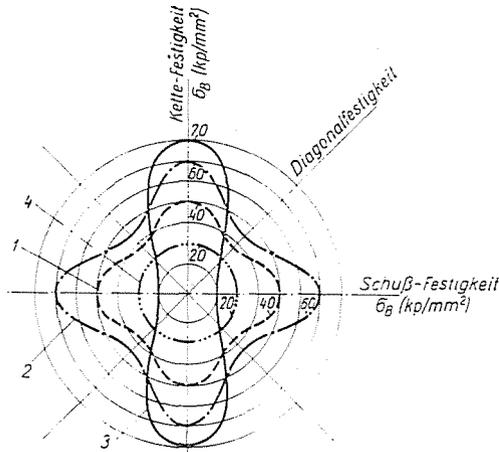


Abb. 2. Bruchfestigkeitsdiagramme von Laminaten aus verschiedenen Glasgewebearten in Abhängigkeit von der Beanspruchungsrichtung. 1. normales Gewebe, 2. H. M.-Gewebe, 3. kettverstärktes Gewebe, 4. Matte

(Rovings) mit hohem Glasanteil. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß der theoretisch mögliche Glasanteil von 88 bis 95% (je nach Anordnung der Elementarfasern) weder realisierbar noch zweckmäßig ist. Aufgeführte, aus Rovings gezogene GFK-Profile kommen meist nicht über 70% Glasmassenanteil, was man wegen der verschiedenen Dichten von Glas und Harz leicht aus der Dichte der Kombination feststellen kann. Die uns hier interessierenden dünnen Lamine werden vorzugsweise aus *Glasgeweben* hergestellt, also aus Gebilden, bei denen die Kett- und Schußfäden vorzugsweise rechtwinklig zueinander verlaufen. Bei solchen Geweben, wo beide Fadenarten gleichwertig sind (z. B. bei Leinen-, Köper- und Satinbindung) (1) erhält man in den beiden Hauptrichtungen etwa gleichgroße Festigkeiten, während die Festigkeit in allen anderen Richtungen geringer ist (Abb. 2).

Bei Geweben mit Bevorzugung einer Richtung erhält man statt des zweiachsig-symmetrischen ein nur einachsig-symmetrisches Diagramm (2), wogegen man für Lamine aus ungeordneten Glasfasermatten Diagramme in Kreisform erhalten wird (3).

Charakteristisch ist es, daß man in Diagonalrichtung stets recht mäßige Festigkeitswerte erhält. In Fällen, bei denen die Beanspruchung in die Diagonalrichtung fällt (z. B. bei Schub- bzw. Torsionsbeanspruchung) ist es angebracht, die Gewebelagen um 45° zu verkanten. Hat man es dagegen mit zusammengesetzter Beanspruchung zu tun — z. B. Zug und Schub oder Biegung und Torsion —, läßt sich die Struktur des gesamten Laminates so aufbauen, daß z. B. die Normalkraftkomponenten durch kettverstärkte Gewebe aufgenommen werden, die Tangentialkräfte dagegen durch Diagonalgewebe, die

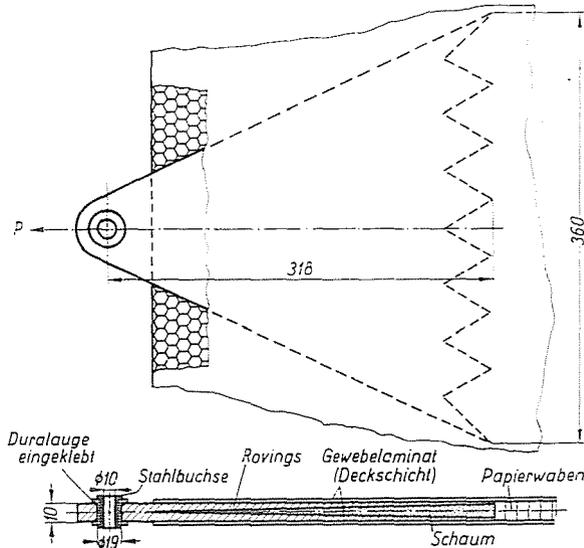


Abb. 3. Beispiel einer Krafteinleitungsstelle

man z. B. im Handauflegeverfahren ohne Mühe in beliebiger Reihenfolge über einander schichten kann, so daß die Gesamtbeanspruchung optimal aufgenommen wird.

