

6 Wichtige Kenngrößen der Einzelschichten und des Laminats

6.1 Relativer Faservolumenanteil

Es ist leicht einsehbar, dass die Eigenschaften von Einzelschichten und von Laminaten – z.B. Steifigkeit, Festigkeit, thermische Ausdehnung usw. – von den Eigenschaften der Einzelkomponenten Fasern und Matrix und *zusätzlich* auch von deren Anteilen im Verbund abhängen. Insbesondere der *Anteil der Fasern* ist für die Festigkeit und Steifigkeit unmittelbar von Bedeutung. Der Faseranteil ist daher einer der wichtigsten, vom Konstrukteur gezielt einstellbaren *Konstruktionsparameter*! Er findet sich in vielen grundlegenden Berechnungsformeln.

Der Begriff des Dimensionierens hat in der Faserverbundtechnik eine etwas andere Bedeutung, als man es von metallischen Strukturen her gewohnt ist. Beim Laminatentwurf dimensioniert der Konstrukteur primär *Fasermengen*. Dies sind diejenige Anzahl an Rovings oder Gewebeschichten, die notwendig ist, um dem Laminat die erforderlichen Steifigkeiten und Festigkeiten zu geben. Die Wanddicke ist zunächst einmal unwichtig. Allgemein ist es im Ingenieurwesen jedoch gängige Praxis, die Wanddicke zu dimensionieren. Diese Vorgehensweise hat man auch für die Faserverbundtechnik übernommen. Wenn man jedoch die Wanddicken festlegt, dann muss man – um die notwendigen Fasermengen *sicher* zu stellen – *zusätzlich* angeben, welche Faseranteile die Wanddicke enthält. Dabei sind nicht die Massenanteile entscheidend, sondern die *Volumenanteile*. Da primär die Fasern trägt, spielt der Matrixanteil – in erster Näherung – keine Rolle. Man wird bestrebt sein, ihn zu minimieren, um Gewicht und Werkstoffkosten zu sparen. Als „Standard“ hat sich bei vielen hoch beanspruchten Strukturbauteilen ein Faservolumenanteil von 60%, demzufolge ein Matrixvolumenanteil von 40% als günstig herauskristallisiert. Eine Obergrenze liegt bei etwa 65%. Höhere Faseranteile sind nachteilig. Die Fasern liegen dann so dicht, dass nicht mehr alle von der Matrix vollständig benetzt und verklebt sind: Das Laminat ist zu „trocken“.

Zur Festlegung der Fasermengen, bzw. des Faservolumenanteils φ (fiber volume fraction V_f) geht man wie folgt vor:

1. Man wählt das zum Bauteil passende Fertigungsverfahren.
2. Der erreichbare Faservolumenanteil ist mit dem Fertigungsverfahren, bzw. dem dazugehörigen Faserhalbzeug festgelegt. Mit der Prepregtechnologie und dem Wickelverfahren lässt sich der häufig gewählte „Standard“-Faservolumenanteil

- von $\varphi=0,6$ problemlos einstellen. Bei Handlaminaten erreicht man bei Geweben und mit sorgfältiger Arbeitsweise etwa $\varphi=0,4$.
3. Mit dem fertigungstechnisch bedingten Faservolumenanteil führt man die Steifigkeits- und Festigkeitsrechnungen des Laminats durch und ermittelt die notwendigen Wanddicken.
 4. Aus den errechneten Wanddicken plus dem Faservolumenanteil folgen die Fasermengen – d.h. die notwendige Anzahl der Rovings oder Gewebelagen. Man errechnet die Fasermengen aus den Gln. 6.8 und 6.10.

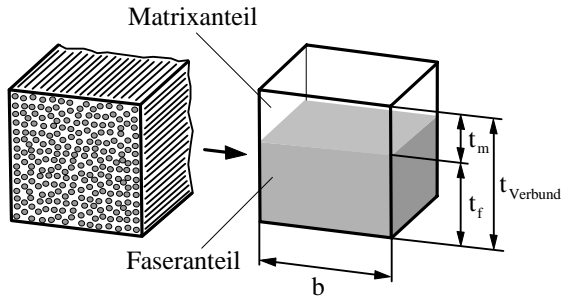


Abb. 6.1. Realer Verbund und modellhafte Aufteilung zur Ermittlung des rel. Faservolumenanteils. Hierbei sind die Volumina von Fasern und Matrix kompaktiert angenommen

