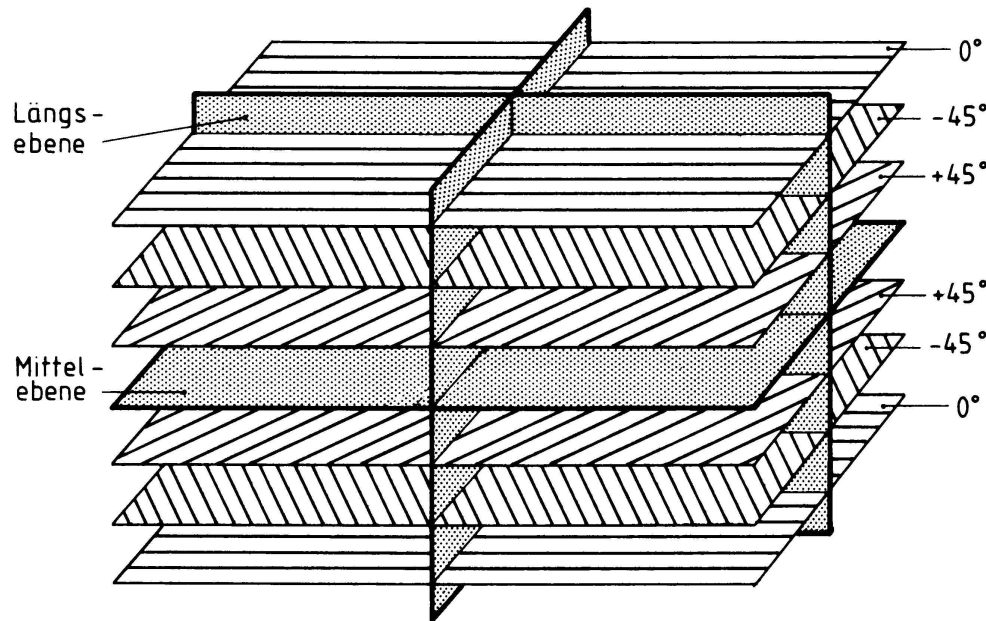


# Laminataufbau

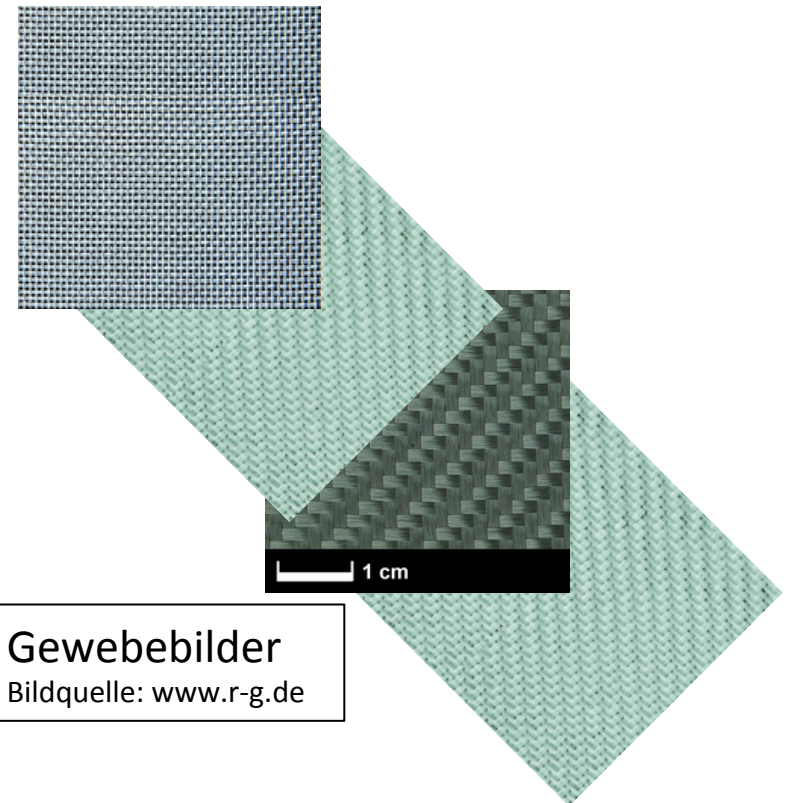


Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

## Schichtweiser Aufbau

## flächiger Faserverbundstrukturen

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		



Gewebebilder

Bildquelle: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)

# Laminataufbau

- Als Laminataufbau bezeichnet man den schichtweisen Aufbau flächiger Strukturen  
lat.: lamina: die Schicht
- Bei Faserverstärkten Kunststofflaminaten wird mit dem Laminataufbau die Abfolge der einzelnen Faserhalbzeuge bezeichnet die nacheinander in die Form gelegt und mit Matrixwerkstoff getränkt werden.
- Folgende Informationen sind mindestens erforderlich, um einen Laminataufbau eindeutig zu definieren:
  - Definition des Faserhalbzeuges
  - Definition des Matrixsystems
  - Stapelfolge und Ausrichtung (Orientierung) der einzelnen Lagen.
  - Faservolumenanteil jeder einzelnen Lage

# Beispiel für einen Laminataufbau:

- Üblicherweise wird der Laminataufbau so angegeben, wie die Ablagereihenfolge bei der Laminatherstellung vorgenommen wird.  
Beispiel eines einfachen Laminataufbaus:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

- Im vorliegenden Beispiel sind einige Besonderheiten zu beachten:
  - Es werden nur Glasgewebe verwendet
  - Alle verwendeten Glasgewebe verfügen je über 2 Faserrichtungen
  - Alle Gewebelagen verfügen über den gleichen Faservolumenanteil
  - Im ganzen Laminat wird das gleiche Matrixsystem verwendet

# Beispiel für einen Laminataufbau:

- Bei einer einheitlichen Faserdichte und einem einheitlichen Faservolumenanteil mit dem gleichen Matrixsystem für alle Gewebelagen können Harzverbrauch und Gesamtlaminatdicke als Ganzes berechnet werden:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

- Das Flächengewicht aller Glasgewebelagen in Summe beträgt im vorliegenden

Beispiel:

$$\left(\frac{m}{A}\right)_{\text{Glasfaser, Gesamtlaminat}} = 685 \text{ g/m}^2$$

- Bei einer Dichte der Glasfasern von  $\rho_{\text{Faser}} = 2,6 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich eine theoretische Dicke des ungetränkten Faseraufbaus von:

$$s_{\text{Faser}} = \frac{\left(\frac{m}{A}\right)_{\text{Faser}}}{\delta_{\text{Faser}}} = \frac{685 \text{ g/m}^2}{2,6 \text{ g/cm}^3} = 0,263 \text{ mm}$$

# Beispiel für einen Laminataufbau:

- Bei einem Faservolumenanteil  $\varphi_{Faser} = 35 \%$  beträgt die Stärke  $s_{Laminat}$  des gesamten Laminataufbaus:

$$s_{Laminat} = \frac{s_{Faser}}{\varphi_{Faser}} = \frac{0,263 \text{ mm}}{0,35} = 0,753 \text{ mm}$$

**Hinweis:** um Rundungsfehler zu vermeiden, stets mit dem Taschenrechnerspeicherwert weiter rechnen!

- Die theoretische Harzdicke beträgt:

$$s_{Harz} = s_{Laminat} \cdot \varphi_{Harz} = 0,753 \text{ mm} \cdot 0,65 = 0,489 \text{ mm}$$