Eine derartige Möglichkeit, den Werkstoff »nach Maß« für den jeweiligen Bedarf selbst auszulegen, ist selten und sollte daher bei den GFK vom Konstrukteur mit Freude aufgegriffen werden. Ein anderes Beispiel dafür, wie der Konstrukteur mit dem neuen Werkstoff arbeiten kann und arbeiten sollte, bieten die vielfältigen Krafteinleitungsprobleme, z. B. die Einleitung größerer Einzelkräfte in Sandwich-Schalen mit GFK-Deckschichten. Wir haben eine solche Aufgabe beispielsweise in einer Art gelöst, wie sie die Abbildungen etwas schematisiert zeigen (Abb. 3).

Der hier dargestellte Krafteinleitungspunkt dient zum Anschluß einer Fachwerkskonstruktion aus Strahlrohr an eine kegelstumpfförmige GFK-Schale. Sie hat auf der Zerreißmaschine eine Bruchlast von über 5 mp gehalten. Die schwächste Stelle war das Auge selbst.

Die Struktur der GFK-Werkstoffe steht im engen Zusammenhang mit der Verarbeitungstechnologie. Was man mit Geweben oder Strängen z. B. im Handauflegeverfahren herstellen kann, läßt sich natürlich nicht mit Matten oder Stapelfasern nachahmen, da die Festigkeitswerte und somit die Querschnitte sehr verschieden ausfallen. Eigene Versuchswerte der letzten Art haben wir nicht gewonnen, auch keine von Laminaten mit anderen Harzarten, z. B. von Phenolen, die ja in der Industrie ebenfalls eine Rolle spielen, zu ihrer Aushärtung jedoch erhöhte Temperaturen benötigen. Auch in bezug auf die eine oder die andere Technologie zur Herstellung von GFK-Schalen haben wir noch keine eigenen Erfahrungen sammeln können, wie etwa im Spritzen von Stapelfasern nach dem Zweikomponentenspritzverfahren, das jedoch nicht die für unsere Zwecke erforderlichen Leichtbauqualitäten versprach. Für den erfahrenen Leichtbaukonstrukteur ist es jedoch von Vorteil, wenn er auch in anderen Technologien und in damit erzielbaren mechanischen Werten über Erfahrungen verfügt.

Ebenso wie für die erzielbare Festigkeit ist die Struktur unseres Schalenaufbaues auch auf die Elastizität von starkem Einfluß. Grundsätzlich liegen die E -Modulen von GFK und leider auch die bezogenen E -Modulen (Elastizitätslängen) ziemlich niedrig. Der zu Anfang gemachte Vergleich zeigte, daß der Wert 1000 km (s. Abb. 1) weniger als 40% der Werte von Dural und St 60 betrug. Freilich ließe sich der Wert durch geeignetere Gewebearten, evtl. auch durch Übergang zu vorgereckten Fasernsträngen, verbessern; grundsätzlich besteht jedoch in dieser Hinsicht stets eine Schwäche von GFK, was anfangs schon zu der Feststellung führte, daß es schwierig ist, in GFK steif zu bauen. Einige Zahlen mögen das nochmals erläutern (Abb. 4).

Einfluß der Glasart und -verarbeitung auf die Elastizitätslänge E/γ

Werkstoff	E -modul $E \cdot 10^{-6}$ kp/cm ²	Wichte γ kp/dm ³	E -Länge E/γ km
Mattenlaminat	0.100	1,55	645
Gewebelaminat	0.180	1,8	1000
Roving-Profil	0.400	1,9	2100
Spezial-»E«-Glas (ohne Harz)	0.750	2,6	2880
Stahl St 60.11 (zum Vergleich)	2.100	7,8	2690

Abb. 4

Man erkennt, daß die E -Länge um so geringer ist, je kleiner die Wichte des Laminates, also je geringer der Glasgehalt ist. Man wird folglich (bei gleichbleibendem Massenaufwand) um so steifer bauen, je hochwertiger das Material ist, was aber zugleich eine Verteuerung bedeutet. Die Forderung

nach Leichtbau bedingt bei gewissen Beanspruchungsarten, z. B. bei Biegung, Knicken, Torsion, einen weiteren *konstruktiven* Aufwand, damit man zu Querschnitten hoher Trägheitsmomente bei kleinem Querschnitt kommt. Im Zusammenhang mit den hier angeschnittenen Problemen sei gesagt, daß der Konstrukteur sich die Frage zu überlegen hat, was er hinsichtlich der günstigsten Querschnittsgestaltung aus den gewählten GFK-Kombinationen herausholen kann. Kommt man bei diesen Überlegungen zu sehr kleinen Wandstärken, so ist zu bedenken, ob diese auch allen vorkommenden Stabilitätsanforderungen gewachsen sein werden.

