HANSER

Faserverbund-Kunststoffe

Gottfried Wilhelm Ehrenstein

Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften

ISBN 3-446-22716-4

Leseprobe

4 FASERN IM VERBUND

4.1 Bedingungen für die Verstärkungswirkung (nach Puck)

Verstärken ist das Erhöhen der Festigkeit eines Grundwerkstoffs durch Einbetten von Verstärkungsmaterial, dabei müssen [40]

die Verstärkungsfasern eine höhere Festigkeit

$$\boxed{\sigma_{fB} > \sigma_{mB}}$$

und eine höhere Steifigkeit als die Matrix haben.

$$\boxed{E_f > E_m}$$

Die Matrix soll nicht vor den Fasern brechen.

$$\boxed{\varepsilon_{mB} \geq \varepsilon_{fB}}$$

mit: f = Faser
m = Matrix
B = Bruch

4.2 Beanspruchung in Richtung der Fasern

4.2.1 Endlose Fasern

4.2.1.1 Einzelfaser und Matrix

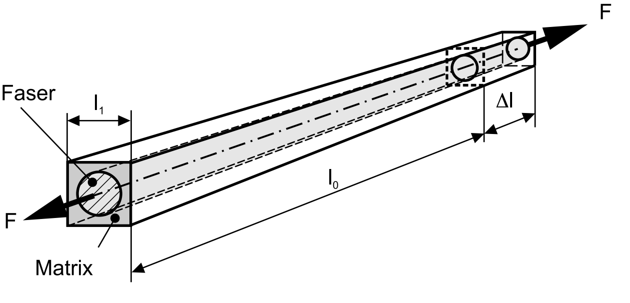

Bild 4.1: Eingebettete Einzelfaser

Aus Bild 4.1 läßt sich das Kräftegleichgewicht

$$F = F_f + F_m$$

$$\sigma_{II} \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \qquad A = \text{Fläche}$$

und die Dehnungskompatibilität des Faser-Matrix-Modells

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_{II} = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

herleiten.

Das einachsige Stoffgesetz für Fasern und Matrix lautet (gilt exakt nur für gleiche Querkotraktionen von Faser und Matrix $\upsilon_f = \upsilon_m$):

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m$$

Da $\varepsilon_f = \varepsilon_m$ sein muß, folgt zwangsläufig die Quotientengleichung

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m}$$

d.h. die Spannungshöhe in den einzelnen Komponenten entspricht ihrem Steifigkeitsverhältnis. Da das Verhältnis der E-Moduln von Glasfasern ($\approx$ 75.000 N/mm^2) zu den üblichen Kunststoffen ($\approx$ 2.000-3.000 N/mm^2) ungefähr dem Verhältnis der Festigkeiten entspricht ($\sigma_{fB} \approx$ 1.500 N/mm^2; $\sigma_{mB} \approx$ 40-60 N/mm^2), sind Glasfasern aus mechanischen Gründen ein ideales Verstärkungsmaterial für Kunststoffe.

Nach Einsetzen der obigen Stoffgesetze in das Kräftegleichgewicht ergibt sich

$$\sigma_{II} \cdot A = (E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m) \cdot \varepsilon_{II}$$

Das Ersetzen der Verbundspannung durch das Verbund-Stoffgesetz führt zu

$$\sigma_{II} = E_{II} \cdot \varepsilon_{II} \rightarrow \underbrace{E_{II} \cdot \varepsilon_{II} \cdot A}_{\text{Verbund}} = \underbrace{\left(E_f \cdot A_f + E_m \cdot A_m\right)}_{\text{Komponenten}} \cdot \varepsilon_{II}$$

so daß sich unter Verwendung des relativen Faservolumenanteils $\varphi_f = A_f/A$ der E-Modul des Verbundes in Faserrichtung aus den Werten der Komponenten Faser und Matrix gut abschätzen läßt mittels

$$E_{II} = E_f \cdot \frac{A_f}{A} + E_m \cdot \left(1 - \frac{A_f}{A}\right) = E_f \cdot \varphi_f + E_m \cdot (1 - \varphi_f)$$

Wegen gleicher Länge l_0 läßt sich der Faservolumenanteil φ_f formulieren

$$\varphi_f = \frac{V_f}{V} = \frac{A_f}{A}$$

und der Matrixvolumenanteil $1-\varphi$

$$1-\varphi_f = \frac{V_m}{V} = \frac{A_m}{A} = \frac{A-A_f}{A}$$

In der Praxis läßt sich der Faseranteil leichter als der Gewichtsanteil ψ bestimmen[3]

$$\varphi_f = \frac{1}{1+\frac{1-\psi}{\psi}\cdot\frac{\rho_f}{\rho_m}}$$

Dabei ist ρ_f je nach verwendeter Faser:

ρ_{Glas} = 2,60 g/cm^3
ρ_{Aramid} = 1,45 g/cm^3
$\rho_{C\text{-}Faser}$ = 1,80 g/cm^3
ρ_m = Dichte der Matrix

4.2.1.2 UD-Verbund

Beim Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Kurven eines Glas- und eines C-Faser-Laminates bei Belastung in Faserrichtung zeigt sich die höhere Festigkeit und Steifigkeit der C-Faser. Die sich mit zunehmender Spannung überproportional erhöhende Steifigkeit der C-Fasern ist deutlich erkennbar. Das Glasfaserlaminat zeigt dagegen über einen großen Bereich einen linearen Kurvenverlauf. Gegen Ende sinkt wegen der zunehmenden Brüche einzelner Fasern die Steifigkeit degressiv ab.

Steifigkeit und die Festigkeitskennwerte werden bei einer Faserorientierung parallel zur Lastrichtung hauptsächlich durch die Faser bestimmt. Der E-Modul E_{II} und die Bruch-spannung σ_{IIB} lassen sich mit der Mischungsregel

$$E_{II} = \varphi_f \cdot E_f + \varphi_m \cdot E_m \approx \varphi_f \cdot E_f$$
$$\sigma_{IIB} = (\varphi_f \cdot \sigma_f + \varphi_m \cdot \sigma_m)_B \approx \varphi_f \cdot \sigma_{fB}$$

abschätzen, wobei φ der Volumenanteil ist. Die Indizes m und f stehen für Matrix und Faser.

Das Hauptproblem bei der Berechnung der Bruchspannung des Verbundes ist die Streuung der Faserfestigkeiten. Nicht alle Fasern erreichen ihre Bruchfestigkeit zur selben Zeit; die

---

[3] Bei der Fertigung wird der Anteil der Komponenten gewogen, ebenso bei der Kontrolle durch Veraschen, daher werden gewichtsbezogene Angaben bevorzugt. Bei der Dimensionierung benötigt man die geometrische Angabe des Volumens oder der Fläche, Spannung und E-Modul sind flächenbezogene Größen.

schwächsten Fasern brechen zuerst und induzieren somit zusätzliche Spannungen in den anderen Fasern. So ist z.B. die Bruchkraft eines Rovings (nur Fasern) deutlich geringer als die Summe der Bruchkräfte der Einzelfasern.

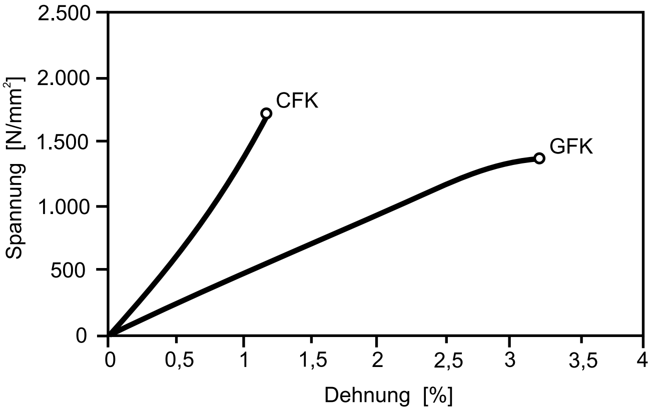

Bild 4.2: Spannungs-Dehnungs-Kurve bei [0 °]-UD-Laminaten

Die Kurve des Kohlenstoff-Faserlaminates zeigt einen progressiven Verlauf, während die Kurve bei dem Glasfaserlaminat quasi-linear ist [42]

Man kann den Unterschied in der Festigkeit auch so erklären, daß die Einspannlänge beim Roving vielfach länger ist als bei der eingebetteten Faser, bei der sie gegen Null geht. Je kürzer die Einspannlänge ist, desto höher ist die Faserfestigkeit (3. Paradoxon der Werkstoffe). Die Auswirkung der immer vorhandenen Fehlstellen ist gravierender. Aus der Bruchspannung des Laminates und dem Faservolumengehalt φ_f läßt sich somit mit vorstehendem Mikromechanik-Modell auf die Faserfestigkeit σ_B im Laminat schließen. Der erhaltene Wert ist modellabhängig, was aber in der Regel kein Problem verursacht, weil man den Weg makro- (oder auch meso-) mechanischer Verbund $\leftrightarrow$ mikromechanische Komponenten Faser und Matrix hin- und zurückgeht.