Der Faseranteil wird als relativer Anteil, d.h. bezogen auf das Verbundvolumen, angegeben. Die mathematischen Beziehungen lassen sich leichter aufstellen, wenn man sich, wie in Abb. 6.1 dargestellt, die Faser- und Matrixanteile kompaktiert denkt. Da Fasern und Matrix im betrachteten Würfel gleiche Längen- und Breitenausdehnung haben, können die Volumenanteile auch aus der Laminatdicke berechnet werden. Der sog. *relative Faservolumenanteil* φ – meist abgekürzt nur als Faservolumenanteil bezeichnet – errechnet sich aus:

$$\varphi = \frac{V_f}{V_{\text{Verbund}}} = \frac{A_f}{A_{\text{Verbund}}} = \frac{t_f}{t_{\text{Verbund}}} \quad (6.1)$$

V_f = Volumen der Fasern im betrachteten Verbundvolumen

A_f = Querschnittsfläche der Fasern im betrachteten Verbundquerschnitt

Das relative, d.h. auf das Gesamtvolumen bezogene Matrixvolumen ergibt sich dann zu:

$$\frac{V_{\text{Verbund}} - V_f}{V_{\text{Verbund}}} = 1 - \varphi \quad (6.2)$$

6.1.1 Zur Bestimmung des relativen Faservolumenanteils

Es gibt verschiedene Methoden, den rel. Volumenanteil der Fasern im Verbund zu bestimmen:

1. Der rel. Faservolumenanteil wird – der Dimensionierungsrechnung folgend – vom Konstrukteur vorgegeben. Dazu gibt er in der Arbeitsanweisung für die Fertigung die für das eingesetzte Faserhalbzeug notwendige Matrixmasse an. Bei sorgfältiger Arbeitsweise wird dann der gewünschte Faservolumenanteil im Mittel eingehalten und ist damit bekannt. Bei maschineller Tränkung sind Vorversuche notwendig. Es werden das ungetränkte und das matrixgetränkte Halbzeug verwogen und die Massendifferenz in den rel. Faservolumenanteil umgerechnet (Gln. 6.3 und 6.4).
2. Bei bekanntem Längen- bzw. Flächengewicht – und damit Dicken des ungetränkten Faserhalbzeuges – kann der rel. Faservolumenanteil in guter Näherung, sozusagen *rückwärts* aus der Dicke des ausgehärteten Verbunds errechnet werden. Dazu stellt man entweder Gl. 6.8 oder Gl. 6.10 nach ϕ um.
3. Am zuverlässigsten – dies ist die am häufigsten angewandte Methode – ermittelt man den rel. Faservolumenanteil experimentell am tatsächlich gefertigten, also ausgehärteten Laminat. Fasern und Matrix werden dazu voneinander getrennt. Die Proben entnimmt man bei noch zu verwendenden Bauteilen aus abgeschnittenen Randbereichen, bei Probekörpern an denen Festigkeiten ermittelt wurden, direkt aus der Nähe der Bruchstelle.
4. Bei Glasfaserlaminaten bietet es sich an, das Matrixharz im Muffelofen zu verkoken (auf wirksame Absaugung achten!). Dies ist die sogenannte Bestimmung des Glühverlusts [6.6]. Durch Verwiegen vor und nach dem Verbrennen der Matrix lassen sich der Fasermassenanteil und hieraus der Faservolumenanteil bestimmen.



Abb. 6.2. Blätter-Technik: Nach teilweiser Verkokung der Matrix lassen sich die Schichten aufblättern und Faserbrüche und Zwischenfaserbrüche studieren

5. Die Methode, das Matrixharz zu verkoken, lässt sich auch anwenden, um ein ausgehärtetes Laminat wieder in seine Einzelschichten zu zerlegen, den Laminataufbau also nachträglich sichtbar werden zu lassen. Dazu verbrennt man die Matrix nur soweit, dass noch eine geringe Haftung zwischen den Schichten verbleibt. Die Schichten lassen sich nun mit einer Pinzette nacheinander abblät-

tern (*Deply-Technique*). Schädigungen wie Faserbrüche in einzelnen Schichten, bleiben erhalten und können näher inspiziert werden. Um Delaminationen und Matrixrisse zu detektieren, müssen diese markiert werden. Dazu lässt man *vorab* eine Goldchloridlösung eindringen [6.1].