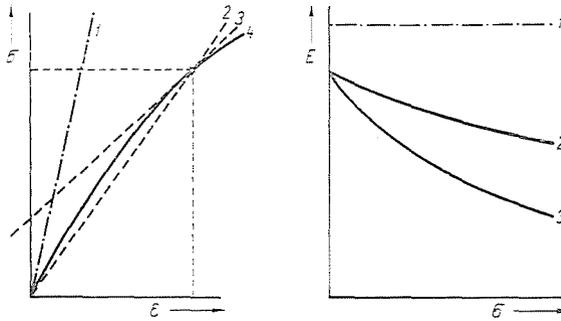


Abb. 5. Charakteristisches Spannungs-Dehnungsschaubild von GFK (links) und E -Verlauf (rechts), schematisch! Kurven gelten für: bestimmten Glasgehalt sowie für bestimmte Gewebeart und Faserrichtung

- | | |
|----------------------|---------------|
| 1. reine Glasfasern, | } der Kurve 4 |
| 2. Sekantenmodul. | |
| 3. Tangentenmodul. | |
| 4. Gewebe-Laminat | |

Wenn man für eine bestimmte GFK-Auslegung den E -Modul festgelegt findet, so darf man nicht vergessen, daß GFK grundsätzlich kein homogenes Material ist. Selbst wenn man Lamine aus Geweben in Richtung der Kett- oder Schußfäden beansprucht, so nimmt der E -Modul mit zunehmender Spannung langsam ab, was seine Ursache darin haben dürfte, daß sich die beanspruchten Fäden gerade zu recken versuchen. Bei diagonal beanspruchten Laminaten gilt das in verstärktem Maße, und weiterhin kann man gleiches für den G -Modul feststellen. Daher ist es angebracht, bei vorliegenden allzu eindeutigen Angaben über das elastische Verhalten zu prüfen, welcher E - bzw. G -Modul gemeint war. Man darf sich nicht durch die Tatsache verleiten lassen, daß die Glasfaser an sich sehr genau dem Hookeschen Gesetz gehorcht (Abb. 5).

Auf dieser Überlegung beruht die Struktur der Hochmodulgewebe (Abb. 6).

3. Vorschläge zur Festigkeitsrechnung von Laminaten

Beim Konstruieren mit dünnen GFK-Laminaten bzw. bei der Bestimmung des beanspruchten Querschnittes eines Prüfkörpers aus dünnen Laminaten treten praktische Schwierigkeiten auf.

Der örtliche Querschnitt des Laminates ist (besonders beim Handauflegeverfahren) nicht konstant, sondern vom örtlichen Harzgehalt abhängig, der recht ungleichmäßig ausfallen kann. Für die Festigkeit maßgebend ist aber der Glasgehalt und sehr wenig der Harzgehalt. Man hat daher den Versuch unternommen, von der Querschnittseinheit (mm^2 bzw. cm^2) abzugehen und die Belastung zu beziehen auf die Anzahl n der im Querschnitt enthal-

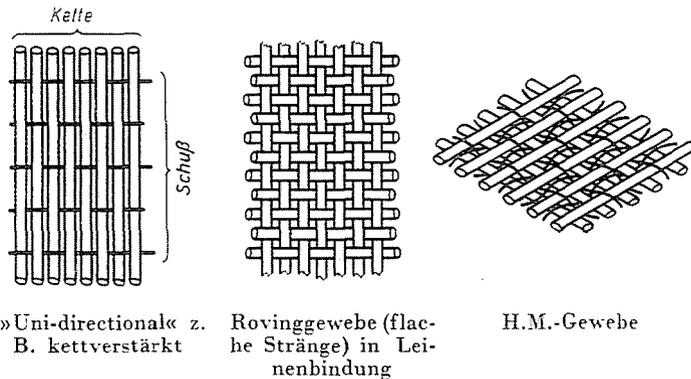


Abb. 6. Glas-Spezialgewebe zur Herstellung hochwertiger Laminat-

tenen Gewebelagen. Anstatt der üblichen Normalspannungsformel

$$\sigma = \frac{P}{f} = \frac{P}{b \cdot s} \left[\frac{K_p}{\text{cm}^2} \right]$$

wäre zweckmäßiger zu setzen:

(Abb. 7)

$$\sigma^* = \frac{P}{b \cdot n} \left[\frac{K_p}{\text{cm}} \right],$$

d. h. also die Belastbarkeit von 1 cm Gewebebreite.

