

Wissen aus erster Hand

Ueberschlägiges Dimensionieren mit Faserverbundwerkstoffen

Beispielrechnung an einem Tragflügelholm

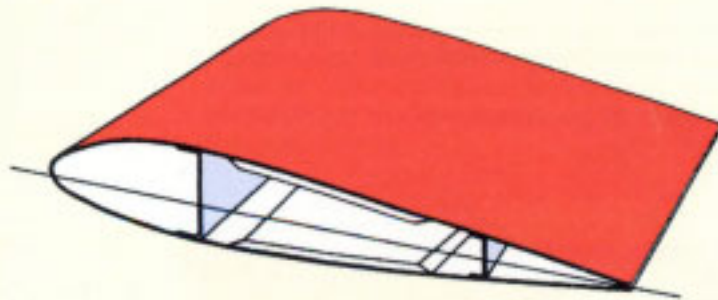
Bestell-Nr. 900.1111



von
Dipl. Ing Herbert Funke
Laboratorium für
Konstruktionslehre
Leiter: Prof. Dr.-Ing.
W. Jorden



Universität-GH
Paderborn



suter-kunststoffe ag
swiss-composite.ch

CH-3312 Fraubrunnen 031 763 60 60 Fax 763 60 61



Überschlägiges Dimensionieren mit Faserverbundwerkstoffen

Beispielrechnung an einem Tragflügelholm

(von Dipl.-Ing Herbert Funke)

1. Einführung in die Problematik
2. Aufbau eines Kunststoffschalentragflügels
3. Berechnungsbeispiel
 - a) Ermittlung der Belastungen im Tragflügel
 - b) Berechnung der Schnittlasten
 - c) Dimensionierung der Gurtquerschnitte
 - d) Ermittlung der Rovingzahl in den Gurten
 - e) Dimensionierung der Stegbeschichtung
 - f) Ermittlung der erforderlichen Gewebestärke für die Gurtbeschichtung
10. Zusammenfassung

1. Einführung in die Problematik

Fragestellung beim Dimensionieren mit Faserverbundwerkstoffen:

Welche Anzahl an Fasern sind erforderlich, damit das Bauteil den Beanspruchungen standhält?

Vorgehensweise bei einer überschlägigen Berechnung:

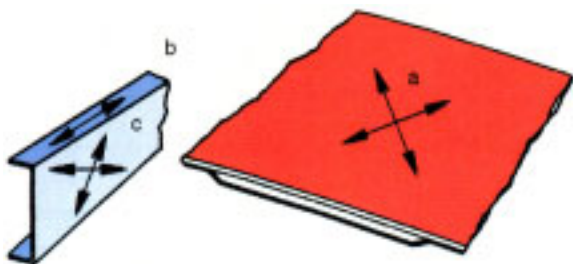
- Zunächst werden die Belastungen ermittelt.
- Die Belastungsarten werden unterschiedlichen Belastungsrichtungen zugeordnet.

Für jede Belastungsrichtung kann entsprechend gültiger Bauvorschriften die erforderliche Menge an Fasern errechnet werden.

2. Aufbau eines Kunststoffschalentragflügels

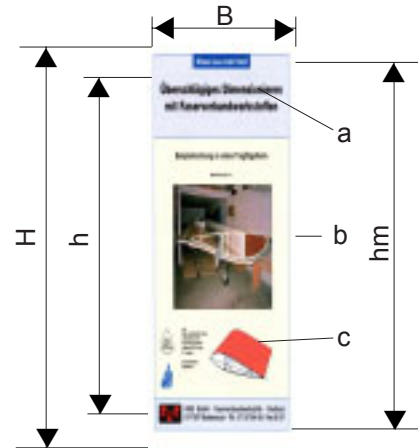


Flügelshale als geschlossenes Profil



- a) Flügelshale als geschlossenes Profil Torsion des Flügels
- b) Holmgurte Biegesteifigkeit des Flügels
- c) Schubsteg nimmt die Querkräfte auf

Aufbau eines Kastenholmes:



a) Ober- und Untergurt aus Kohlefaserrovings zur Aufnahme der Biegebelastung (Zug-Druckspannungen in Längsrichtung)

- rechnerische Bruchspannung bei einem Faservolumengehalt von 54 %

$$\sigma_{b,B} = 600 \text{ N} / \text{mm}^2$$

b) Stegbeschichtung aus Kohlefaserewebe zur Aufnahme der Querkräfte (Schubspannungen)

- rechnerische Bruchspannung bei einem Faservolumengehalt von 35%:

$$\tau_B = 114 \text{ N} / \text{mm}^2$$

c) Schaumstoffkern, um ein Ausbeulen der Stegbeschichtung zu verhindern

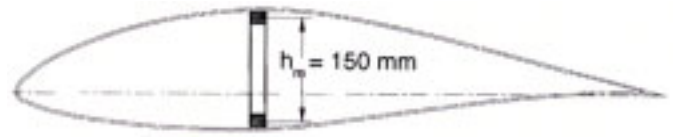
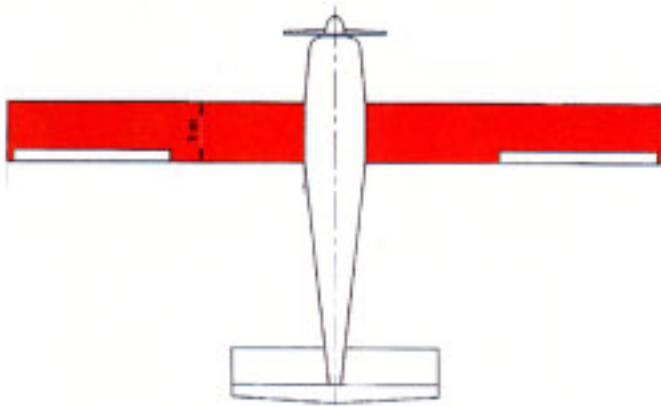
- extrudierte Schaumstoffe mit besonderen Eigenschaften

3. Berechnungsbeispiel

Es soll der Tragflügelholm eines Leichtflugzeuges als Kastenholm dimensioniert werden. Gesucht ist die Anzahl der Rovings im Ober- und Untergurt. Weiterhin ist die Anzahl der Gewebelagen für die Stegbeschichtung zu ermitteln.

3. a) Ermittlung der Belastung im Tragflügel

Gesamtabfluggewicht: 340 kg
 Eigengewicht der Tragflügel: 40 kg
 Gesamtflügelfläche: 10 m²
 Tragflügeltiefe: 1 m
 Bruchlastvielfaches: 6 g



Die mittlere Gurthöhe sei hier:

$$h_m = 150 \text{ mm}$$

Die Gurtkräfte sind:

$$F_{\text{Zug, Druck}} = \frac{\text{Moment}}{\text{Hebelarm}} = \frac{22'500 \text{ Nm}}{0,15 \text{ m}} = 150'000 \text{ N}$$

Bei einer rechnerisch zulässigen Biegebruchspannung von $\delta_{b,B} = 600 \text{ N/mm}^2$ ist folgender Gurtquerschnitt erforderlich:

$$\text{Querschn} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Spannung}} = \frac{150'000 \text{ N}}{600 \text{ N/mm}^2} = 250 \text{ mm}^2 = 2,5 \text{ cm}^2$$

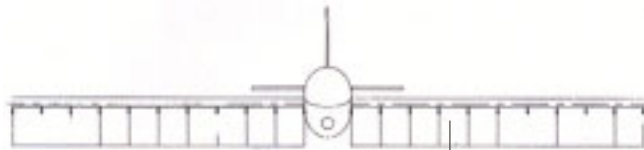
Vereinfachte Annahme: Der Tragflügel trägt sich selbst.

→ Für die Dimensionierung der Tragflügelholme ist die am Rumpf konzentrierte Masse massgeblich. Bei einem Lastvielfachen von 6 g müssen die Tragflügel folgende Auftriebskraft liefern, um den Rumpf zu tragen:

$$F = 360 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18000 \text{ N}$$

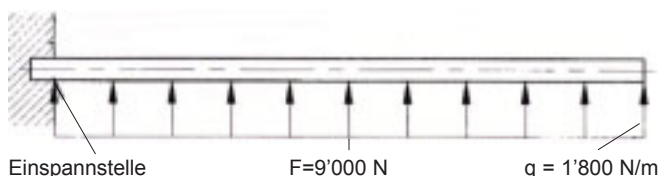
3. Berechnungsbeispiel

3. b) Berechnung der Schnittlasten



18000N verteilen sich auf 10 m $q = 1800 \text{ N/m}$

das mechanische Modell für zur Ermittlung der Schnittlasten in einer Tragflügelhälfte ist:



Die mittig anzuordnende Ersatzkraft weist zur Einspannstelle im Rumpf einen Hebelarm von 2,5 m auf.

Das Moment an der Einspannstelle ist damit:

$$9000 \text{ N} \cdot 2,5 \text{ m} = 22500 \text{ Nm}$$

Die Querkraft an der Einspannstelle ist:

$$F_Q = 9000 \text{ N}$$

3. c) Dimensionierung der Gurtquerschnitte

Bei positiver Abfanglast entstehen im Untergurt Zug- und im Obergurt Druckkräfte. Diese Kräfte bilden das Gegenmoment zum Biegemoment im Tragflügel.

3. d) Ermittlung der erforderlichen Rovinganzahl in den Gurten

Der Gurt muss mindestens die Anzahl von Kohlefaserrovings enthalten, die einem Faservolumengehalt von 54 % entsprechen. Massgeblich ist dabei nicht der Querschnitt, sondern die Anzahl korrekt verlegter und korrekt getränkter Fasern. Es werden Fasern der Stärke **1610 tex = 1610 g/km** verwendet. Bei einer Dichte $\rho_{\text{Faser}} = 1,8 \text{ g/cm}^3$ ist der Querschnitt einer einzelnen Faser:

54 % des Gurtquerschnittes sind der Faseranteil, der Rest ist der Harzanteil.