6. Der Weg, die Matrix zu verkoken, ist bei Aramidfaser-Verbunden nicht gangbar, da die Fasern beim Veraschen des Matrixharzes ebenfalls einen starken Masseverlust erleiden. Bei Laminaten mit C-Fasern ist die experimentelle Bestimmung des Faservolumenanteils durch Glühverlustbestimmung bedingt machbar [6.2], wenn man die Glühdauer kurz und die Glüh Temperatur niedrig hält. Dies gelingt am ehesten, wenn man die Proben dünnwandig, genauer mit großer Oberfläche im Verhältnis zum Volumen hält. Man minimiert damit das im Probeninneren angeordnete Volumen, das immer erst verzögert verbrennt, und damit die Glühdauer verlängert.
7. Ansonsten ist der Methode der *chemischen Extraktion*, der Oxidation der Matrix durch eine Säure, der Vorzug zu geben. Bei CFK eignet sich konzentrierte Schwefelsäure (H_2SO_4) und Wasserstoffperoxidlösung. Dies gilt nicht für AFK, da die Fasern angegriffen werden. Bei AFK ist konzentrierte Salpetersäure (HNO_3) zu verwenden. Die genaue Vorgehensweise ist [6.3] zu entnehmen.
8. Durch Wiegen vor und nach Entfernen der Matrix bestimmt man den rel. Faser-Massenanteil ψ :

$$\psi = \frac{m_f}{m_{\text{Verbund}}} \quad (6.3)$$

Die Umrechnung auf den rel. Faservolumenanteil ϕ erfolgt aus:

$$\phi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi}{\psi} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (6.4)$$

ρ_f = Dichte der Fasern

ρ_m = Dichte der Matrix

Die Dichten von Fasern und Matrix sind Datenblättern zu entnehmen oder können nach [6.4, 6.5] bestimmt werden.

9. Am Laminat stellt der nach den oben geschilderten Methoden ermittelte rel. Faservolumenanteil einen *Mittelwert* über die gesamte Probe dar. Er kann jedoch über einem Querschnitt erheblich streuen, was z.B. die örtliche Festigkeit und damit den Beginn und den Verlauf von Rissen beeinflusst. Deswegen sollte man bei der Probenentnahme den Teil heraustrennen, der für die Festigkeit relevant ist, z.B. bei einer Biegeprobe den Randbereich. Für eine noch höhere Auflösung – z.B. für mikromechanische Grundlagen-Untersuchungen – benötigt man mikroskopisch *lokale* rel. Faservolumenanteile. Sie lassen sich an Schliffen mikroskopisch durch manuelles oder EDV-gestütztes Ausplanimetrieren ermitteln.

6.1.2 Wichtige Hinweise

1. Die Fasermenge, d.h. der rel. Faservolumenanteil ist ein wichtiger *Konstruktionsparameter*. Praktisch alle Eigenschaften des Verbunds – insbesondere die Steifigkeiten, die Festigkeitswerte, die thermischen Ausdehnungen, die Feuchteaufnahme, das Langzeitverhalten usw. – sind von ihm abhängig und korrelieren mit ihm unmittelbar. Dem Konstrukteur steht mit der Wahl des Faservolumenanteils ein konstruktiver Freiraum zur Verfügung, bestimmte Eigenschaften des Verbunds gezielt einzustellen!
2. Der Faservolumenanteil ist auch im Rahmen von Qualitätskontrollen die wichtigste zu überprüfende Größe. Es geht darum, sicherzustellen, dass die benötigte Fasermenge an Rovings, Gewebeschichten usw. im Laminat vorliegt.
3. Die Angabe des rel. Faservolumenanteils ist also zur Charakterisierung einer UD-Schicht oder eines Laminats unerlässlich! Bei der Darstellung von experimentellen Ergebnissen ist daher die Fasermenge, dargestellt als rel. Faservolumenanteil, *immer* mit anzugeben! Anders ist eine Bewertung von Versuchsergebnissen oder ein Vergleich verschiedener Lamine nicht möglich.

6.2 Dichte des Verbunds

Für den Leichtbau-Konstrukteur, der die Masse seiner Struktur berechnen oder Vergleiche zu anderen Werkstoffen ziehen will, ist die Dichte (density) von besonderem Interesse. Die Dichte errechnet sich nach der *Mischungsregel* aus den Dichten der i Einzelkomponenten, gewichtet mit deren rel. Volumenanteilen:

$$\rho_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n \text{rel. Volumenanteil}_i \cdot \text{Dichte}_i \quad (6.5)$$

Im Fall des Zweikomponentensystems Faser-Matrix ergibt sich die Dichte dann zu:

$$\rho_{\text{Verbund}} = \varphi \cdot \rho_f + (1 - \varphi) \cdot \rho_m \quad (6.6)$$

Gl. 6.5 lässt sich natürlich auch nutzen, um die Dichte eines Laminats zu bestimmen, das aus unterschiedlichen Fasern besteht.