Ganz ähnliche Manipulationen ließen sich für die Schubspannung τ , den E -Modul und den G -Modul vornehmen; dagegen dürfte dies für Festigkeitsrechnungen mit nicht gleichmäßiger Querschnittsbeanspruchung auf Schwierigkeiten stoßen, z. B. bei vollem Biege-Querschnitt. Jedoch sind solche schlecht ausgenützte Querschnitte für den Leichtbau ohnehin nicht von Interesse. Die aufgelösten Biegequerschnitte der Leichtbaukonstruktionen lassen dagegen das neue Verfahren um so mehr zu, je geringer das Verhältnis Gurthöhe zu Trägerhöhe ist.

Dieser Vorschlag hat zweifellos den Vorzug, daß man konkretere Festigkeitsunterlagen in der Hand hat, indem man vom schwankenden Glasgehalt fast unabhängig wird. Allerdings setzt er voraus, daß sich die Gesamtstärke des Laminates aus n gleichartigen Lagen zusammensetzt. Wo das nicht der Fall ist, etwa dort, wo Lagen aus verschiedenen Webarten oder mit verschiedenen Faserrichtungen zu einer Schale verbunden werden, erscheint es zweckmäßiger — und das ist bei den hier durchgelaufenen Arbeiten so gehandhabt worden —, die bereits festgelegte Lagenkombination der heterogen aufgebauten Schale einer nachträglichen Kontrollrechnung zu unterwerfen, indem man z. B. schreibt

$$\sigma' = \frac{P}{b \cdot \text{Schale}} \left[\frac{\text{Kp}}{\text{cm}} \right],$$

wobei σ' die je cm Schalenbreite entfallende Last darstellt. Man muß zugeben, daß derartige Aussagen wenig Allgemeingültigkeit besitzen und daß man mit

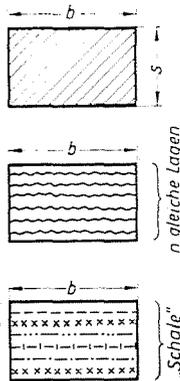


Abb. 7. Zur Definition der »bezogenen« Spannungen σ^* und σ' Querschnitt aus:

1. homogenem Werkstoff $\cdot \sigma = \frac{P}{b \cdot s} \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$
gleichmäßige Spannungsverteilung

2. geschichtetem Werkstoff $\sigma^* = \frac{P}{b \cdot n} \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}} \right]$
aus n gleichen Lagen
 σ^* ist die Tragfähigkeit von 1 cm Gewebebreite

3. geschichtetem Werkstoff $\sigma' = \frac{P}{\text{Schale} \cdot b} \left[\frac{\text{kp}}{\text{cm}} \right]$
aus verschiedenen Lagen beliebiger Anordnung
 σ' ist die Tragfähigkeit von 1 cm Schalenbreite

solchen Rechnungen nicht ohne weiteres die erforderliche Dicke der Schale errechnen kann. Der erfahrene Konstrukteur kennt jedoch andere Fälle, in denen er die Dicke aus Erfahrung festlegt und hierfür eine Kontrollrechnung

anstellt. Für diese Methode spricht auch, daß man an Laborversuchen die Belastbarkeit einer beliebig aufgebauten Schale von der Breite b bestimmen kann. Somit hat man gegenüber der zuerst genannten Variante $\sigma^* = \frac{P}{b \cdot n}$ noch den Vorteil, daß man nicht an eine gleichbleibende Gewebsart und -richtung gebunden ist. In dem dimensionslosen Faktor »Schale« steckt also die Struktur des Schalenlaminates; er enthält die Anzahl, Qualität und Faser-richtung der einzelnen Lagen, wobei jedoch keine einengenden Vorschriften über den Glasgehalt oder über die genaue Dicke der Schale gemacht werden sollen, soweit das nicht aus anderen Gründen erforderlich ist.