- Die Dichte des ausgehärteten Harzsystems L 1100 mit Härter EPH 294 wird mit  $\varphi_{Harz} = 1,135$  angegeben. Es ergibt sich damit folgender Harzverbrauch:

$$\left(\frac{m}{A}\right)_{Harz} = s_{Harz} \cdot \rho_{Harz} = 0,489 \text{ mm} \cdot 1,135 \frac{g}{cm^3} = 555,3 \frac{g}{m^2}$$

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{Faser}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

# Beispiel für einen Laminataufbau:

- Das Gesamtflächengewicht des Laminates kann aus dem Gewicht von Faser und Harz zusammen gerechnet werden:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	35 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	35 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

$$\left(\frac{m}{A}\right)_{\text{Laminat}} = \left(\frac{m}{A}\right)_{\text{Faser}} + \left(\frac{m}{A}\right)_{\text{Harz}} = 685 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} + 555,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} = 1.240,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$$

- Beachte:
  - Weil für alle Lagen Faser- und Harzdichte identisch war, konnte im vorliegenden Beispiel die Laminatdicke als Ganzes berechnet werden.
  - Die Information über die Dicke und den Harzverbrauch einzelner Lagen ist hierbei verloren gegangen.
  - In vielen Laminatberechnungen ist aber auch die Kenntnis über die Dicke und den Harzverbrauch der einzelnen Lagen wichtig:
    - ⇒ Dann müssen die einzelnen Lagen zunächst einzeln berechnet werden.

# Laminataufbau

## mit unterschiedlichen Faservolumenanteilen:

- Bei unten stehendem Laminataufbau sind die Faservolumenanteile für die einzelnen Schichten unterschiedlich:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	40 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

- ⇒ Die einzelnen Lagen müssen einzeln analysiert werden.
- ⇒ Zur Berechnung des gesamten Laminates werden am Schluss die entsprechenden Werte für alle Lagen zusammen gezählt.



# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Faservolumenanteilen:

- Berechnen Sie die Einzeldicken und die Einzelflächengewichte der Einzellagen für den Laminataufbau:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	40 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

lfd. Nr.	Bezeichnung	$(m/A)_{\text{Gewebe}}$	$\varphi_{\text{Faser}}$	$S_{\text{Faser}}$	$S_{\text{Lage}}$	$S_{\text{Harz}}$	$(m/A)_{\text{Harz}}$
1	Glasgewebe	80 g/m <sup>2</sup>	33%				
2	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	38%				
3	Glasgewebe	285 g/m <sup>2</sup>	40%				
4	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	38%				

Summe:

Eigenschaften der Ausgangskomponenten:

Harz: L 1100 / EPH 294

$$\rho_{\text{Harz}} = 1,135 \text{ g/cm}^3$$

Fasern: E-Glasfaser

$$\rho_{\text{Glas}} = 2,600 \text{ g/cm}^3$$

$$(m/A)_{\text{Laminat}} =$$



# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Faservolumenanteilen:

- Berechnen Sie die Einzeldicken und die Einzelflächengewichte der Einzellagen für den Laminataufbau:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	Glasgewebe 285 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	40 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

lfd. Nr.	Bezeichnung	$(m/A)_{\text{Gewebe}}$	$\varphi_{\text{Faser}}$	$s_{\text{Faser}}$	$s_{\text{Lage}}$	$s_{\text{Harz}}$	$(m/A)_{\text{Harz}}$
1	Glasgewebe	80 g/m <sup>2</sup>	33%	0,031 mm	0,093 mm	0,062 mm	70,9 g/m <sup>2</sup>
2	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	38%	0,062 mm	0,162 mm	0,100 mm	114,0 g/m <sup>2</sup>
3	Glasgewebe	285 g/m <sup>2</sup>	40%	0,110 mm	0,274 mm	0,164 mm	186,6 g/m <sup>2</sup>
4	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	38%	0,062 mm	0,162 mm	0,100 mm	114,0 g/m <sup>2</sup>
<b>Summe:</b>		<b>685 g/m<sup>2</sup></b>			<b>0,691 mm</b>		<b>485,4 g/m<sup>2</sup></b>

Eigenschaften der Ausgangskomponenten:

Harz: L 1100 / EPH 294

$$\rho_{\text{Harz}} = 1,135 \text{ g/cm}^3$$

Fasern: E-Glasfaser

$$\rho_{\text{Glas}} = 2,600 \text{ g/cm}^3$$

$$(m/A)_{\text{Laminat}} = 1.170,4 \text{ g/m}^2$$

**Beachte:** Der Ablagewinkel der Fasern spielt bei diesen Berechnungen noch keine Rolle.

## Zwischenfazit Laminataufbau:

- Bei einem einfachen Laminataufbau mit nur einer Fasersorte, einem gemeinsamen Harzsystem und gleichem Faservolumenanteilen können Lagendicken und Harzverbrauch in einem Schritt errechnet werden.
- Dabei werden die Fasermengen zu Beginn addiert.
- Bei der Berechnung liegen am Ende aber keine Informationen über die Dicke einzelner Lagen oder den Harzverbrauch einzelner Lagen vor.
- Wenn die Lagen unterschiedliche Faservolumenanteile aufweisen, müssen die Lagen einzeln analysiert werden.
- Harzverbrauch und Lagendicke einzelner Lagen werden am Ende zum Gesamtharzverbrauch des Laminates bzw. zur Gesamtdicke des Laminates zusammengezählt.
- Die Ablagewinkel (Faserorientierung) spielt bei der Berechnung der Lagendicken, des Harzverbrauch und des Laminatgewichtes noch keine Rolle.

### ⇒ **Denksportaufgabe:**

Wie ermittelt man im letzten Beispiel den

**durchschnittlichen Faservolumenanteil  $\varphi_{\text{Faser,Laminat}}$  des Laminates?**

# Laminataufbau

## mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

- Zusätzlich zu unterschiedlichen Faservolumenanteilen verfügt unten stehender Laminataufbau über unterschiedliche Fasermaterialien:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

- ⇒ Bei einem entsprechenden Mischlaminat müssen alle Lagen ebenfalls einzeln analysiert werden.
- ⇒ Zusätzlich muss bei dem C-Fasergewebe eine andere Dichte berücksichtigt werden.

# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

- Berechnen Sie die Einzeldicken und die Einzelflächengewichte der Einzellagen für den Laminataufbau:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

lfd. Nr.	Bezeichnung	$(m/A)_{\text{Gewebe}}$	$\rho_{\text{Faser}}$	$\varphi_{\text{Faser}}$	$S_{\text{Faser}}$	$S_{\text{Lage}}$	$S_{\text{Harz}}$	$(m/A)_{\text{Harz}}$
1	Glasgewebe	80 g/m <sup>2</sup>	2,600 g/cm <sup>3</sup>	33%				
2	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	2,600 g/cm <sup>3</sup>	38%				
3	C-Fasergewebe	245 g/m <sup>2</sup>	1,780 g/cm <sup>3</sup>	45%				
4	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	2,600 g/cm <sup>3</sup>	38%				
<b>Summe:</b>		<b>645 g/m<sup>2</sup></b>						

Eigenschaften der Ausgangskomponenten:

Harz: L 1100 / EPH 294

$$\rho_{\text{Harz}} = 1,135 \text{ g/cm}^3$$

Fasern: E-Glasfaser

$$\rho_{\text{Glas}} = 2,600 \text{ g/cm}^3$$

C-Faser

$$\rho_{\text{C-Faser}} = 1,780 \text{ g/cm}^3$$

$$(m/A)_{\text{Laminat}} =$$

$$\varphi_{\text{Faser,Laminat}} =$$

# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

- Berechnen Sie die Einzeldicken und die Einzelflächengewichte der Einzellagen für den Laminataufbau:

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

lfd. Nr.	Bezeichnung	(m/A) <sub>Gewebe</sub>	$\rho_{\text{Faser}}$	$\varphi_{\text{Faser}}$	$s_{\text{Faser}}$	$s_{\text{Lage}}$	$s_{\text{Harz}}$	(m/A) <sub>Harz</sub>
1	Glasgewebe	80 g/m <sup>2</sup>	2,600 g/cm <sup>3</sup>	33%	0,031 mm	0,093 mm	0,062 mm	70,9 g/m <sup>2</sup>
2	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	2,600 g/cm <sup>3</sup>	38%	0,062 mm	0,162 mm	0,100 mm	114,0 g/m <sup>2</sup>
3	C-Fasergewebe	245 g/m <sup>2</sup>	1,780 g/cm <sup>3</sup>	45%	0,138 mm	0,306 mm	0,168 mm	190,9 g/m <sup>2</sup>
4	Glasgewebe	160 g/m <sup>2</sup>	2,600 g/cm <sup>3</sup>	38%	0,062 mm	0,162 mm	0,100 mm	114,0 g/m <sup>2</sup>
<b>Summe:</b>		<b>645 g/m<sup>2</sup></b>			<b>0,291 mm</b>	<b>0,723 mm</b>	<b>0,432 mm</b>	<b>489,8 g/m<sup>2</sup></b>

Eigenschaften der Ausgangskomponenten:

Harz: L 1100 / EPH 294

$$\rho_{\text{Harz}} = 1,135 \text{ g/cm}^3$$

Fasern: E-Glasfaser

$$\rho_{\text{Glas}} = 2,600 \text{ g/cm}^3$$

C-Faser

$$\rho_{\text{C-Faser}} = 1,780 \text{ g/cm}^3$$

$$(m/A)_{\text{Laminat}} = 1.134,8 \text{ g/m}^2$$

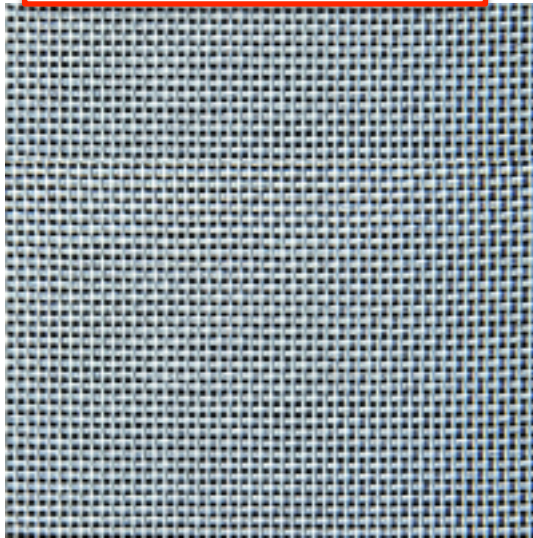
$$\varphi_{\text{Faser,Laminat}} = 40,3\%$$

# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

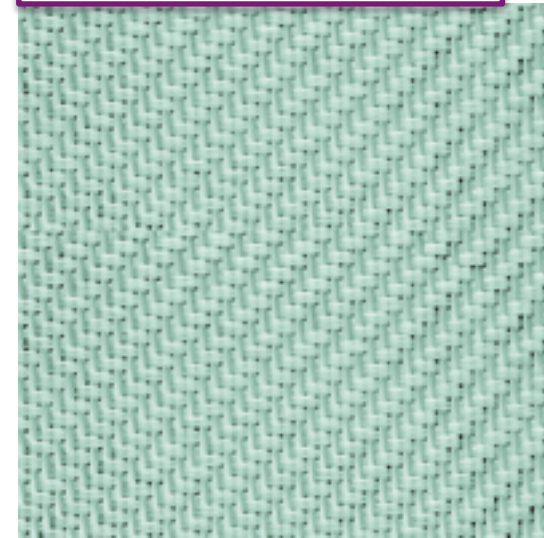
Betrachten wir die bislang  
verwendeten Lagen im Einzelnen:

Glasgewebe 80 g/m<sup>2</sup>:



Das 80 g/m<sup>2</sup>-Glasgewebe in Leinwandbindung verfügt über große Faserzwischenräume, die viel Harz aufnehmen.

Glasgewebe 160 g/m<sup>2</sup>:



Das 160 g/m<sup>2</sup>-Glasgewebe in Körperbindung verfügt über deutlich kleinere Faserzwischenräume und nimmt damit deutlich weniger Harz auf.

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

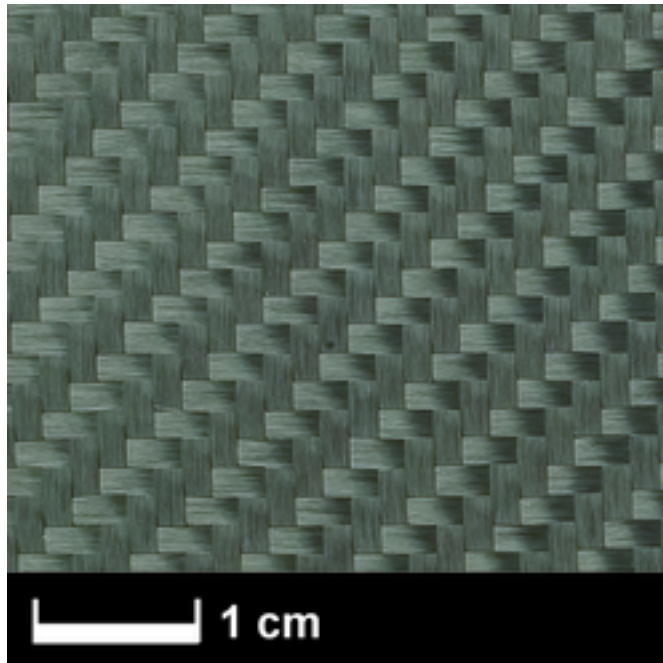


# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

Betrachten wir die bislang  
verwendeten Lagen im Einzelnen:

C-Fasergewebe 245 g/m<sup>2</sup>:



lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		

- Das 245 g/m<sup>2</sup>-C-Fasergewebe in 2/2-Körperbindung ist sehr dicht verwoben, verfügt also nur über wenige Faserzwischenräume und nimmt daher vergleichsweise wenig Harz auf.
- Je weniger Harz ein Gewebe im Laminat aufnimmt, desto höher ist der Faservolumenanteil.

