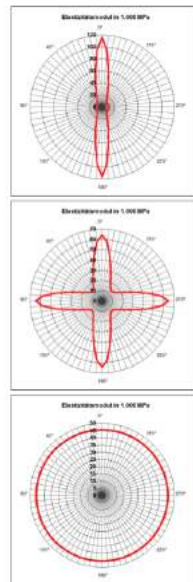
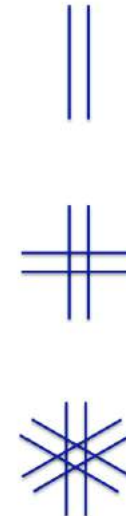
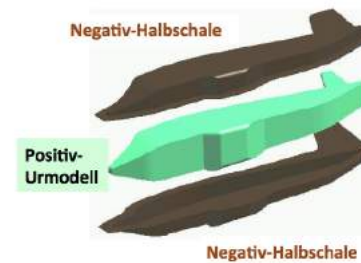
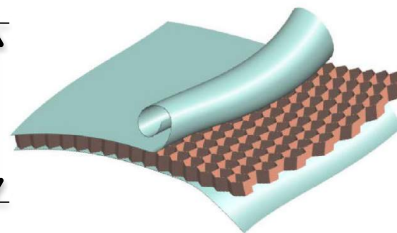
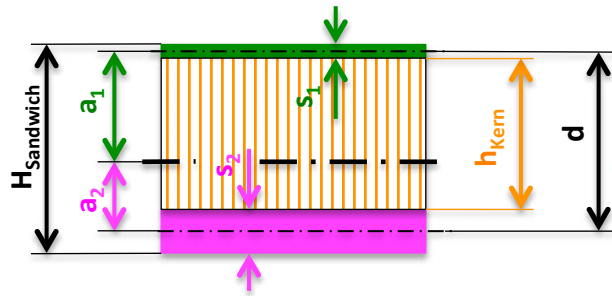
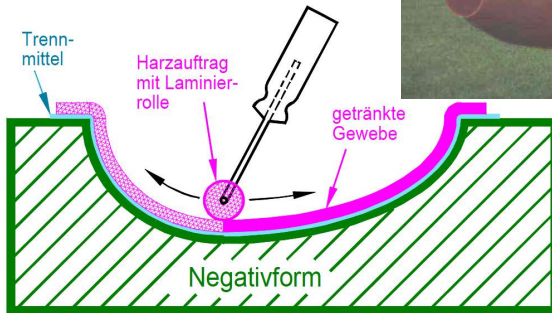


# Leichtbaukonstruktionen mit FaserVerstärkten Kunststoffen (FVK)

$$[A] = \sum_k \frac{t_k}{t_{Lam}} \cdot [Q]_{LamKS,k}$$



# FaserVerstärkte Kunststoffe (FVK)

**sind:**

- **sehr leicht**
- **sehr fest**

aber auch:

- **Teuer**
- **„schwierig“ zu verarbeiten**

- Als Leichtbauwerkstoff haben sich Faserverbundkunststoffe bislang vor allem in der Luft und Raumfahrt bewährt.
- Aber es gibt inzwischen immer mehr Einsatz von FVK im Fahrzeugbau:  
z.B.:
  - Sekundärstrukturen (vor allem bei Nutzfahrzeugen)
  - Karosserieelemente im Sonderfahrzeugbau (Wohnmobile, Krankenwagen, Baumaschinen, etc.)
  - Verstärkungen konventioneller Metallstrukturen (z.B.: B-Säule)
  - Motorrennsport

## FaserVerstärkte Kunststoffe (FVK) im Motorrennsport:



Bildquelle: race-ing

Die Struktur eines Rennwagens besteht fast ausschließlich aus **FaserVerstärkten Kunststoffen**

# Vorteile beim Einsatz von FVK im Motorrennsport:

- Strukturen aus **CarbonFaser-verstärkten Kunststoffen (CFK)** haben eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht.  
Beispiel: CFK-Monocoque in der Formel 1



Bildquelle: race-ing

## Aber:

Ein entscheidendes Merkmal von Faserverstärkten Kunststoffen ist hierbei auch:

- Ihre Besondere Gestaltbarkeit
  - Die Möglichkeit, komplexe High-Tech-Strukturbauteile in kleinen Stückzahlen „wirtschaftlich“ (auf hohem Stückpreisniveau“ herstellen zu können.
- ⇒ Daher werden CFK-Strukturen im Fahrzeugbau bislang besonders eingesetzt:
- bei Kleinserien
  - im Prototypenbau

# Der Einsatz von FVK im Motorsport zeigt eindrucksvoll:

- Aus technischer Sicht haben FVK ihre außergewöhnlich Eignung für den Karosseriebau bereits unter Beweis gestellt.



Bildquelle: race-ing

## Aber:

- Problematisch ist die Großserienherstellung:
  - aufgrund der hohen Werkstoffkosten
  - Wegen der langen Zykluszeiten
- ⇒ Wichtigstes Entwicklungsziel derzeit ist eine Produktivitätssteigerung der Herstellverfahren für FVK
  - Verkürzung der Taktzeiten
  - Steigerung des Automatisierungsgrades

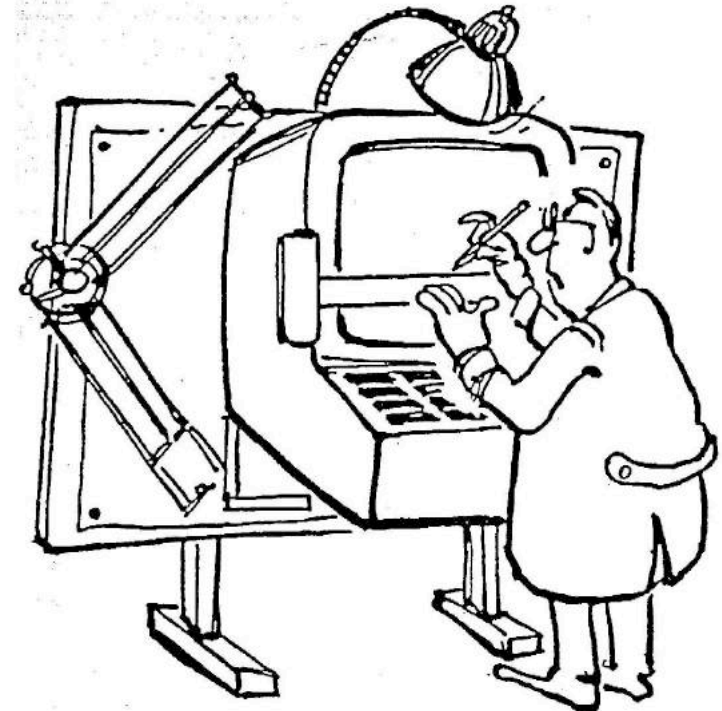


Bildquelle: BMW

## Der Konstrukteur von FVK-Karosseriebauteilen benötigt besondere Kompetenzen:

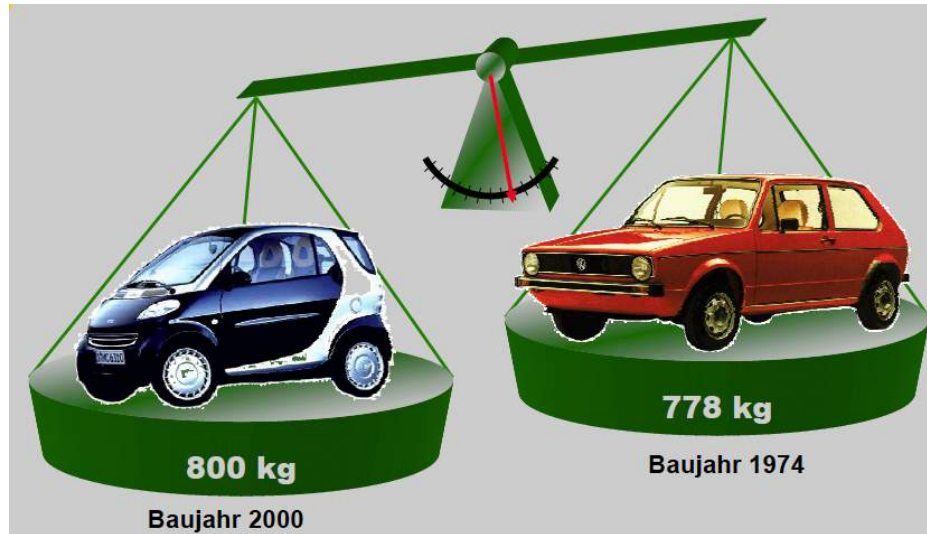
- **Insbesondere Kenntnisse über:**
  - Die besonderen Eigenschaften von FVK
  - Die Fertigungsverfahren
  - Die fasergerechte Bauteilgestaltung
  - Die Berechnung von FVK(Laminatberechnung)
  - Den Werkzeugbau für Faserverbundbauteile
  - ...