Vergleicht man diese Faserfestigkeit im Laminat mit Bruchspannungen gemessen an reinen Faserbündeln, z.B. Rovings, zeigt sich, daß die Faserfestigkeit im Laminat höher ist als die Faserfestigkeit des Rovings ohne Matrix (fehlstellenbestimmte Spannungsspitzen werden nicht abgemildert) σ_{fL}/σ_{fR}, Tabelle 4.1.

	Faserfestigkeit im Laminat σ_{fL} [N/mm^2]	**Faserfestigkeit des Rovings σ_{fR} [N/mm^2]**	**σ_{fL}/σ_{fR}**
Glasfaser	2.000	1.400	1,42
C-Faser I	2.800	1.850	1,51
C-Faser II	4.180	2.320	1,80

Tabelle 4.1: Vergleich von Faserfestigkeiten im UD-Laminat σ_{fL} und eines Rovings σ_{fR} ohne Matrix [42]

4.2.1.3 Faserbruch

Durch die Einbettung der Fasern in der Matrix erhält man eine Erhöhung der Festigkeit. Bricht eine Faser, wird die Last über Schubspannungen an die benachbarten Fasern übertragen und wird zusätzlich von diesen Fasern mitaufgenommen.

Die gebrochene Faser fällt somit nur auf einem Teilbereich ihrer Länge für die Lastaufnahme aus. Es ergibt sich ein echter synergistischer Effekt. Wie stark dieser Effekt in Erscheinung tritt, ist von der Grenzflächenfestigkeit abhängig.

Ist keine Haftung zwischen der Matrix und der Faser vorhanden, kann auch keine Last von einer gebrochenen Faser auf die Nachbarfasern übertragen werden, und die Laminatfestigkeit entspricht der Rovingfestigkeit.

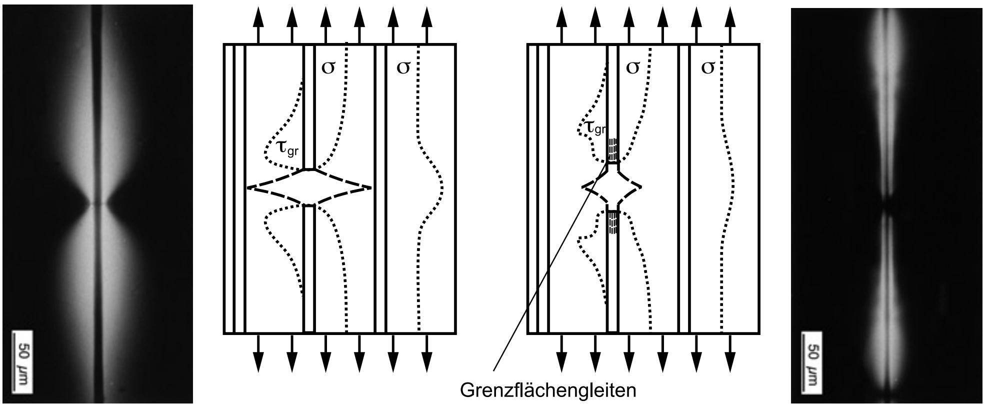

Bild 4.3: Faserbruch bei guter Haftung mit Matrixriß (links) und Grenzflächengleiten bei schlechter Haftung (rechts)
spannungsoptische Aufnahme mit Versagensmodell [42]

τ_{gr} *= Grenzflächen-Schubspannung*
σ *= Zugspannung in der Faser*

Überschreitet die Schubfestigkeit der Grenzfläche einen bestimmten Wert, kommt es bei einem Faserbruch zu Matrixrissen, Bild 4.3 links.

Dieser Riß kann auf eine Nachbarfaser treffen und durch die Spannungskonzentration an der Rißspitze zum vorzeitigen Versagen dieser Nachbarfaser führen. Es entstehen weitere Matrixrisse, die wiederum benachbarte Fasern schädigen, bis das Laminat versagt. Somit kann eine hohe Schubfestigkeit (Haftung) zu erhöhter Schubspannung am Faserende führen, die zu Rissen in der Matrix führt und die Laminatfestigkeit mindert.

Die Umsetzung mechanischer Energie bei der Delamination zwischen Faser und Matrix ist deutlich größer als die Rißbildungsenergie bei dem Matrixbruch.

Als Fazit gilt, daß für eine hohe Energieaufnahme eine mäßige Haftung mit geringeren Schubspannungen an der Faserrißstelle am günstigsten ist. Dieses wirkt sich besonders bei stoßartiger Belastung aus.