Gewebebilder

Bildquelle: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)



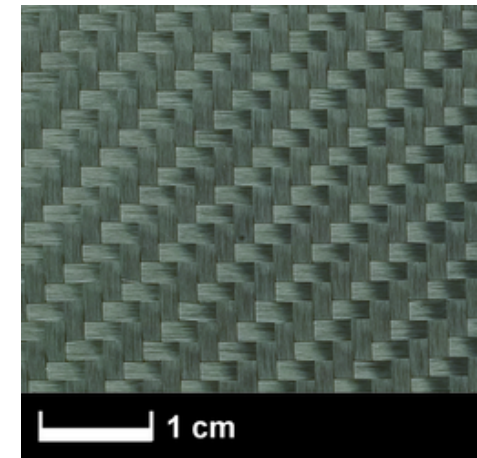
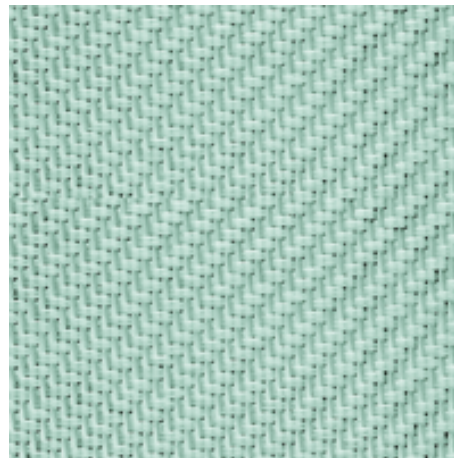
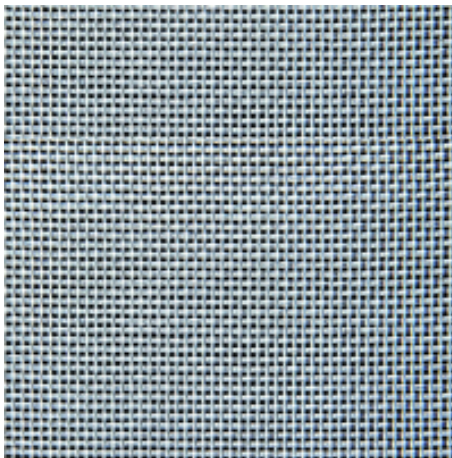
# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

Außerdem gilt:

- Die hier verwendeten Gewebe haben jedes für sich jeweils 2 Faserrichtungen (Kette und Schuss).
- Der hier untersuchte Laminataufbau mit 4 Gewebelagen verfügt über insgesamt 8 Faserrichtungen.

lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	$\varphi_{\text{Faser}}$
1. Lage	Glasgewebe 80 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	33 %
2. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
3. Lage	C-Fasergewebe 245 g/m <sup>2</sup>	0°/90°	45 %
4. Lage	Glasgewebe 160 g/m <sup>2</sup>	±45°	38 %
Bem.:	Harz für alle Gewebelagen: L 1100 / EPH 294		



# Laminataufbau

Der Unterschied zwischen einer **einzelnen Laminatlage** und **einer Einzelschicht**:

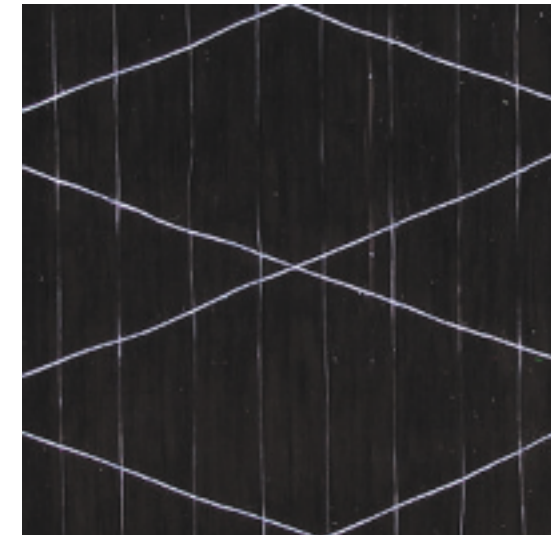
- Als **Laminatlage** wird das Faserhalbzeug bezeichnet, welches als **zusammenhängendes Faserhalbzeug** (verwobenes Gewebe oder zusammenhängendes Gelege) in einer Lage in die Form gelegt und laminiert wird.
- Jede **einzelne Faserrichtung** stellt eine **Einzelschicht** dar.
- ⇒ Eine **Lage** eines **Gewebes** stellt mit den beiden Faserrichtungen (Kette und Schuss) **2 Einzelschichten** im Laminat dar.
- Gelege können aus mehr als zwei Faserrichtungen aufgebaut sein. Entsprechend stellen sie im Laminat auch mehr als zwei Faserrichtungen dar. Man bezeichnet speziell Gelege mit:
  - **2** Faserrichtungen ⇒ **biaxiales** Gelege
  - **3** Faserrichtungen ⇒ **triaxiales** Gelege
  - **4** Faserrichtungen ⇒ **quadraxiales** Gelege
- Gelege mit **nur einer Faserrichtung** werden als **UD-Gelege** bezeichnet.

# Laminataufbau

## UD-Gelege (Uni-Direktionale Gelege):

⇒ Gelege mit nur **einer einzigen Faserrichtung**

- Das UD-Gelege stellt gleichzeitig eine Laminatlage und eine Einzelschicht im Laminat dar.
- Die Einzelschichten im Laminat werden auch als „**unidirektionale Einzelschichten**“ bezeichnet. (abgekürzt oft einfach nur „**ES**“)
- Damit die Fasern einer entsprechenden UD-Schicht im Halbzeug nicht auseinanderfallen, müssen Sie im Halbzeug zueinander fixiert werden.
  - Dieses geschieht bei neben stehendem UD-Kohlefasergelege mit einem einseitig aufgetragenen Haftfadengitter aus PET.



UD-Kohlefasergelege

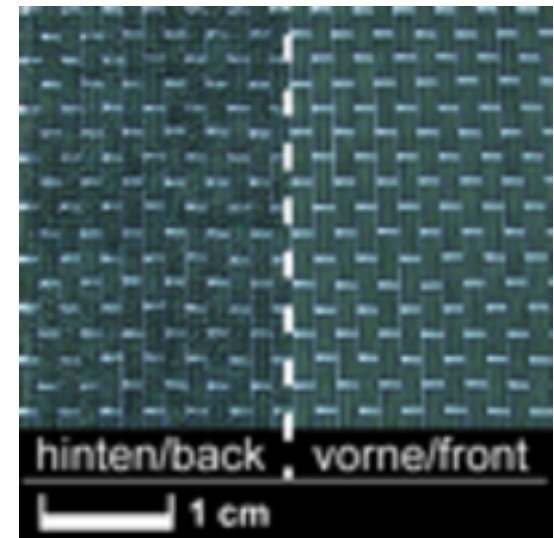
Bildquelle: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)

# Laminataufbau

## UD-Gewebe (Uni-Direktionale Gewebe):

⇒ Gewebe mit nur **einer deutlich dominierenden Faserrichtung**

- Der Begriff „UD-Gewebe stellt im eigentlichen Wortsinne ein Paradoxon dar:
- Während „**unidirektional**“ für eine einzelne Faserrichtung steht, wissen wir doch, dass ein Gewebe immer zwei Faserrichtungen (Kette und Schuss) aufweist.
- Als UD-Gewebe werden aber solche Gewebe bezeichnet, bei denen der weitaus größte Anteil der Fasermenge in eine Richtung orientiert ist.
- I.A. gilt:  
Bei einem UD-Gewebe verlaufen oft mehr als 85% der gesamten Fasermenge in eine Richtung (zumeist in Kettrichtung)
  - Nebenstehendes 140 g/m<sup>2</sup> UD-Kohlefasergewebe besteht zu 88% aus C-Faserfäden in Kettrichtung. Die 12% Glasfasern in Querrichtung halten das Gewebe als Halbzeug zusammen.