⇒ Wer neue Technologien nutzen möchte, muss sich auf neue Werkzeuge und neue Methodiken einlassen.



Bildquelle: werker-online.de

# Leichtbau-



Quelle: Audi

# Konstruktionen



# Was ist Leichtbau?

Leichtbau ist eine **Absichtserklärung**:

- Eine **Konstruktion**, die bestimmte **Funktionen** (nach Lastenheft) gewährleistet, soll ein **konkret festgelegtes Gewicht** nicht überschreiten
- Entsprechend kann für eine Leichtbaukonstruktion eine Forderung wie folgt formuliert werden:
  - leichter als **xxx kg**
  - **xx %** leichter als die Vergleichskonstruktion

⇒ Somit ist Leichtbau mehr ein **Konstruktionsziel** als ein Konstruktionsprinzip

⇒ Für seriösen Leichtbau ist die Angabe eines **konkreten Gewichtslimits** unerlässlich!



# Warum Leichtbau?

Der Aufwand wichtiger energetischer Größen ist proportional zur Masse:

**Beispiel:**

$$F = m \cdot a$$
$$Q = m \cdot c_q \cdot \Delta T$$

Mechanischer Zusammenhang

Thermischer Zusammenhang

- Gewichtsreduzierung senkt fast immer den Energiebedarf
- Viele Anwendungen sind erst mit Leichtbaustrukturen möglich (z.B.: Luft- und Raumfahrt)

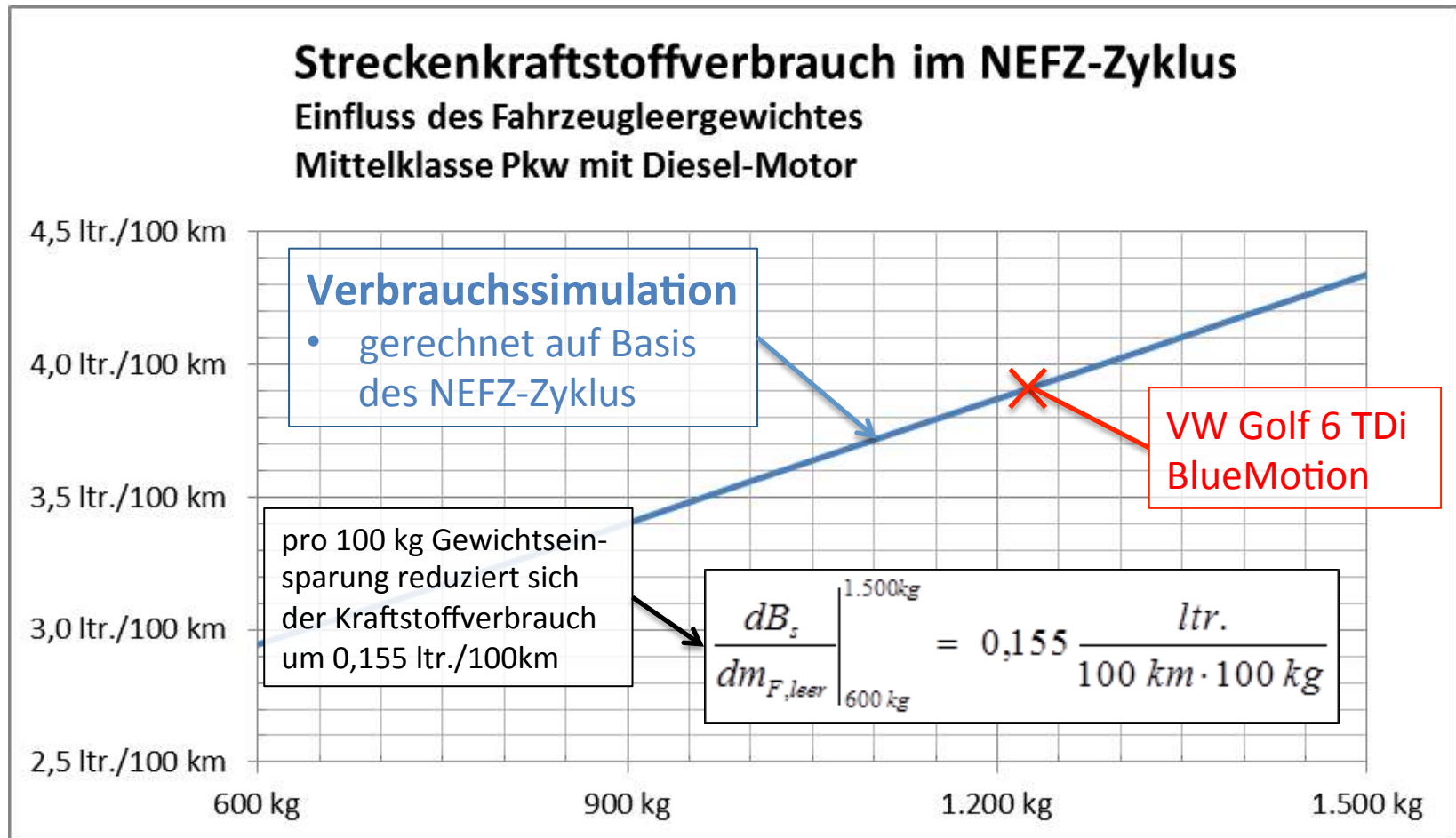
**Beachte aber auch:**

- Nicht immer sind mechanische Anforderungen der Grund für Leichtbau!
- Durch Leichtbau kann auch die Wärmekapazität reduziert werden, was bei thermodynamischen Wechselwirkungen zu entsprechenden Effekten führen kann.

⇒ Dieses greifen wir später auch mit dem Formenbausystem

**fibretemp**  
beheizbare Formen

# Beispiel: Kraftstoffeinsparung durch Gewichtsreduzierung beim Pkw:



# Wie erreicht man ein erklärtes Leichtbauziel?

**Konstruktionsziele kann man durch fachkundiges Anwenden von Konstruktionsmethoden erreichen:**

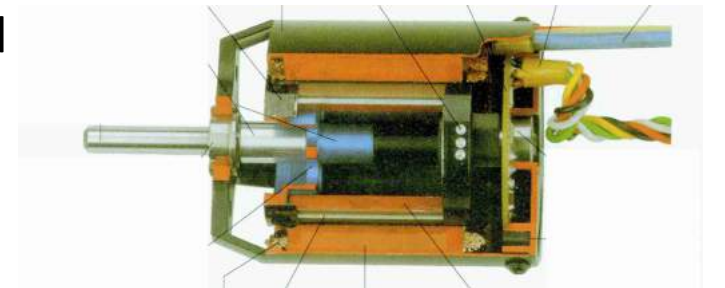
**Leichtbauziele erreicht man insbesondere durch:**

- **Konzeptioneller Leichtbau:**  
Suche neue Wirkprinzipien für entscheidende Funktionen Deiner Konstruktion
- **Strukturoptimierter Leichtbau:**  
Ordne den Werkstoff in Deiner Konstruktion so an, dass alle Lasten und Kräfte auf optimalem Weg durch die Struktur fließen
- **Bedingungsleichtbau:**  
Vermeide Übergewicht, indem Du Deine Konstruktion nahe an der Belastungsgrenze auslegst (Überdimensionierung vermeiden)
- **Werkstoffleichtbau:**  
Verwende leichte Werkstoffe

# Konzeptioneller Leichtbau:

Suche neue Wirkprinzipien für entscheidende Funktionen Deiner Konstruktion

- Beispiel: Gleichstrom-Elektromotor
  - Beim Gleichstrom-Elektromotor sorgen Bürsten für die Umpolung der Elektromagneten
  - Beim bürstenlosen Elektromotor (BLDC) wird das Umpolen der Spulen von der Leistungselektronik übernommen
- ⇒ BLDC-Motoren erreichen bei gleicher Masse deutlich höhere Leistungen als konventionelle Gleichstrommotoren