6.3 Schichtdicken und benötigte Fasermengen

Die Liefergrößen der Faser-Halbzeuge werden üblicherweise auf die Masse bezogen. Dabei ist die Feinheit bei Rovings in *tex*, d.h. Masse/Länge (Einheit g/km), bei Geweben als *Flächengewicht*, d.h. Masse/Fläche (Einheit g/m²) angegeben. Um festzulegen, wie viele Roving- oder Gewebeschichten notwendig sind, um die

gewünschte Gesamtwanddicke zu erreichen, muss der Konstrukteur vorab die Dicke der Einzelschicht (layer thickness) ermitteln. Die Dicke einer einzelnen *UD-Rovingschicht* – hierbei muss die Breite *b*, mit der sich der matrixgetränkte Roving bei der Verarbeitung ablegt, vorab durch einen Versuch bestimmt werden – errechnet sich aus der vom Faserhersteller angegebenen Roving-Feinheit zu:

$$t_{\text{Verbund}} = \frac{t_f}{\varphi} = \frac{A_f}{b \cdot \varphi} = \frac{V_f}{L \cdot b \cdot \varphi} = \frac{1}{\rho_f} \cdot \left(\frac{m_f}{L} \right) \cdot \frac{1}{b \cdot \varphi} \quad (6.7)$$

$\left(\frac{m_f}{L} \right)$ = Roving-Feinheit in tex, d.h. in g/km

A_f = Querschnitt des Faseranteils des Rovings

V_f = Faservolumen

Häufig liegt der Fall vor, dass ein errechneter, geforderter Querschnitt A_{soll} mit Rovings gefüllt werden muss, z.B. im Gurt eines Flugzeugholms oder einer Schlaufe. Gl. 6.7 lässt sich leicht umschreiben, um eine benötigte Rovingzahl *n* an die Fertigungsabteilung zu übermitteln:

$$n = A_{\text{soll}} \cdot \frac{\rho_f \cdot \varphi}{\left(\frac{m_f}{L} \right)} \quad (6.8)$$

Für die gängigsten Roving-Feinheiten sind die Querschnitte in Abb. 6.3 aufgetragen. Gut merkbar ist, dass die Rovingquerschnitte der am häufigsten eingesetzten Feinheiten, C-Faser-Rovings mit 12 k und Glasfaser-Rovings mit 1200 tex, gleich groß sind.

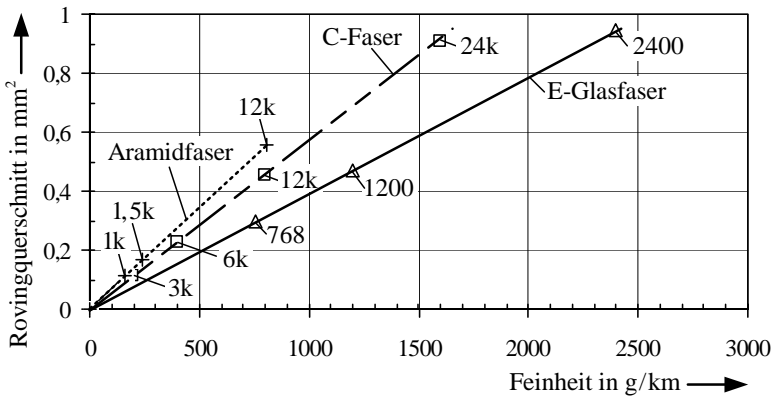


Abb. 6.3. Rovingquerschnitte in Abhängigkeit von der Strangfeinheit

Die Dicke einer einzelnen *Gewebe-* oder *Gelegeschicht* errechnet sich aus dem Flächengewicht zu:

$$t_{\text{Verbund}} = \frac{A_f}{b \cdot \varphi} = \frac{V_f}{L \cdot b \cdot \varphi} = \frac{1}{\rho_f} \cdot \left(\frac{m_f}{L \cdot b} \right) \cdot \frac{1}{\varphi} \quad (6.9)$$

$\left(\frac{m_f}{L \cdot b} \right) = \text{Flächengewicht des ungetränkten Gewebes}$

Gl. 6.9 umgestellt lässt sich nutzen, um bei vorgegebener Sollwanddicke eines Laminats t_{Soll} die zur Lastaufnahme notwendige und von der Fertigungsabteilung zu stapelnde Anzahl von Gewebe- oder Gelegeschichten zu bestimmen:

$$n = t_{\text{Soll}} \cdot \varphi \cdot \frac{\rho_f}{\left(\frac{m_f}{L \cdot b} \right)} \quad (6.10)$$