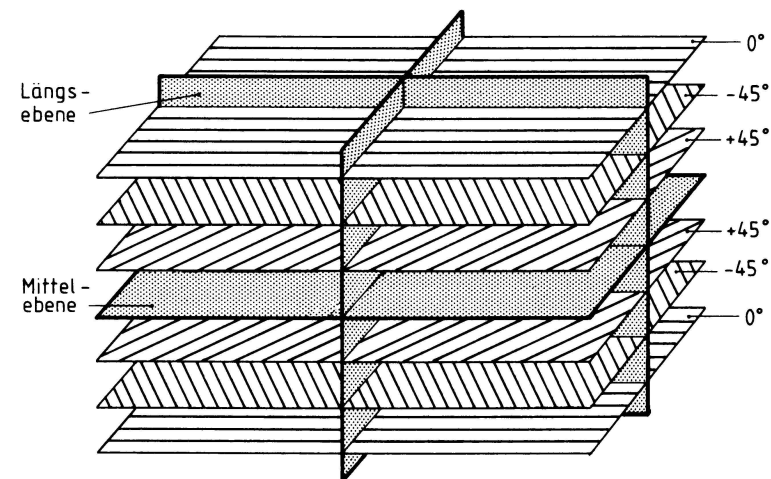
UD-Kohlefasergewebe

Bildquelle: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)

# Laminataufbau

## UniDirektionale Schichten im Laminat $\Rightarrow$ UD-EinzelSchicht

- Bei der Berechnung des Laminates als Ganzes kommt dem Begriff der **UniDirektionalen EinzelSchicht** eine besondere Bedeutung zu.
  - In der klassischen Laminattheorie wird zunächst nicht unterschieden, ob die einzelnen Faserrichtungen aus Gewebelagen aufgebaut sind, bei denen einzelne Faserschichten formschlüssig miteinander verwoben sind.
  - Vielmehr stellt die Theorie den Laminataufbau als Stapelfolge einzelner unidirektional orientierter faserverstärkter Schichten dar.
- $\Rightarrow$  Für die Berechnung nach dieser Theorie müssen daher die einzelnen Faserrichtungen eines Gewebes in zwei Einzelschichten aufgesplittet werden.
- Das besondere Merkmal jeder einzelnen UD-Schicht ist ihre hohe Steifigkeit und Festigkeit in Faserrichtung.
  - Oft ist die Steifigkeit der UD-EinzelSchicht in Faserrichtung um mehr als das 10-fache größer als quer zur Faserrichtung.





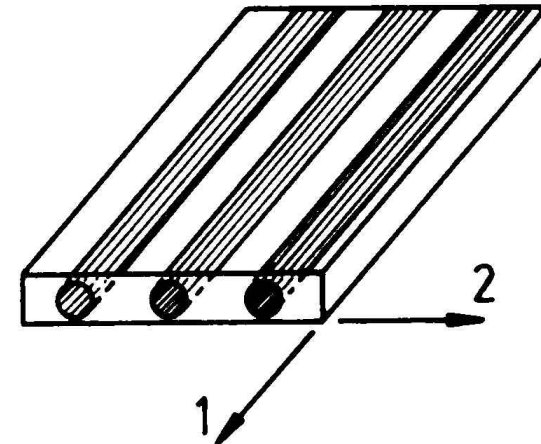
# Laminataufbau

## UniDirektionale Schichten im Laminat $\Rightarrow$ UD-EinzelSchicht

- In der klassischen Laminattheorie stellt die **EinzelSchicht ES** das kleinste Element des Laminat- (Schicht-) aufbaus dar.
  - Die Faserrichtung erhält den Richtungsindex 1
  - Die Richtung quer zur Faser erhält den Richtungsindex 2
  - Bei dreidimensionaler Berechnung erhält die Richtung senkrecht zur Ebene den Richtungsindex 3. (hier zunächst nicht berücksichtigt).
- Um den Elastizitätsmodul in Faserrichtung zu berechnen, kann man einfach die E-Module von Faser und Harz mit ihren jeweiligen Volumenanteilen gewichten. So erhält man:

$$E_1 = \varphi_{Faser} \cdot E_{1,Faser} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot E_{Harz}$$

*(Mischungsregel zur Berechnung des E-Moduls der ES in Faserrichtung)*



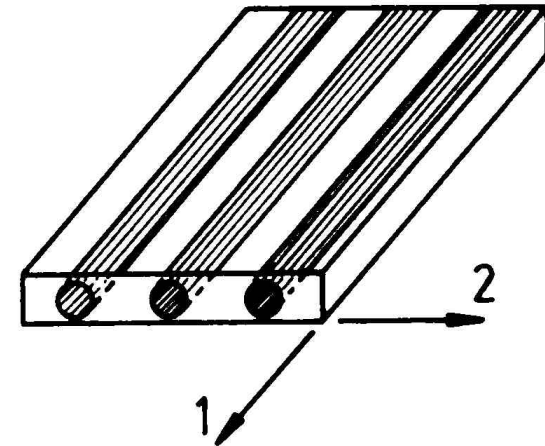
Laminat-EinzelSchicht

Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

# Laminataufbau

## UniDirektionale Schichten im Laminat $\Rightarrow$ UD-EinzelSchicht

- Berechnungsbeispiel: E-Modul der C-Faser-ES in Faserrichtung
- Eine C-Faser verstärkte UD-ES habe folgende Kennwerte:
  - E<sub>1</sub>-Modul der C-Faser:  $E_{1,\text{Faser}} = 235 \text{ GPa}$
  - E-Modul des Harzsystems:  $E_{\text{Harz}} = 3 \text{ GPa}$
  - Faservolumenanteil der ES:  $\varphi_{\text{Faser}} = 54 \%$
- Berechnen Sie den E-Modul  $E_1$  der **EinzelSchicht** in Faserrichtung nach der Mischungsregel:



Laminat-EinzelSchicht

Bildquelle: Michaeli, Wegener 89



# Laminataufbau

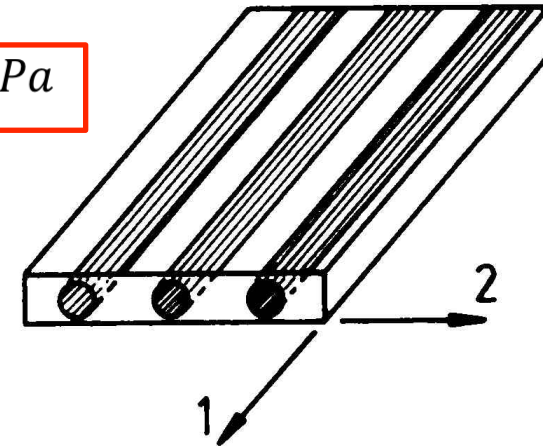
## UniDirektionale Schichten im Laminat $\Rightarrow$ UD-EinzelSchicht