Beim Festigkeitsnachweis von Biege- und Torsionsbalken mit laufenden oder punktförmig angreifenden Lasten ist bekanntlich eine kontinuierliche bzw. sprungartig veränderliche Stärke der tragenden Querschnitte erforderlich. Diese Aufgabe erfüllt ein GFK-Gewebe-Laminat sehr gut; denn es ist einfach, die Anzahl der Gewebelagen längs der Länge des Balkens nach Belieben abnehmen zu lassen. Auch insofern erfüllt GFK die Anforderungen an Leichtbauwerkstoffe; denn das Ausdimensionieren der verschiedensten Querschnittslagen macht keinerlei Schwierigkeiten. Sofern man die Kontrolle für die Festigkeitsrechnung nach dem letztgenannten Verfahren machen möchte, ist allerdings zu bemerken, daß man dann die Tragfähigkeit jeder einzelnen »Schalen«-Art, die im Verlauf der gesamten Länge vorkommt, kennen muß. Praktisch kommen allerdings weitere Probleme hinzu, wenn es sich um die Druckzone von Biegebalken oder wenn es sich um auf Torsion beanspruchte dünnwandige Hohlquerschnitte handelt. Es sind die bereits erwähnten Stabilitätsprobleme Knittern, Knicken, Beulen und Faltenbildung, die durch geeignete Maßnahmen zu unterbinden sind, die jedoch, wie gesagt, im Rahmen dieses Vortrages nicht erörtert werden sollen.

4. Zusammenfassung

GFK ist ein für den Bau hochbeanspruchter Schalen geeigneter Werkstoff, wenn er entsprechend der jeweiligen Höhe und Art der Beanspruchung richtig ausgelegt ist. Dabei kommt dem Konstrukteur die fast einmalige Tatsache zugute, daß er den Werkstoff selbst konstruieren kann, was besagt, daß er es in der Hand hat, Parameter wie Glasgehalt, Faserstärke und -richtung, Webart, Harzsorte, Aktivatoren, Aushärte- und -temperatur etc. so zu wählen, daß ein optimales Verhältnis zwischen den zu erzielenden mechanischen (und evtl. thermischen, elektrischen, chemischen u. a.) Eigenschaften und den erforderlichen Aufwendungen für Material-, Lohn- und Gemeinkosten zustande kommt.

GFK ist etwa 1,6mal leichter als Alu-Legierungen und etwa 4,5mal leichter als Stahl, so daß sich bei gleichen Gewichten Laminat von entsprechend größerer Wandstärke ergeben, was der örtlichen Steifigkeit zugute kommt. Wegen der hohen Festigkeit von GFK läßt sich jedoch leichter bauen, soweit der leider nur geringe E - bzw. G -Modul von GFK eine Wandstärkenreduktion zuläßt. Auf anderweitige Beschränkungen der Wandstärke durch Stabilitätskriterien (Falten, Beulen etc.) wurde hingewiesen, ohne daß sie in diesem Zusammenhang behandelt worden wären.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der die Verwendung von GFK empfehlenswert macht, ist die sehr hochwertige und bequeme Fügenmöglichkeit durch Kleben, die den Forderungen

des Leichtbaus besser entspricht als Schraub- und Nietverbindungen, die natürlich gleichfalls möglich sind.

Dieser einleitende Vortrag sollte Ihnen einige vom normalen Konstruieren mit genormten Werkstoffen abweichende Vorstellung vermitteln. Ich wollte Ihnen zeigen, daß es nicht unbedeutliche Schwierigkeiten gibt, wenn man mit GFK leicht bauen will, daß es aber noch schwieriger ist, wenn man zugleich steif bauen will. Das bedingt sehr hochwertige Werkstoffe, speziell ausgelegte Schalenstrukturen und in vielen Fällen örtliche Aussteifungen der Schalen, Maßnahmen also, die die Fertigung verteuern. Auf der anderen Seite haben komplizierte Schalenformen aus GFK den großen Vorzug, daß sie sich mit billigen Vorrichtungen einwandfrei herstellen lassen.

Ob GFK für die Fertigung hochbeanspruchter Schalen als zweckmäßig anzusehen ist, muß ein sorgfältiges Abwägen aller Gesichtspunkte von Fall zu Fall entscheiden.

Absichtlich sind konkrete Angaben über Festigkeiten, Technologien etc. in diesem Vortrag vermieden worden, da diese Probleme in den nachfolgenden Vorträgen eingehend erörtert werden. Daß es sich dabei um ernsthafte Probleme handelt, die das Wissen und Können erstklassiger Ingenieure erfordern, das war meine Absicht, Ihnen in diesen Ausführungen klarzulegen.

Prof. Dipl. Ing. Hermann Landmann, Dresden, A. 16 Dürer Str. 26.
DDR.