6.4 Benötigte Matrixmenge

Nachdem der Konstrukteur die entscheidende Größe – die benötigte Fasermenge – ermittelt hat, legt er für die Fertigungsabteilung die Matrixmenge fest, damit der vorgesehene Faservolumenanteil im Mittel eingehalten wird. Vorab ist der Faservolumenanteil in den rel. Faser-Massenanteile ψ und den rel. Matrix-Massenanteile $(1-\psi)$ umzurechnen:

$$\psi = \frac{\rho_f \cdot \varphi}{\rho_f \cdot \varphi + \rho_m (1 - \varphi)} \quad (6.11)$$

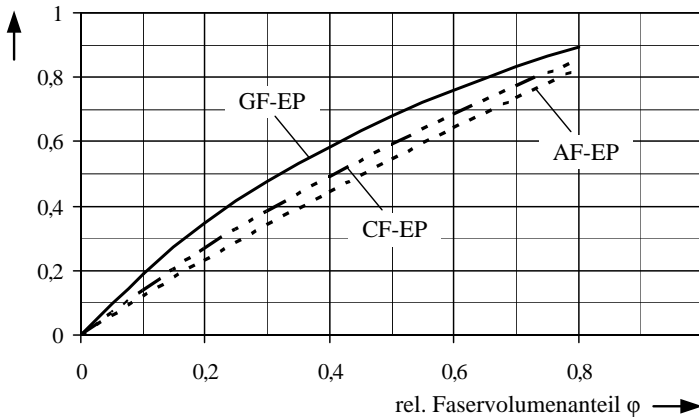


Abb. 6.4. Zusammenhang zwischen dem rel. Faservolumen- und dem rel. Fasermassenanteil (gerechnet für die Dichte eines Epoxidharzes $\rho_m=1,2 \text{ g/cm}^3$)

Um eine Vorstellung von den quantitativen Größenordnungen zu geben, ist in Abb. 6.4 der nichtlineare Zusammenhang zwischen dem rel. Faservolumen- und dem rel. Fasermassenanteil dargestellt.

Die für das Laminat zugeschnittene Faser­masse m_f wird gewogen oder aus dem Längen- bzw. Flächengewicht errechnet. Die für einen bestimmten Faservolumenanteil benötigte Matrix­masse m_m errechnet sich dann aus:

$$\frac{m_m}{m_f} = \frac{(1-\psi)}{\psi} \rightarrow m_m = m_f \cdot \frac{\rho_m (1-\phi)}{\rho_f \phi} \quad (6.12)$$

6.5 Mischpreis

Um verschiedene Faser-Matrix-Kombinationen preislich miteinander vergleichen oder um Kalkulationen durchführen zu können, muss der sogenannte *Mischpreis* d.h. der Verbundpreis/Masse errechnet werden. Die Preise der Einzelkomponenten – wie z.B. Gewebe – liegen üblicherweise massebezogen vor. Damit errechnet sich der Mischpreis entsprechend der i relativen Massenanteile der Einzelkomponenten nach der Mischungsregel:

$$\frac{\text{Mischpreis}}{\text{Masse}} = \sum_{i=1}^n \text{rel. Massenanteil}_i \cdot \left(\frac{\text{Preis}}{\text{Masse}} \right)_i \quad (6.13)$$

Im meist vorliegenden Zweikomponenten-Fall von Fasern und Matrix vereinfacht sich Gl. 6.13 und der Mischpreis ergibt sich aus:

$$\frac{\text{Mischpreis}}{\text{Masse}} = \psi \cdot \left(\frac{\text{Faserhalbzeugpreis}}{\text{Masse}} \right) + (1-\psi) \cdot \left(\frac{\text{Matrixpreis}}{\text{Masse}} \right) \quad (6.14)$$

Literatur

- 6.1 Freeman S (1982) Characterisation of Lamina and Interlaminar Damage in Graphite/Epoxy Composites by the Deply Technique In: Composite Materials: Testing and Design. ASTM STP 787, 50-62
- 6.2 Niederstadt G, Däppen W (1973) Verarbeitungs- und Fertigungsfragen von Kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (KFK). Kunststoff-Rundschau 20, 353-359

Normen

- 6.3 DIN EN 2564 (1998) Kohlenstoffaser-Lamine. Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

- 6.4 DIN 53 479 (1976) Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren: Bestimmung der Dichte
- 6.5 DIN 65569 (1992) Verstärkungsfasern. Bestimmung der Dichte von Filamentgarnen. Auftriebsverfahren
- 6.6 DIN EN ISO 1172 (1998) Prepregs, Formmassen und Laminat: Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts