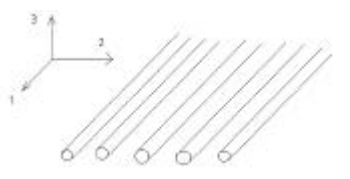


Vorlesung Kunststofftechnik

1 Einführung	2
1.1 Kriterien für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen (FVW)	2
1.2 Faserverstärkung	2
1.3 Herstellung der Verstärkungsfasern	2
1.4 Auswahl der Faser	3
2 Faserausrichtungen	4
2.1 Materialeigenschaften und Kennwerte	4
2.2 Verarbeitung von Prepregs im Autoklaven	4
2.3 3-Punkt-Biegeversuch	5
2.4 Rissausbildung	6
2.5 Beispiel: Berechnung eines zylindrischen Tanks	6
3 Aufbau der Lamine	8
3.1 Regeln zum Aufbau von Laminen aus DU-Schichten	8
4 Verarbeitungsverfahren	9
4.1 Faserverstärkte Thermoplaste	9
4.2 Faserverstärkte Duroplaste	9
4.2.1 RTM (<i>Resin Transfer Moulding</i>)	9
4.2.2 <i>Vakuuminjektionsverfahren</i>	11
4.2.3 <i>Prepregverfahren im Autoklaven</i>	12
4.3 Vergleich der Herstellungsverfahren	13
4.4 Einsatzpotentiale für FVK gegenüber Stahl/ Alu	13
4.5 Kohlestofffaserverstärkte Thermoplaste	14
5 Orthotrope Eigenschaften Werkstoffe (mit Matrizenrechnung)	15
6 Kennwerte der unidirektional verstärkten Einzelschicht	20
6.1 Einfluss von Schlagbeanspruchungen auf die mechanischen Eigenschaften	21
7 Elastomere	22

5 Werkstoffe mit orthotropen Eigenschaften



Zusammenhang zwischen E-Modul und Nachgiebigkeit (J):

in Faserrichtung

$$J_{11} = \frac{1}{E_{11}}$$

quer zur Faserrichtung

$$J_{22} = \frac{1}{E_{22}}$$

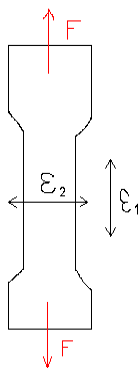
45° zur Faserrichtung

$$J_{12} = J_{21} = \frac{-n_{12}}{E_{11}} = \frac{n_{21}}{E_{22}} = \frac{\text{Querkontraktionszahl}}{E - \text{Modul}}$$

$$J_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{\text{Schub-Modul}}$$

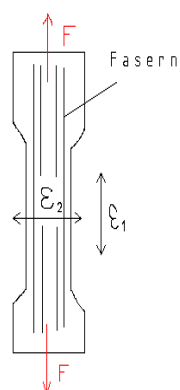
Bestimmung der Materialkonstante für isotropes Material:

⇒ E, G, ν

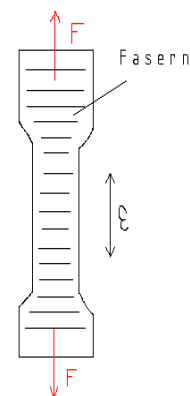


Bestimmung der Materialkonstanten für orthotropes Material:

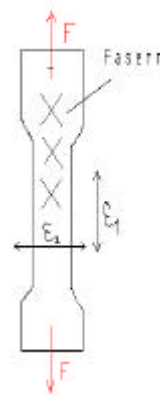
⇒ E₁₁, ν₁₂



⇒ E₂₂



⇒ G₁₂



Steifigkeit der unidirektionalen Einzelschicht

Nachgiebigkeitsmatrix für orthotropes Material. ($J_{12} = J_{21}$)

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{66} \end{bmatrix}$$

Steifigkeitsmatrix für orthotropes Material. ($C_{12} = C_{21}$)

$$[C] = [J]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

Stoffgesetz für isotropes, elastisches Material: $\sigma = E \cdot \epsilon$
 Stoffgesetz für orthotropes, elastisches Material:

$$[C] = [J]^{-1} = \begin{bmatrix} E_{11} & \frac{E_{22}}{n_{21}} & 0 \\ \frac{E_{22}}{n_{21}} & E_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}$$

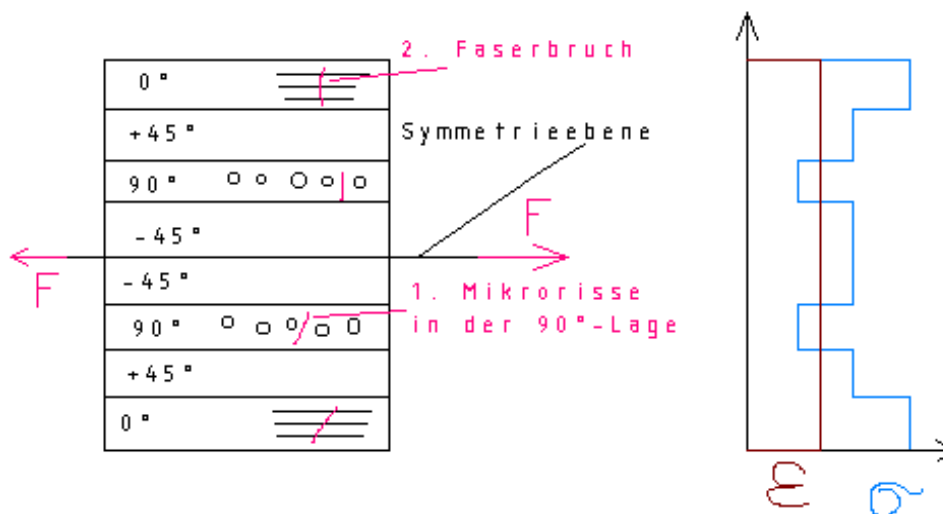
$$[s] = [C] \cdot [e]$$

$$[e] = [J] \cdot [s]$$

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ t_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ n_{12} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ n_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ t_{12} \end{bmatrix}$$

Beispiel mit acht Lagen:



Bruchdehnungen von CFK:

ϵ_1 in Faserrichtung = 1,6 % ϵ_2 quer zur Faserrichtung = 0,8 %

Bruchspannung (Festigkeit) von CFK:

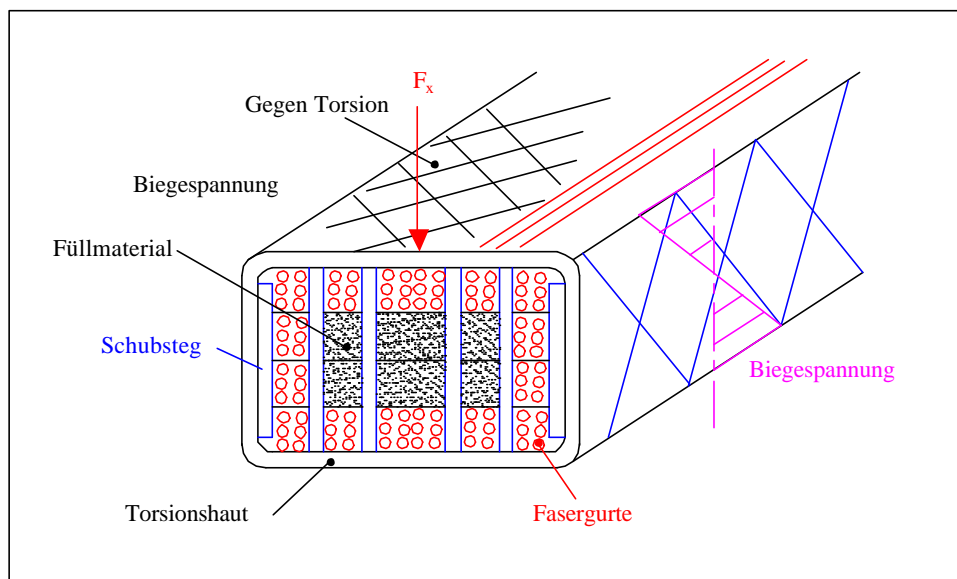
σ_1 in Faserrichtung = 1800 N/mm²

σ_2 quer zur Faserrichtung = 100 N/mm²

E-Moduli von CFK:

E_{11} = 288000 Mpa

E_{22} = 8000 MPa



Das Füllmaterial ist nur als Abstandhalter gedacht. Das Flächenträgheitsmoment wird zudem größer.

In x-Richtung ist der Träger sehr steif. Quer dazu ist er weicher.

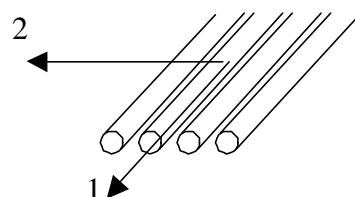
1.) Nachgiebigkeitsmatrix und Steifigkeitsmatrix der Orthotropen Einzelschicht

$$[J] = [S]^{-1}$$

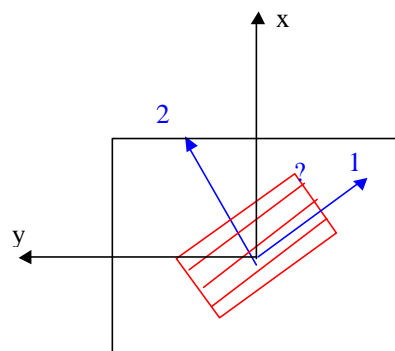
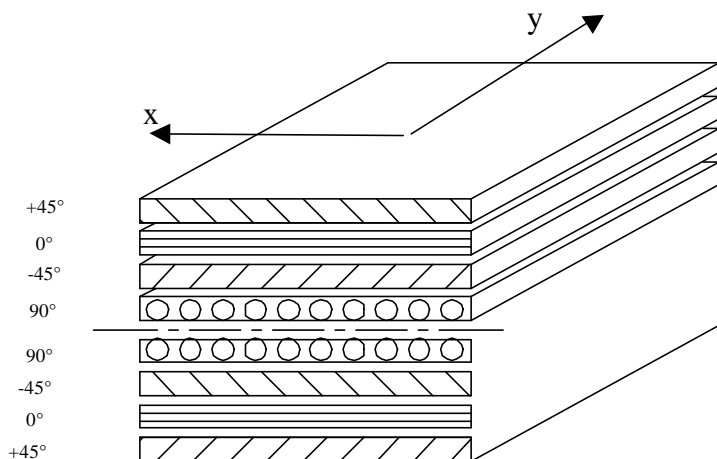
$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{12} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Einzelschicht:

Beschreibung im Koordinatensystem 1,2:



- Verbund



? = 45° (Faserwinkel)
 1,2: lokale Koordinaten
 x,y: globale Koordinaten

2.) Transformation der Eigenschaften der Einzelschichten für den Faserwinkel der Einzelschicht

$$[T_1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}$$

mit: $m = \cos?$ $n = \sin?$

$$\boxed{[\hat{S}] = [T_1]^{-1} * [S] * [T_2]}$$

Steifigkeitsmatrix der gedrehten Einzelschicht im Koordinatensystem x,y

3.) Berechnung der Steifigkeitsmatrix für den Gesamtverbund im globalen System aus der Summe der Einzelschichten

$$\boxed{[A] = \sum_{K=1}^n [\hat{S}]_K * h_K}$$

[A] Steifigkeitsmatrix des Verbundes im globalen System x,y
 n Anzahl der Schichten
 k Laufindex (1...n)
 h_k Dicke der k-ten Einzelschicht

Werkstoffmatrix für die 0°-Lage

$$[T_1]_{0^\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [T_2]_{0^\circ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[\hat{S}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}$$

Werkstoffmatrix für die 90°-Lage

$$[T_1]_{90^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad [T_2]_{90^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[\hat{S}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{22} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}$$

Werkstoffmatrix für die 45° und -45°-Lage

$$[T_1]_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \quad [T_2]_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\hat{S}] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\hat{S}] = \begin{bmatrix} 0,5(S_{11} + S_{12}) & 0,5(S_{11} + S_{12}) & 0,5(S_{11} - S_{12}) \\ 0,5(S_{12} + S_{22}) & 0,5(S_{12} + S_{22}) & 0,5(S_{12} - S_{22}) \\ -S_{66} & S_{66} & 0 \end{bmatrix}$$