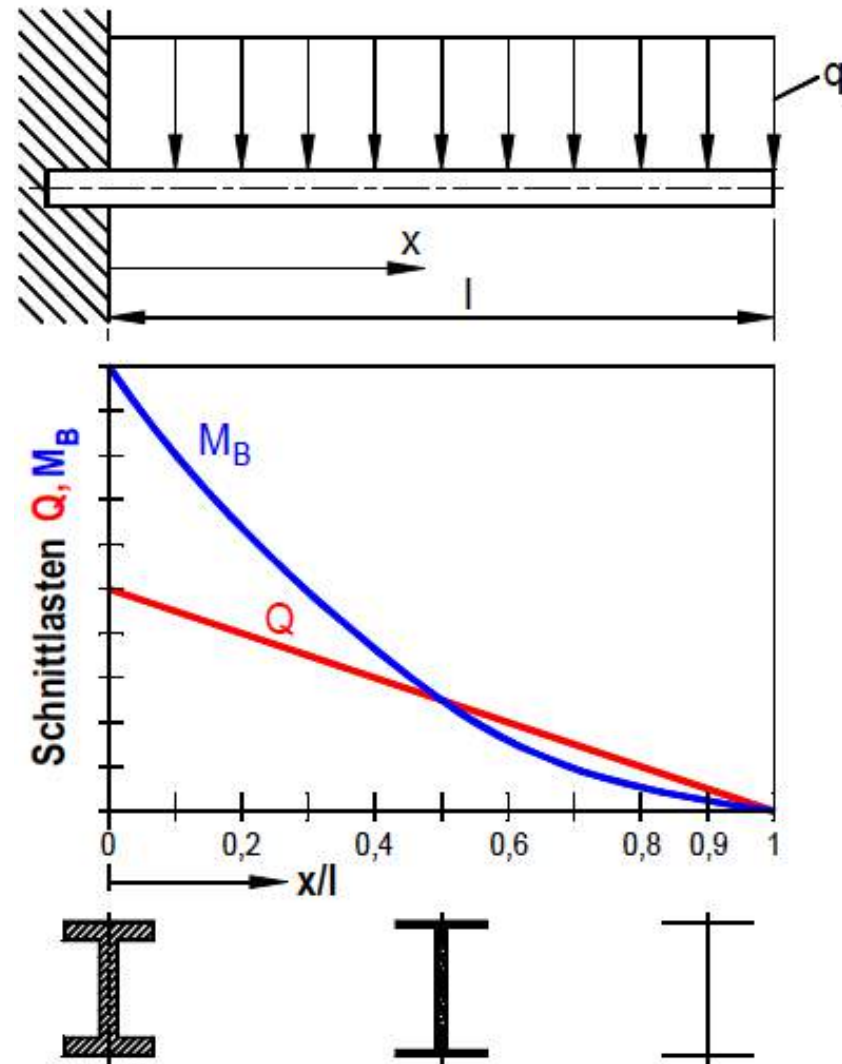


Bildquellen: Plettenberg

## Strukturoptimierer Leichtbau:

Ordne den Werkstoff in Deiner Konstruktion so an, dass alle Lasten und Kräfte auf optimalem Weg durch die Struktur fließen

- Beispiel:  
Optimaldimensionierung eines Kragbalkens:  
Passt man den Querschnitt der Gurte und des Steges an die Schnittlasten an, so kann man viel Gewicht sparen.  
Aber:
- Der Doppel-T-Träger mit unverändertem Querschnitt wäre wesentlich kostengünstiger



## Bedingungsleichtbau:

Vermeide Übergewicht, indem Du Deine Konstruktion nahe an der Belastungsgrenze auslegst (Überdimensionierung vermeiden)

- Beispiel:

### Aufzüge und Seilbahnen

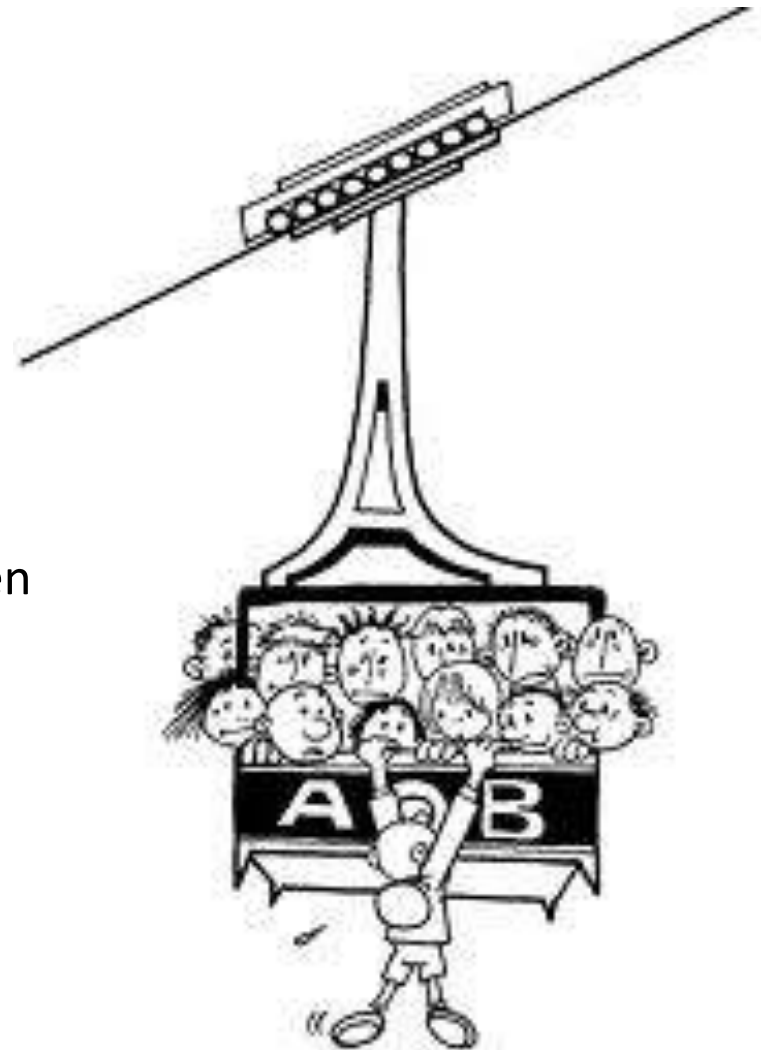
Seile bei Transportsystemen, die Personen befördern müssen i.A. mit Sicherheitsfaktoren von mindestens 7 überdimensioniert werden

⇒ Sicherheitsfaktoren sind

### Unsicherheitsfaktoren

⇒ Eindeutige Bedingungen reduzieren

Unsicherheiten (und Überdimensionierung)



# Werkstoffleichtbau: Verwende leichte Werkstoffe

- **Beispiel:**

Aluminium hat eine nahezu 3 mal geringere Dichte als Stahl

- $\rho_{\text{Stahl}} = 7,8 \text{ g/cm}^3$

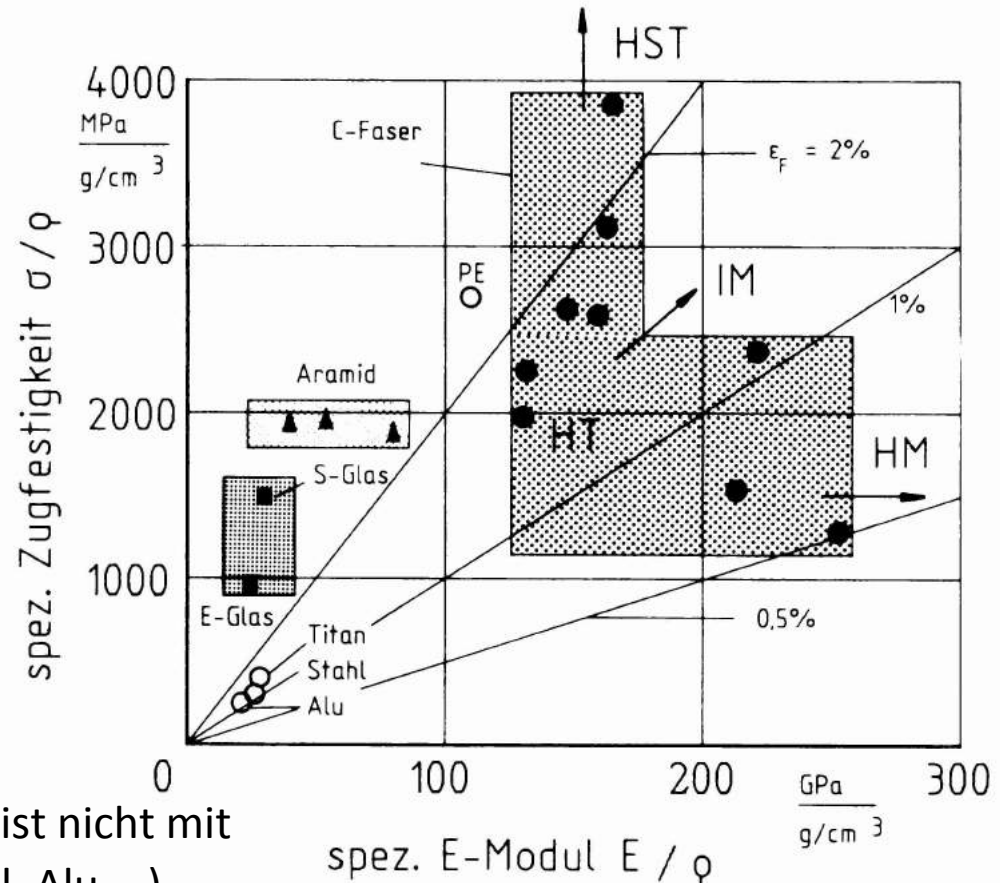
- $\rho_{\text{Alu}} = 2,8 \text{ g/cm}^3$

⇒ **Aber:** Auch die Steifigkeit und Festigkeit sogenannter „Leichtbauwerkstoffe“ kann um ein vielfaches geringer sein.

⇒ **Außerdem:** Vorsicht vor Diagrammen wie neben stehend!

⇒ Vergleiche stets nur Gleichwertiges

⇒ Eine Werkstoffkomponente (Faser) ist nicht mit einem Konstruktionswerkstoff (Stahl, Alu,...) vergleichbar



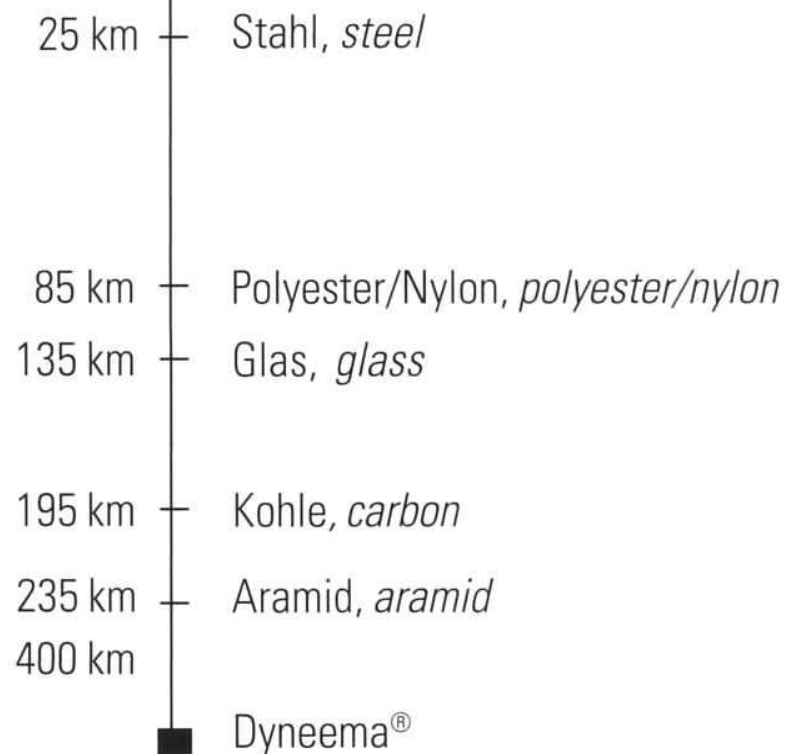
Bildquelle: Michaeli / Wegener



## Zusammenfassung „Leichtbau“:

- Leichtbau ist selbst noch kein Konstruktionsprinzip sondern eher ein Konstruktionsziel oder eine Absichtserklärung.
- Eine konventionelle Konstruktion wird nicht bereits dadurch zur Leichtbaukonstruktion, indem man konventionelle Werkstoffe durch Leichtbauwerkstoffe ersetzt.
- Gewichtseinsparung hängt nicht allein von den gewichtsspezifischen Eigenschaften eines Werkstoffes ab.
- Entscheidend für eine im Hinblick auf Gewichtseinsparung optimierte Konstruktion ist die Auswahl eines für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Werkstoffes und die Bauteilgestaltung in einer auf den Werkstoff und die Einsatzbedingungen optimal abgestimmten Weise.
- Es gibt nicht „den optimalen Leichtbauwerkstoff“, sondern immer eine Auswahl verschiedener Werkstoffe, die für den Einsatz in einer Leichtbaukonstruktion geeignet erscheinen.
- Eine optimierte Leichtbaukonstruktion beinhaltet immer mehrere der vier genannten Leichtbaurichtungen **Konzeption**, **Gestaltung**, **Bedingungen** und **Werkstoff**.





# Leichtbau- kennzahlen



# Leichtbaukennzahlen

- Der Sinn von Kennzahlen ist es, quantitative Vergleiche zwischen unterschiedlichen Alternativen ziehen zu können.

## Für Leichtbaukennzahlen gilt:

- Mit Hilfe einer entsprechenden Leichtbaukennzahl soll eine Beurteilung möglich sein, um welcher Faktor eine Variante schwerer oder leichter als die andere Variante ist.
- Je nach Betrachtung, Anwendungsfall oder Konstruktionsbeispiel sind unterschiedliche Darstellungen von Leichtbaukennzahlen möglich

## Eine einfache Leichtbaukennzahl ist die **Werkstoffdichte**:

$\rho$  (**{rho}**) Angabe in:

- $\text{kg/m}^3$
- $\text{kg/ltr.}$   
oder:
- $\text{g/cm}^3$
- selten:  $\text{t/m}^3$

**Beispiele:** (ungefähre Richtwerte – schwanken je nach Legierung und Quelle)

- $\rho_{\text{Stahl}} = 7,8 \text{ g/cm}^3$
- $\rho_{\text{Aluminium}} = 2,8 \text{ g/cm}^3$
- $\rho_{\text{Kunststoff}} = \text{ca. } 0,015 \text{ g/cm}^3$  (Styropor) bis  $1,8 \text{ g/cm}^3$  (gefüllte Kunststoffe)

# Spezifisches Volumen

Als spezifisches Volumen wird der Kehrwert der Dichte bezeichnet:

- $V_{\text{spez}} = 1/\rho$  [dm<sup>3</sup>/kg]

## Beispiele:

- $V_{\text{spez,Stahl}} = 0,128$  dm<sup>3</sup>/kg
- $V_{\text{spez,Aluminium}} = 0,357$  dm<sup>3</sup>/kg
- $V_{\text{spez,Styropor}} = 66,7$  dm<sup>3</sup>/kg

Hierbei bleiben mechanische Eigenschaften unberücksichtigt.

⇒ Daher ist ein direkter Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe nur unter Berücksichtigung von Dichte oder spez. Volumen meistens nicht sinnvoll.