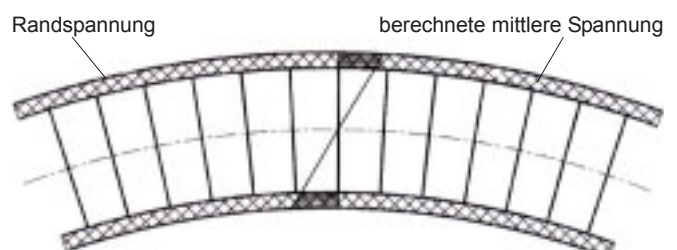
Jeder Gurt muss also folgende Anzahl der beschriebenen Rovings enthalten:

$$\begin{aligned} \text{Anzahl Rovings} &= 0,54 \frac{\text{Gesamtquerschnitt}}{\text{Querschnitt des Einzelrovings}} \\ &= \frac{2,5 \text{ cm}^2}{0,00894 \text{ cm}^2} \cdot 0,54 = 152 \end{aligned}$$

Weiterhin ist zu beachten:

- In den Holmgurten wurde die mittlere Biegespannungen berechnet. Die Randspannungen sind immer höher!

- Die aussen liegenden Fasern liefern den grössten Beitrag zur Aufnahme der Biegespannungen. Daher gilt diese Vorgehensweise nur, wenn die Fasern aussen angeordnet sind. Für eine überschlägige Vordimensionierung ist diese Vorgehensweise aber ausreichend!





3. e) Dimensionierung der Stegbeschichtung

Die beidseitige Beschichtung des Holmsteges nimmt die Querkraft im Tragflügel auf.

Die Schubspannungen in der Beschichtung sind:

$$\tau_B = \frac{\text{Querkraft}}{\text{Querschnittsfläche der Stegbeschichtung}}$$

Bei einer rechnerisch zulässigen Schubbruchspannung von $t_b = 114 \text{ N/mm}^2$ ist folgender Gesamtquerschnitt beider Stege zusammen erforderlich:

$$\begin{aligned} \text{Querschnittsfläche} &= \frac{\text{Querkraft}}{\text{Schubspannung}} \\ &= \frac{9'000 \text{ N}}{114 \text{ N/mm}^2} = 78,9 \text{ mm}^2 = \text{ca. } 80 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Die Querschnittsfläche der Stegbeschichtungen ergibt sich aus der Höhe des Holmes und der Dicke der Beschichtung. Es ist also folgende Beschichtungsstärke mindestens erforderlich:

$$\begin{aligned} \text{Beschichtungsstärke} &= \frac{\text{Querschnittsfläche}}{2 \cdot \text{Holmhöhe}} \\ &= \frac{80 \text{ mm}^2}{2 \cdot 150 \text{ mm}} = 0,27 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. f) Ermittlung der erforderlichen Gewebestärke für die Gurtbeschichtung

Die Beschichtung soll mit einem Kohlefasergewebe mit einem Flächengewicht von 125 g/m^2 erfolgen.

Eine einzelne Lage eines solchen Gewebes ergibt bei 35 % Faservolumenanteil eine Laminatstärke von:

$$\begin{aligned} \text{Lagestärke} &= \frac{\text{Flächengewicht}}{\text{Faservolumenanteil} \cdot \text{Faserdichte}} \\ &= \frac{125 \text{ g/m}^2}{0,35 \cdot 1,8 \text{ g/cm}^3} = \frac{125 \text{ gm}^2}{10'000 \text{ cm}^2 \cdot 0,35 \cdot 1,8 \text{ g/cm}^3} \\ &= 0,02 \text{ cm} = 0,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Um die oben ermittelte Beschichtungsstärke von $0,27 \text{ mm}$ zu erzielen, muss jede Seite des Holmes also mit 2 Lagen des 125 g/m^2 Kohlefasergewebes beschichtet werden. Entsprechend der Belastung (Schub müssen die Fasern in einem Winkel unter 45° zur Holmachse verlaufen).

4. Zusammenfassung

- Im vorliegenden Beispiel wurde der Holm eines Kleinflugzeuges am Rumpfübergang (am höchsten belastete Stelle) dimensioniert.

- Eine überschlägige Dimensionierung von Faserverbundstrukturen ist auch mit einfachen Mitteln und unter Zuhilfenahme einfacher Formeln möglich.

- Die in den Vorschriften genannten rechnerischen Grenzwerte gelten für bestimmte Faservolumenanteile und dürfen nicht überschritten werden.

- Massgeblich für die Festigkeit eines Bauteiles in Faserverbundbauweise ist, dass genügend Fasern in Belastungsrichtung angeordnet sind.

- Bei veränderten Faservolumenanteilen muss eine entsprechende Umrechnung erfolgen.

- Bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen muss neben einer ausreichenden Dimensionierung auf eine fasergerechte Bauteilgestaltung geachtet werden. Hier liefern die Bauvorschriften sowie Fachbücher und Anwendungsblätter der Werkstofflieferanten zahlreiche Hinweise.



Holm und Flächenschale eines UL-Nurflüglers