- Berechnungsbeispiel: E-Modul der C-Faser-ES in Faserrichtung
- Eine C-Faser verstärkte UD-ES habe folgende Kennwerte:
  - $E_1$ -Modul der C-Faser:  $E_{1,\text{Faser}} = 235 \text{ GPa}$
  - E-Modul des Harzsystems:  $E_{\text{Harz}} = 3 \text{ GPa}$
  - Faservolumenanteil der ES:  $\varphi_{\text{Faser}} = 54 \%$
- Berechnen Sie den E-Modul  $E_1$  der **EinzelSchicht** in Faserrichtung nach der Mischungsregel:

$$E_1 = 0,54 \cdot 235 \text{ GPa} + (1 - 0,54) \cdot 3 \text{ GPa} = 128,28 \text{ GPa}$$

### Bemerkung:

- Der sehr hohe E-Modul von über 128 GPa in Faserrichtung wird durch die sehr steife C-Faser dominiert.
  - Quer zur Faserrichtung ist der  $E_2$ -Modul der ES dagegen nur sehr gering (hier ca. 8 GPa).
- $\Rightarrow$  Die Einzelschicht ist **in Faserrichtung** sehr **viel steifer** als **quer zur Faserrichtung**!



Laminat-EinzelSchicht

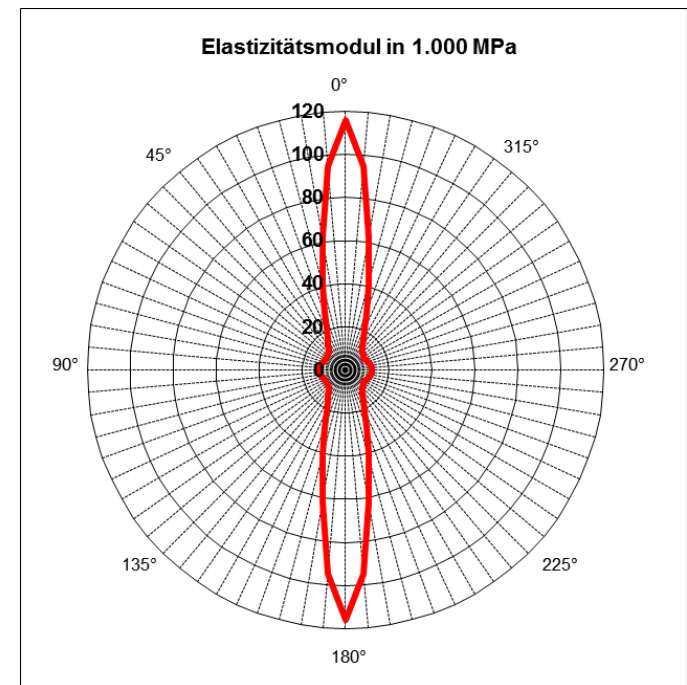
Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

## Berücksichtigung der Faserorientierung im Laminataufbau:

- Das vorstehende Beispiel zeigt deutlich, dass bei der Berechnung von Steifigkeiten (das gilt auch für Festigkeiten) die Faserorientierung jeder einzelnen Schicht eine wesentliche Rolle spielt.

### Beispiel: E-Modul der CFK-UD-Einzelschicht:

- Stellt man den E-Modul einer CFK-UD-Schicht in der Draufsicht richtungsabhängig dar, so ergibt sich in etwa folgende Verteilung:
  - in Faserrichtung ( $0^\circ / 180^\circ$ ) ist der E-Modul sehr hoch
  - Quer zur Faserrichtung ( $90^\circ / 270^\circ$ ) ist der E-Modul sehr gering.
  - Bereits bei Winkeln, die nur um wenige Grad von der Faserrichtung abweichen, fällt der E-Modul der ES bereits deutlich gegenüber dem E-Modul in Faserrichtung ab.



E-Modul CFK;  $0^\circ$ -UD

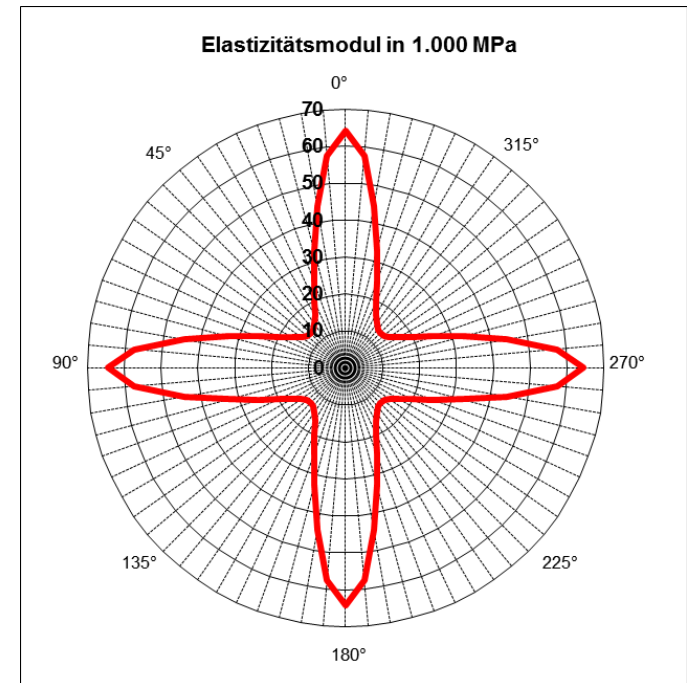
Bildquelle: LamiCens

## Berücksichtigung der Faserorientierung im Laminataufbau:

### Beispiel:

E-Modul zweier um  $90^\circ$  gekreuzter CFK-UD-Einzelschichten:

- Stellt man den E-Modul zweier um  $90^\circ$  gekreuzten CFK-UD-Schichten in der Draufsicht richtungsabhängig dar, so werden die beiden Faserrichtungen sofort erkennbar:
  - in den Faserrichtungen ( $0^\circ/90^\circ/180^\circ/270^\circ$ ) ist der E-Modul immer noch deutlich höher als in den Richtungen die dazwischen liegen.
  - Die Richtungen mit den ausgeprägten E-Moduli sind die Faserrichtungen
  - Im Vergleich zur UD-ES sind die E-Moduli in Faserrichtung aber deutlich niedriger, da ja nur jeweils die Hälfte der Fasern in diese Faserrichtung verlaufen. Die andere Hälfte der Fasern verläuft quer dazu.



E-Modul biaxiales CFK; ( $0^\circ/90^\circ$ )

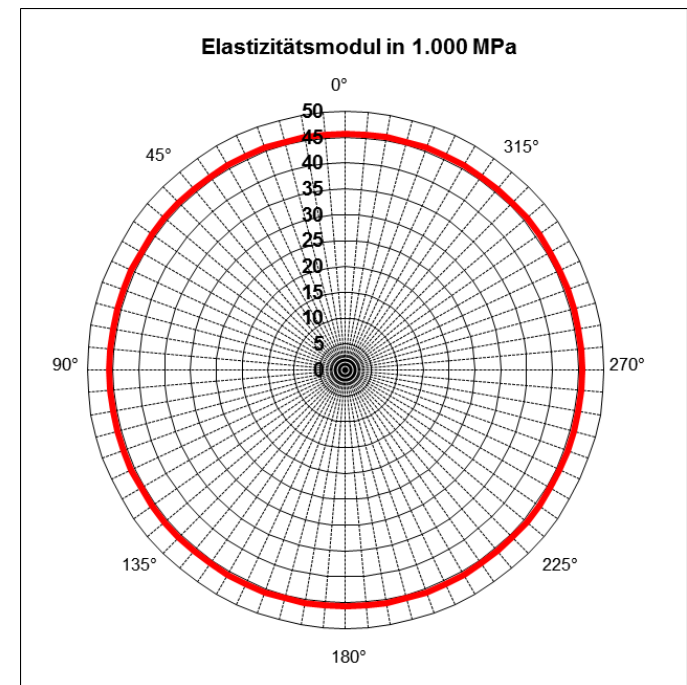
Bildquelle: LamiCens

## Berücksichtigung der Faserorientierung im Laminataufbau:

### Beispiel:

E-Modul von drei CFK-UD-Einzelschichten; gleichmäßig in der Ebene verteilt:

- Verteilt man die Fasermenge eines Laminates gleichmäßig über drei Einzelschichten, die um  $(-60^\circ/0^\circ/60^\circ)$  in der Ebene verteilt sind, so ergibt sich eine Verteilung der E-Module, die in alle Ebenenrichtungen gleich sind.
  - Das Laminat ist **quasiisotrop**.
  - Ein Laminat, dass in **mindestens 3 Ebenenrichtungen** gleiche Fasermengen **gleichmäßig** verteilt, zeigt bei mechanischer Betrachtung ein gleichmäßiges Verhalten und wird daher als **quasiisotrop** bezeichnet. *(näherungsweise gleiches Verhalten in alle Richtungen)*



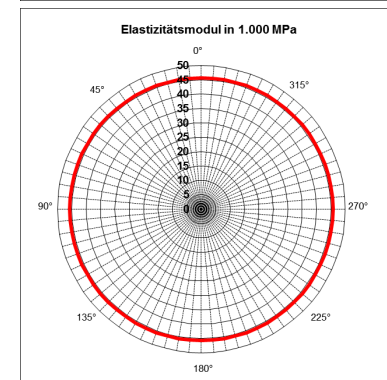
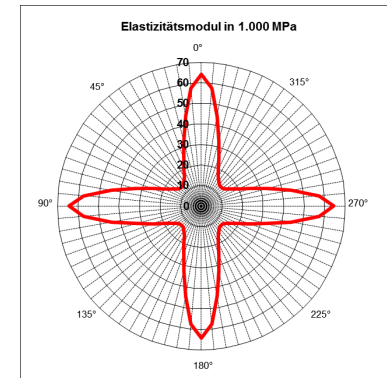
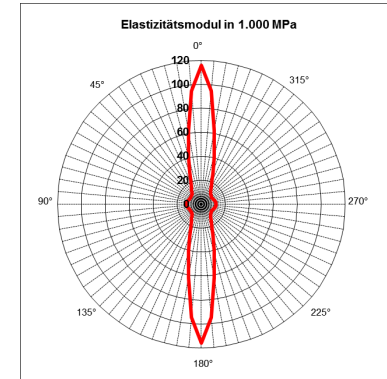
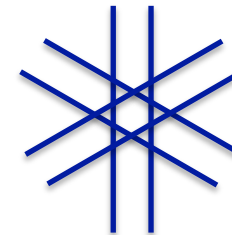
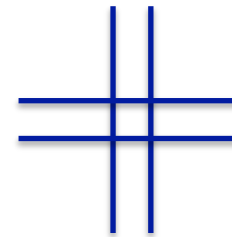
E-Modul triaxiales CFK;  $(-60^\circ/0^\circ/60^\circ)$

Bildquelle: LamiCens

# Berücksichtigung der Faserorientierung im Laminataufbau:

## Typische Laminataufbauten:

- **CFK-UD:** 1 oder mehrere Lagen CFK-UD;  $0^\circ$ :
  - Alle Fasern sind in eine Richtung orientiert.
  - Der E-Modul in Faserrichtung ist sehr hoch.
  - E-Module quer zur Faserrichtung sind sehr gering.
- **CFK-biaxial:** 2 Lagen um  $90^\circ$  gekreuzt:
  - Ausgeprägte E-Module in den beiden Faserorientierungen
  - Maximale E-Module sind deutlich geringer als beim UD-Laminat.
  - Module zwischen den Faserrichtungen sind vergleichsweise gering.
- **Quasiisotroper CFK-Laminataufbau:**
  - Gleichmäßige Verteilung der Fasermenge in mindestens 3 Ebenenrichtungen
  - Näherungsweise gleiches mechanisches Verhalten in alle Richtungen (Quasiisotropie).



## Berücksichtigung der Stapelfolge im Laminataufbau:

- In den Einzelschichten bestimmen die jeweiligen Faserorientierungen die Steifigkeit und das Verformungsverhalten.
  - Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass auch bei den meisten mehrschichtigen Laminaten die einzelnen Faserrichtungen in unterschiedlichen Ebenen liegen (Ausnahme: biaxiales Gewebelaminat).
- ⇒ Unterschiedliche Steifigkeiten liegen in unterschiedlichen Ebenen vor.
- ⇒ Auch bei einem „ausgeglichenen“ quasiisotropen Laminat kann es von Schicht zu Schicht zu unterschiedlichen Verzerrungen kommen.
- ⇒ Wenn übereinander liegende Schichten sich (z.B. durch Härtungsschrumpf oder Wärmedehnung) in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung unterschiedlich dehnen, dann führt das zum Laminatverzug.
- ⇒ Unterschiedliche Dehneigenschaften in unterschiedlichen Schichten treten bei allen mehrschichtigen Laminaten auf und sind unvermeidbar!



## Berücksichtigung der Stapelfolge im Laminataufbau:

Verzug durch unterschiedliches Dehnverhalten einzelner gestapelter Schichten:

- Zwei unterschiedliche Schichten mit unterschiedlichem Ausdehnungsverhalten werden auf einer ebenen Unterlage laminiert.
- Während der Herstellung sind beide Schichten gleich lang.
- Die Unterlage (Form) sei eben.