## Gewichtsspezifische Eigenschaften:

Um die Leichtbaueignung unterschiedlicher Werkstoffe darzustellen, werden entscheidende Werkstoffeigenschaften als Quotient zu Ihrer Dichte dargestellt:

### Beispiel:

- Spezifische Zugfestigkeit:  $R_{m, \text{spez}} = R_m / \rho$
- Spezifische Steifigkeit:  $E_{\text{spez}} = E / \rho$

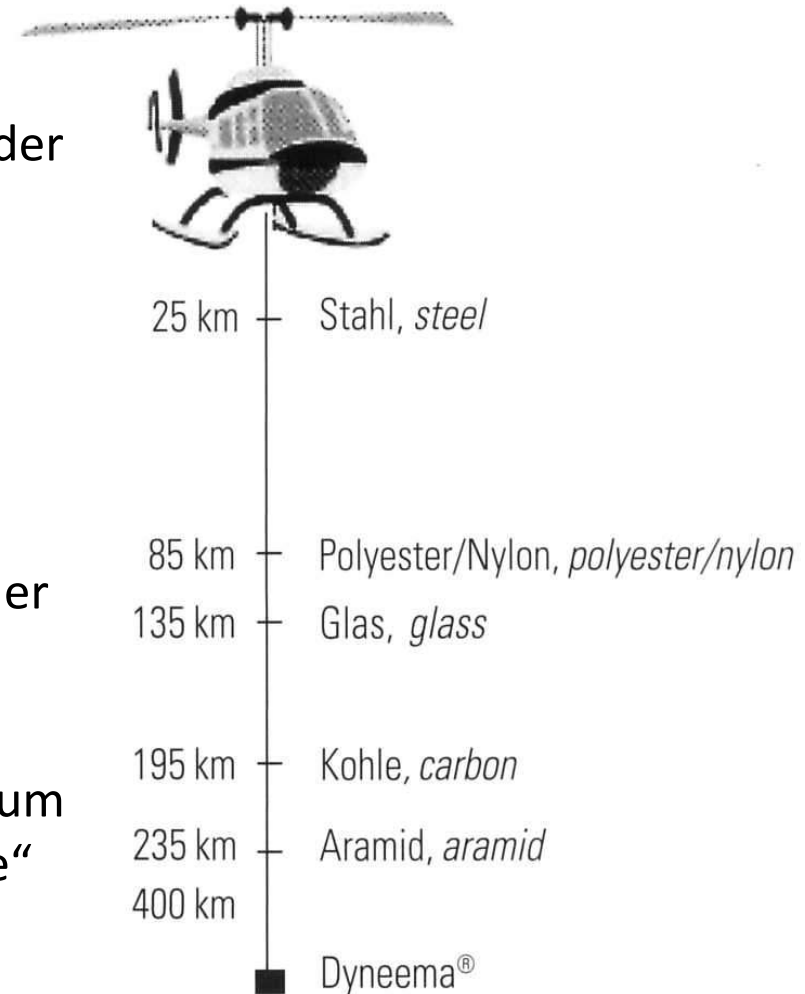
**Hinweis:** Finden Sie entsprechende Einheiten (SI-Größen) selbst heraus!

## Reißlänge:

Die Reißlänge ist die (rechnerische) Länge, bei der ein Werkstoffstab konstanter Dicke unter Einwirkung einer konstanten Gravitationskraft über die gesamte Länge an der obersten Stelle aufgrund seines Eigengewichtes reißt.

### Aufgaben:

- Stellen Sie die Gleichung anhand vorliegender Definition auf und lösen Sie die Gleichung nach der Reißlänge  $l_{\text{Stab}} = l_{\text{Reiß}}$  auf!
- Erklären Sie mit Ihren eigenen Worten, warum das Experiment „Bestimmung der Reißlänge“ nicht praktisch durchgeführt werden kann!



## Weitere gewichtsspezifische Werkstoffeigenschaften:

- Stabilitätswiderstand von Knickstäben:  
charaktisiert die Knickstabilität von Stäben

$$\frac{\sqrt{E}}{g \cdot \rho}$$

- Biege- und Beulsteifigkeit:  
charakterisiert die Biegesteifigkeit von Balken  
und die Beulsteifigkeit von Platten

$$\frac{\sqrt[3]{E}}{g \cdot \rho}$$

- **Vergleichstabelle:**  
Vergleich typischer Leichtbauwerkstoffe bei reiner Zugbeanspruchung

Werkstoff	Dichte $\rho$	E-Modul	Zugfestigkeit $R_m$	spez. Volumen $1/\rho$	Dehnlänge $E/(g \cdot \rho)$	Reißlänge $R_m/(g \cdot \rho)$
Stahl	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	210.000 MPa	500 MPa	0,1274 dm <sup>3</sup> /kg	2.727 km	6,49 km
Al-Legierung	2,70 kg/dm <sup>3</sup>	70.000 MPa	350 MPa	0,3704 dm <sup>3</sup> /kg	2.643 km	13,21 km
Mg-Legierung	1,74 kg/dm <sup>3</sup>	40.000 MPa	330 MPa	0,5747 dm <sup>3</sup> /kg	2.343 km	19,33 km
Ti-Legierung	4,50 kg/dm <sup>3</sup>	102.000 MPa	900 MPa	0,2222 dm <sup>3</sup> /kg	2.311 km	20,39 km
PA 6 (trocken)	1,15 kg/dm <sup>3</sup>	2.500 MPa	80 MPa	0,8696 dm <sup>3</sup> /kg	222 km	7,09 km
GFK-UD (50%)	1,95 kg/dm <sup>3</sup>	40.000 MPa	800 MPa	0,5128 dm <sup>3</sup> /kg	2.091 km	41,82 km
CFK-UD (50%)	1,40 kg/dm <sup>3</sup>	250.000 MPa	1.000 MPa	0,7143 dm <sup>3</sup> /kg	18.203 km	72,81 km
AFK-UD (50%)	1,35 kg/dm <sup>3</sup>	65.000 MPa	1.500 MPa	0,7407 dm <sup>3</sup> /kg	4.908 km	113,26 km
Holz	0,50 kg/dm <sup>3</sup>	12.000 MPa	100 MPa	2,0000 dm <sup>3</sup> /kg	2.446 km	20,39 km

**Beachte:** Die Kennwerte der einzelnen Werkstoffe können stark streuen, so dass konkrete Werte im Einzelfall anhand der Werkstoffdatenblätter zu überprüfen sind!

Datenquelle: Klein, Leichtbau



- **Vergleichstabelle:**  
Gütekennzahlen einiger Leichtbauwerkstoffe  
Werte auf Aluminium normiert

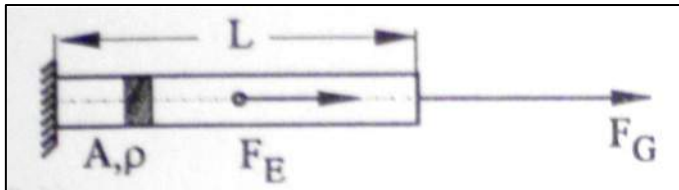
Eigenschaften	Stat. Festigkeit Zug-Druck	Längssteifigkeit Zug-Druck	Schubsteifigkeit Torsion	Knicksteifigkeit von Stäben	Beulsteifigkeit und Biegesteifigkeit	Elastisches Arbeitsaufnahme- vermögen	Schlagzähigkeit	Schwingfestigkeit R = -1 N = 10 <sup>6</sup>
Gütezah	$R_m / (g \cdot \rho)$	$E / (g \cdot \rho)$	$G / (g \cdot \rho)$	$\sqrt[3]{E} / (g \cdot \rho)$	$\sqrt[3]{E} / (g \cdot \rho)$	$\sigma_{prop}^2 / E$	A	$\sigma_{bw} / (g \cdot \rho)$
Stahl	0,49	1,03	1,06	0,60	0,50	0,68	2,50	1,30
Al-Legierung	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Mg-Legierung	1,46	0,89	0,90	1,17	1,31	1,55	2,50	1,20
Ti-Legierung	1,54	0,87	0,89	0,72	0,69	4,54	1,50	2,20
GFK	3,17	0,79	0,32	1,05	1,17	9,14	0,75	1,70
CFK	5,52	6,88	0,37	3,64	3,00	2,29	0,20	2,80
AFK	8,58	1,86	0,15	1,93	1,98	19,78	0,20	3,20
Holz	1,54	0,93	-	2,24	3,05	0,47	0,20	1,20

*Datenquelle: Klein, Leichtbau*

- Zunächst werden die Leichtbaukennzahlen im Hinblick auf die jeweilige mechanische Eigenschaft für die einzelnen Werkstoffe ermittelt.
- Anschließend werden diese Werte zu dem entsprechenden Wert des Bezugswerkstoffs (hier Aluminium) ins Verhältnis gesetzt.

- Vergleichstabelle:**

Leichtbaukennzahlen für ein Bauteil unter Zugbeanspruchung:



$$LBK_z = \frac{R_{p0,2/eH}}{(\rho \cdot g) \cdot L}$$

Werkstoff	Dichte $\rho$	Dehngrenze $R_{p0,2/eH}$	$LBK_z$ für $L=1m$
St 37	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	235 MPa	3.052
St 52-3	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	355 MPa	4.610
AlCuMg 1 F 38	2,70 kg/dm <sup>3</sup>	240 MPa	9.061
MgAl 6 Zn	1,74 kg/dm <sup>3</sup>	220 MPa	12.889
Q StE 460	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	460 MPa	5.973
Ti Cr 5 Al 3	4,30 kg/dm <sup>3</sup>	600 MPa	14.224
GFK (UD; 55%)	1,95 kg/dm <sup>3</sup>	800 MPa	41.820

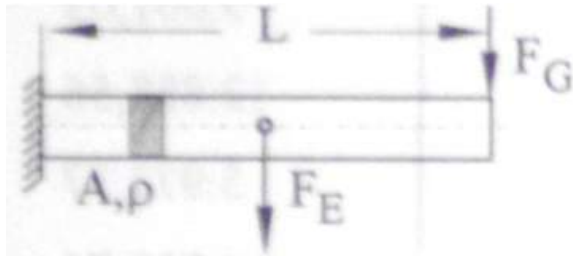
nach: Klein, Leichtbau

**Berechnungsbeispiel für St 37:**

$$LBK_z = \frac{235 \text{ MPa}}{7,85 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \cdot 1 \text{ m}}$$

- Vergleichstabelle:**

Leichtbaukennzahlen für ein Bauteil unter Biegebeanspruchung:



$$LBK_b = \frac{R_{p0,2/eH}}{6 \cdot (\rho \cdot g) \cdot L^2/h}$$

Werkstoff	Dichte $\rho$	Dehngrenze $R_{p0,2/eH}$	$LBK_b$ für $L^2/h = 10m$
St 37	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	235 MPa	50,86
St 52-3	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	355 MPa	76,83
AlCuMg 1 F 38	2,70 kg/dm <sup>3</sup>	240 MPa	151,02
MgAl 6 Zn	1,74 kg/dm <sup>3</sup>	220 MPa	214,81
Q StE 460	7,85 kg/dm <sup>3</sup>	460 MPa	99,56
Ti Cr 5 Al 3	4,30 kg/dm <sup>3</sup>	600 MPa	237,06
GFK (UD; 55%)	1,95 kg/dm <sup>3</sup>	800 MPa	697,00

nach: Klein, Leichtbau

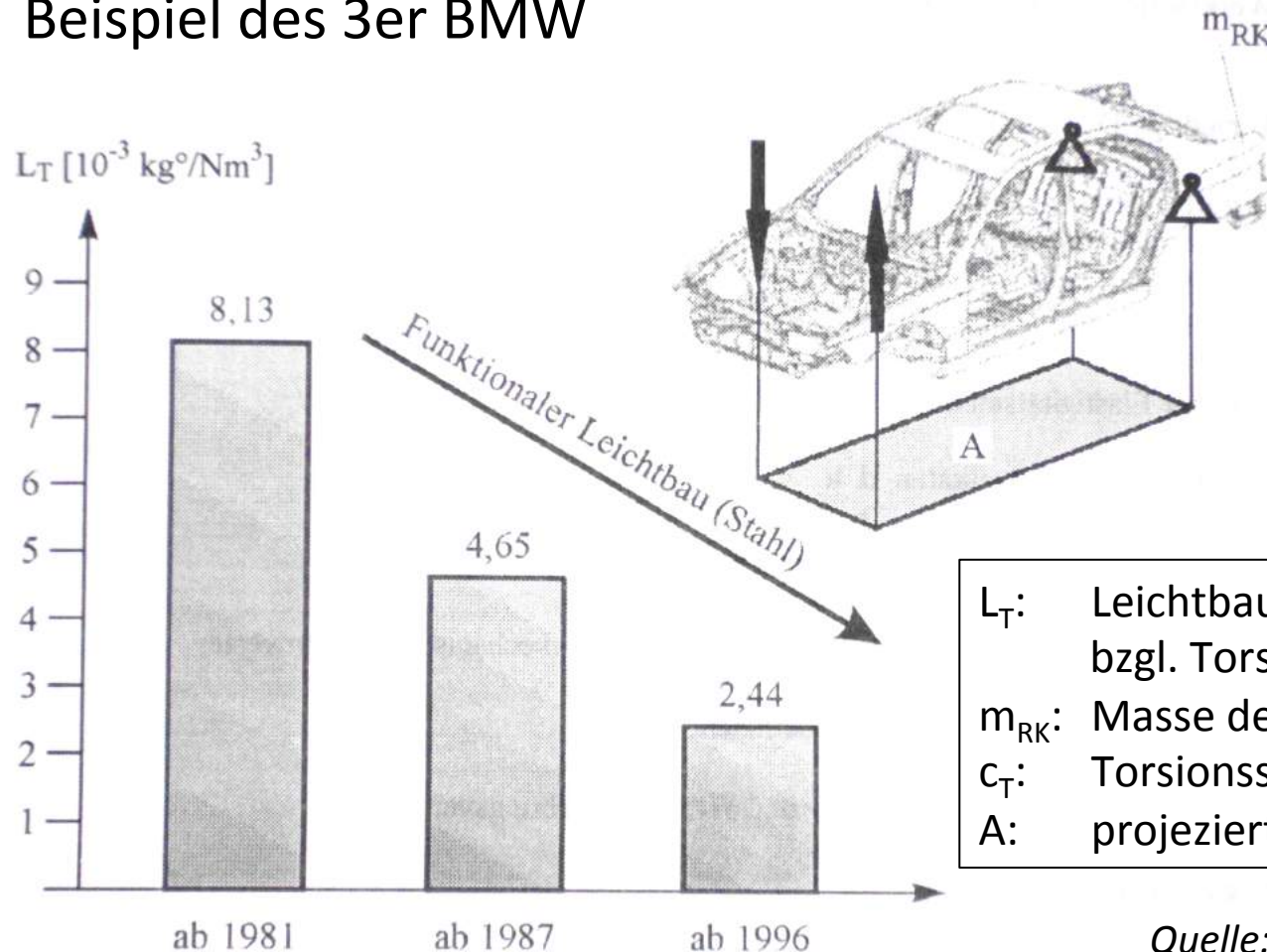
**Berechnungsbeispiel für St 37:**

Bsp.:  $L = 1m$ ;  $h = 0,1 m \Rightarrow L^2/h = 10 m$

$$LBK_b = \frac{235 \text{ MPa}}{6 \cdot 7,85 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \cdot 10m}$$

## • Leichtbaugüte

Beispiel: spezifische Torsionssteifigkeit der Rohkarosserie am Beispiel des 3er BMW



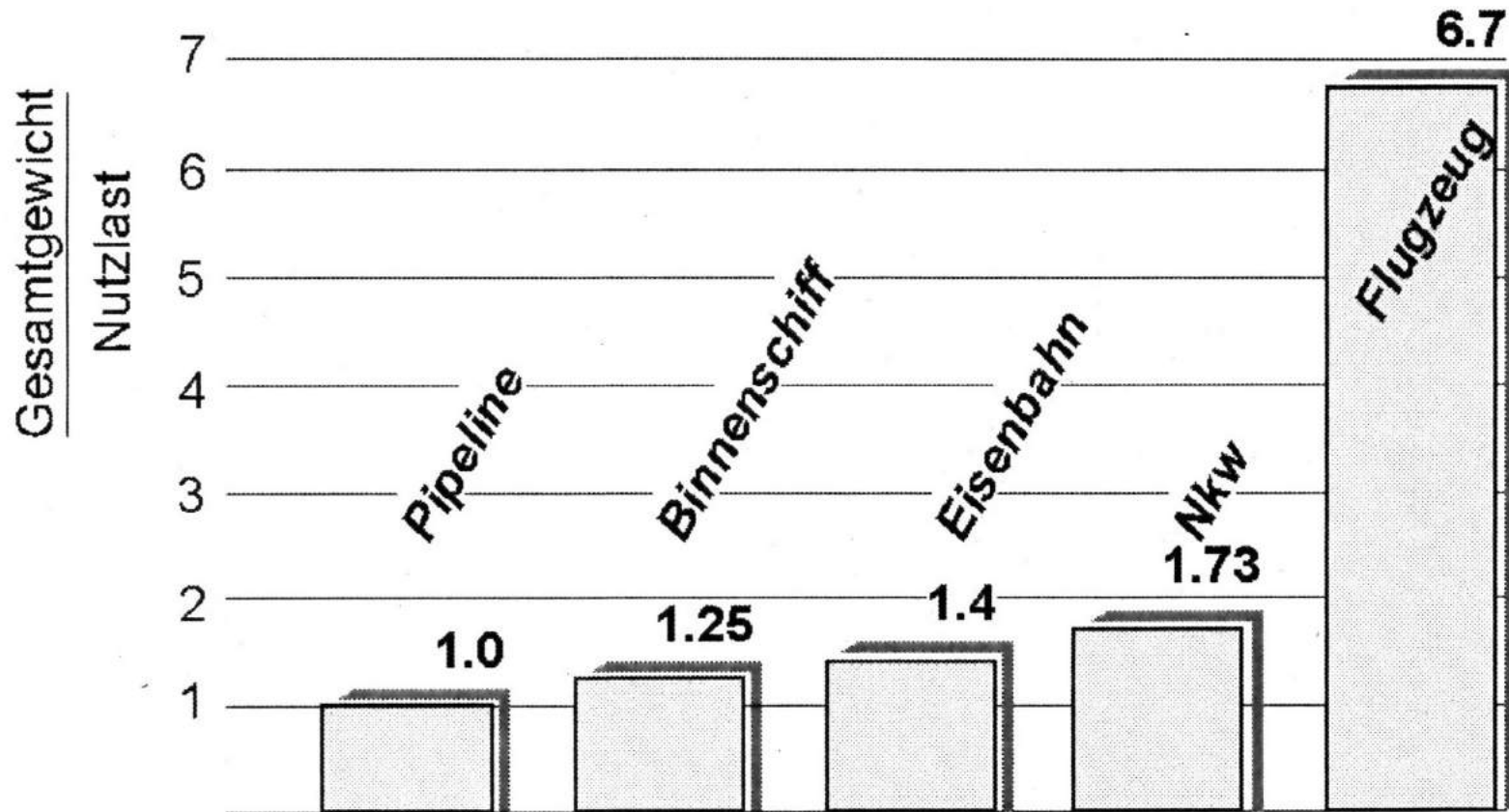
$$L_T = \frac{m_{RK}}{c_T \cdot A}$$

$L_T$ : Leichtbaugüte der Karosserie bzgl. Torsionssteifigkeit  
 $m_{RK}$ : Masse der Rohkarosserie  
 $c_T$ : Torsionssteifigkeit  
 $A$ : projizierte Aufstandsfläche

Quelle: Klein, Leichtbau

- **Leichtbaukennzahl:**

Quotient von Gesamtgewicht zu Eigengewicht:



Quelle: Eckstein, Längsdynamik



## Zusammenfassung Leichtbaukennzahlen:

- Leichtbaukennzahlen sind ein geeignetes Mittel, um die **unterschiedliche** Leichtbaueignung verschiedener **Werkstoffe miteinander** zu **vergleichen**.
- Dabei werden neben der **Dichte** eines Werkstoffes und den **mechanischen Eigenschaften** zusätzlich der entsprechende **Lastfall**, für den der Werkstoff eingesetzt wird berücksichtigt.
- ⇒ So kann sich beispielsweise bei Aluminium im Vergleich zu einem höherfesten Stahl bei reiner Zugbeanspruchung kaum ein Gewichtsvorteil ergeben, wenn Aluminium gegenüber Stahl nur ca.  $1/3$  der Dichte bei  $1/3$  Zugfestigkeit aufweist.
- ⇒ Bei Anwendungen, in denen die Biegesteifigkeit entscheidend ist, hat Aluminium hier beispielsweise dennoch eine deutlich bessere Leichtbaueignung, weil die Bauteildicke bei gleichem Gewicht verdreifacht werden kann und die Dicke in der 3. Potenz in die Biege- bzw. Beulsteifigkeit eingeht.

### Trotzdem gilt:

- Bei der Bewertung der Leichtbaueignung mit Leichtbaukennzahlen sollte der Ingenieur die dargestellten Vergleichswerte kritisch prüfen und ggf. anhand des konkreten Lastfalls nachrechnen.

# Einführung in die Technologie der Faserverbundkonstruktionen



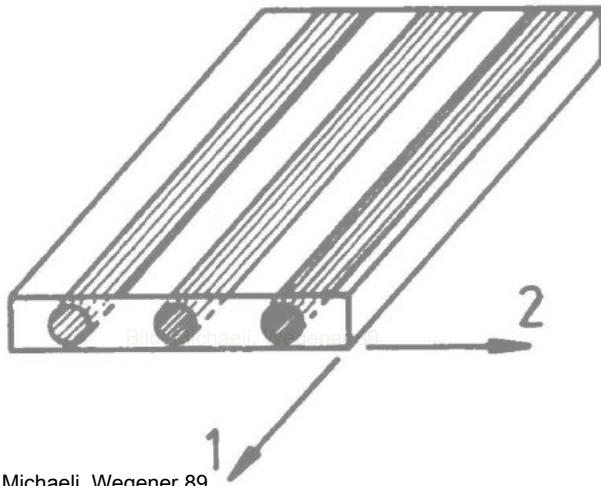
Bild: Mic

Bildquelle: BMW

# Faserverbundwerkstoffe

in Theorie

& Praxis







# Inhalt des der Einführung

- Definition „Faserverbundwerkstoffe“
- Ausgangskomponenten
- Herstellverfahren
- Konstruktionsbeispiele
- Berechnungsverfahren

# Faserverbundwerkstoffe

bestehen aus

- **Fasern**
  - hohe Steifigkeit
  - hohe Festigkeit
- **Matrix**
  - bettet die Fasern ein
  - „stützt“ und „schützt“ die Fasern

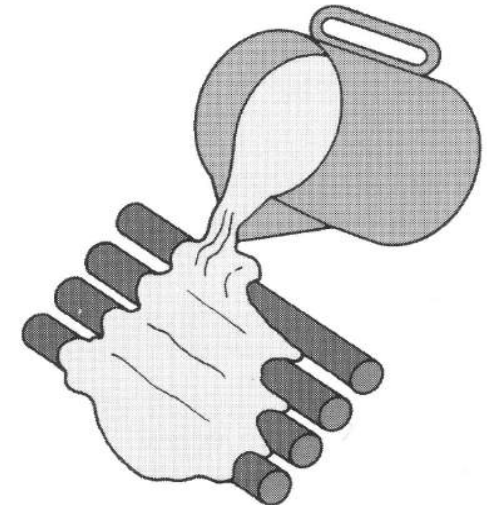


Bild: DLR Stuttgart



# Die Fasern

- bestimmen die **mechanischen Eigenschaften** des Werkstoffverbundes
  - Steifigkeit
  - Festigkeit
  - Wärmedehnung
- haben eine sehr viel höhere **Steifigkeit** und **Festigkeit** als die Matrix

# Die Matrix

- ist die **formgebende Komponente** des Werkstoffverbundes
  - ist bei der Herstellung flüssig
  - bettet die Fasern ein
  - verfestigt sich während des Herstellprozesses
- hat eine (deutlich) höhere **Bruchdehnung** als die Fasern

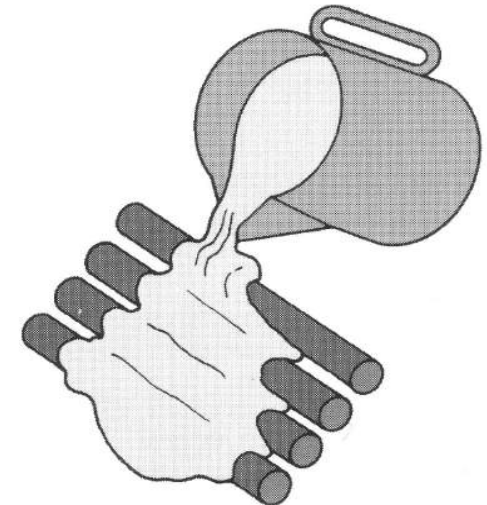


Bild: DLR Stuttgart

# Faserverbundwerkstoffe

- viele Faser / Matrix Kombinationen sind möglich
  - Beton / Stahl
  - Stroh / Lehm
  - Borfaser / Keramik
  - Glasfaser / Kunststoff
  - Kohlenstofffaser / Kunststoff