## Berücksichtigung der Stapelfolge im Laminataufbau:

Verzug durch unterschiedliches Dehnverhalten einzelner gestapelter Schichten:

- Nach dem Entformen kann der Laminataufbau zunächst eben sein.
- Wenn aufgrund äußerer Einflüsse (z.B. Wärme) oder innerer Spannungen (z.B. Härtungsschrumpf) sich die beiden Schichten unterschiedlich dehnen, tritt Verzug auf:



Wenn sich aufgrund unterschiedlicher Dehneigenschaften die rote Lage ausdehnt und sich die blaue Lage zusammen zieht, kann folgender Verzug beobachtet werden:

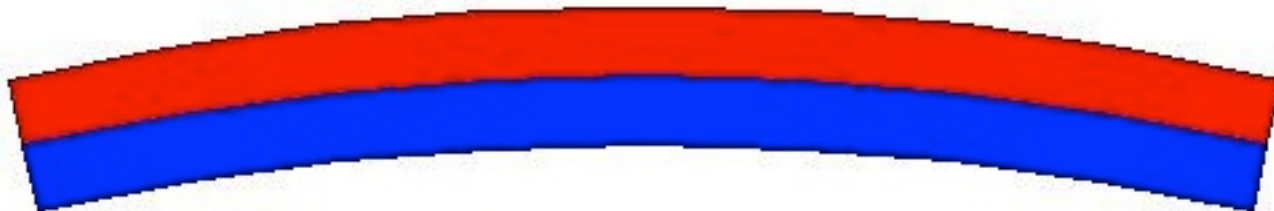
## Berücksichtigung der Stapelfolge im Laminataufbau:

Verzug durch unterschiedliches Dehnverhalten einzelner gestapelter Schichten:

- Nach dem Entformen kann der Laminataufbau zunächst eben sein.
- Wenn aufgrund äußerer Einflüsse (z.B. Wärme) oder innerer Spannungen (z.B. Härtungsschrumpf) sich die beiden Schichten unterschiedlich dehnen, tritt Verzug auf:

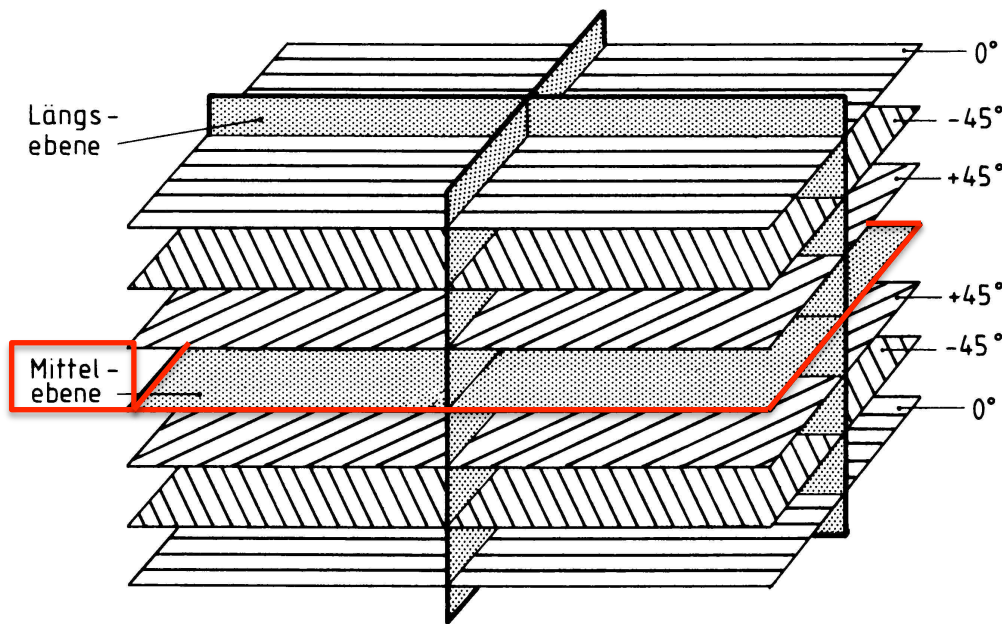


Wenn sich aufgrund unterschiedlicher Dehneigenschaften die rote Lage ausdehnt und sich die blaue Lage zusammen zieht, kann folgender Verzug beobachtet werden:



## Berücksichtigung der Stapelfolge im Laminataufbau:

- Unterschiedliche Dehneigenschaften in unterschiedlichen Schichten treten bei allen mehrschichtigen Laminaten auf und sind unvermeidbar!
- ⇒ Wenn man diese unterschiedlichen Dehneigenschaften nicht vermeiden kann, dann kann man sie aber wenigstens kompensieren:



Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

- In einem Laminataufbau, der spiegelsymmetrisch zu einer (imaginären) **Mittellebene** ist, werden Eigenspannungen, die aufgrund unterschiedlichen Dehnverhaltens auftreten kompensiert.
- Unterschiedliche Eigenspannungen in den unterschiedlichen Schichten sind zwar vorhanden, treten aber nicht als Verformung nach außen.
- Einen entsprechend um eine imaginäre Mittellebene spiegelsymmetrisch aufgebauten Laminataufbau bezeichnet man als **orthotrop**.

# Zusammenfassung **Laminataufbau:**

- Ein Laminataufbau erfolgt lagenweise mit Faserhalbzeugen, die aufeinander gestapelt werden. Jedes Faserhalbzeug stellt eine Laminatlage dar.
- Ein Faserhalbzeug kann mehrere Faserrichtungen enthalten. Jede dieser Faserrichtungen stellt im Laminataufbau eine einzelne Einzelschicht (**ES**) dar.
- Der E-Modul einer Einzelschicht in Faserrichtung ist i.A. deutlich höher als quer zur Faserrichtung.
- Zur Berechnung der Dicke und des Harzverbrauches eines Laminataufbaus genügt zumeist eine lagenweise Analyse.
- Zur Berechnung der mechanischen Eigenschaften eines Laminataufbaus müssen die Einzelschichten unter Berücksichtigung der Einzelschichtsteifigkeiten und der jeweiligen Faserorientierung genau analysiert werden.
- Wenn in einem Laminataufbau **mindestens 3 Faserrichtungen gleichmäßig** in der Ebene **verteilt** sind, zeigt das Laminat in allen Ebenenrichtung näherungsweise gleiche mechanische Eigenschaften und ist somit **quasiisotrop**.
- Ein Laminataufbau, der spiegelsymmetrisch um eine imaginäre Mittelebene aufgebaut ist, kann aufgrund der Symmetrie innere Spannungen kompensieren und ist damit weniger anfällig gegen Bauteilverzug. Entsprechende **spiegelsymmetrische Laminataufbauten** bezeichnet man als **orthotrop**.

# Laminataufbau:

## Weiter führende Aufgaben:

- Ein sogenanntes Mischgewebe besteht in Kett- und in Schussrichtung aus jeweils abwechselnd einem aus C-Faser- und einem Glasfaserfaden.
  - Wie gehen Sie bei der Berechnung des Harzverbrauches und der Laminatdicke vor?
  - Aus wie vielen Einzelschichten besteht eine Lage dieses Gewebes?
- Wie können Sie ein quasiisotropes Laminat aus einem Gewebe aufbauen?  
Gehen Sie davon aus, dass das Gewebe in Kett- und in Schussrichtung über eine identische Achitektur verfügt (biaxial symmetrisches Gewebe).  
Erstellen Sie einen entsprechenden Laminatplan.
- Wie können Sie ein quasiisotropes Laminat aus einem biaxial symmetrischen Gewebe aufbauen, das gleichzeitig auch noch orthotrop ist?  
Erstellen Sie auch hierzu einen entsprechenden Laminatplan.
- Wie können Sie aus einem UD-Gelege ein quasiisotropes Laminat aufbauen?  
Erstellen Sie hierzu einen Laminatplan.
- Wie können Sie aus einem UD-Gewebe ein quasiisotropes Laminat aufbauen?  
Erstellen Sie hierzu einen Laminatplan.
- Wie müsste man die beiden zuletzt genannten Laminataufbauten ergänzen, damit sie zusätzlich auch noch orthotrop werden?