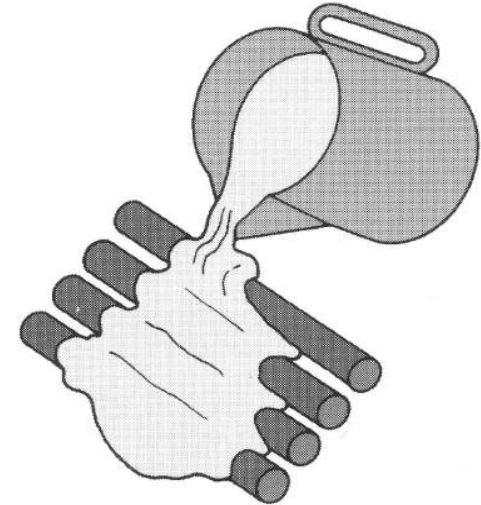
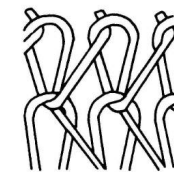
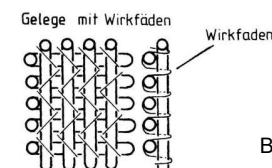
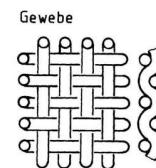
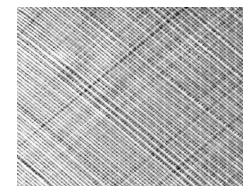
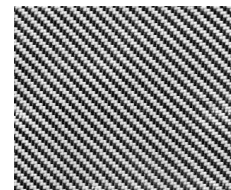
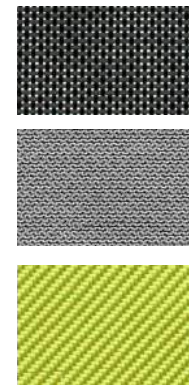


Bild: DLR Stuttgart

- **Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)** erreichen sehr hohe Festigkeiten bei geringem Gewicht

# Fasern für FaserVerstärkte Kunststoffe (FVK):

- verschiedene Typen
  - Kohlenstofffasern (CFK)
  - Glasfasern (GFK)
  - Aramidfasern (AFK)
  - ...
- sind als textile Halbzeuge verfügbar
  - Fäden
  - Vliese
  - Gewebe, Gelege
  - Gewirke, Gestricke, ...



Bildquellen: Michaeli, Wegener 89

# Kunststoffmatrix für FVK

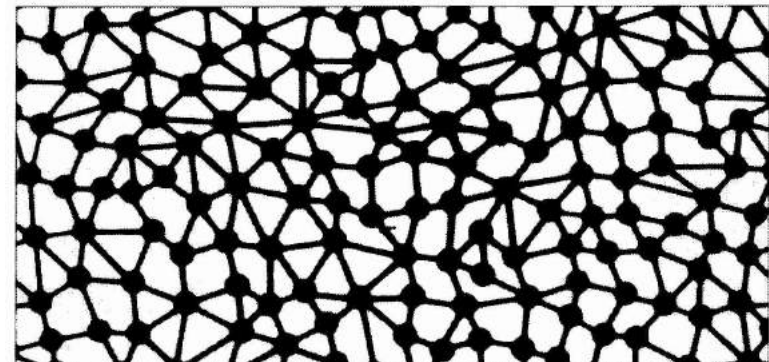
- Thermoplaste



Bildquelle: Gnauck/Fründt

- ⇒ schmelzbar
- ⇒ hohe Verarbeitungstemperaturen
- ⇒ hohe Verarbeitungsviskosität (zähflüssig)
- ⇒ hohe Kriechneigung

- Duroplaste



Bildquelle: Gnauck/Fründt

- ⇒ unschmelzbar (härten aus)
- ⇒ bei Raumtemperatur zu verarbeiten
- ⇒ geringe Verarbeitungsviskosität (dünnflüssig)
- ⇒ geringe Kriechneigung

# Typische Eigenschaften der Ausgangskomponenten

Eigenschaft	Einheit	Fasern			Harz
		Glas	Aramid	Kohle	Epoxidharz
Dichte	g/cm <sup>3</sup> (20°C)	2,6	1,45	1,78	1,19
Zugfestigkeit	MPa	3.400	2.900	3.400	70
E-Modul längs	GPa	73	120	235	3
Bruchdehnung	%	3,5	1,9	1,4	bis 10
Wärmeausdehnungs- koeffizient längs	10 <sup>-6</sup> / K	5	- 3,5 bis -4,1	-0,1	50-70
spez. Elektr. Widerstand	Ohmcm (20°C)	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>-3</sup> bis 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>15</sup>



# Herstellverfahren für Faserverbundbauteile

- sind **Formgebungsverfahren**
- beinhalten mindestens folgende Schritte:
  - Ablage der Fasern
  - Benetzung der Fasern mit Matrixwerkstoff
  - Formgebung des Werkstoffverbundes
  - Verfestigung der Matrix  
(Aushärtung / Abkühlung)

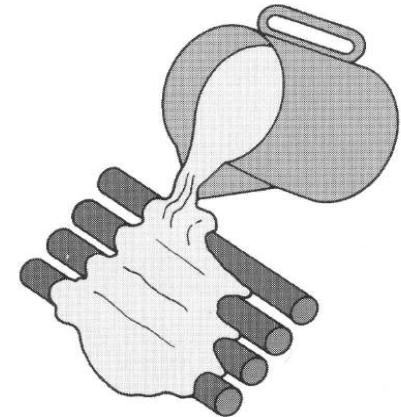
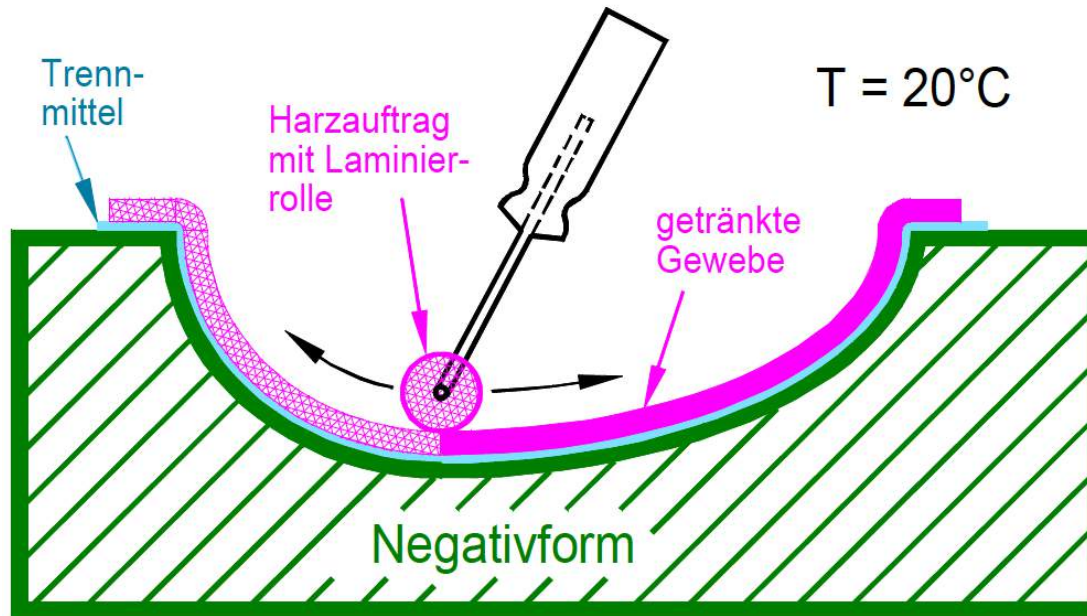


Bild: DLR Stuttgart

## Bsp.: Handlaminierverfahren

- Fasern bzw. Faserhalbzeuge (Gewebe, Gelege, etc.) werden manuell in eine Form gelegt und mittels einfacher Handwerkzeuge (Pinsel, Lackierwalze) mit flüssigem Harz getränkt.
- Verarbeitung und Aushärtung können bei Raumtemperatur (ca. 20°C) erfolgen.

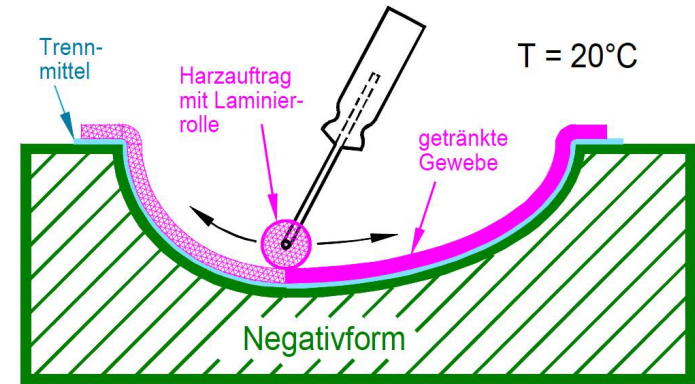


### Das Handlaminierverfahren...

- ...ist universell einsetzbar
- ...erfordert geringe Investitionen
- ...ist ideal für die Ausbildung

# Im Handlaminierverfahren...

- ...werden vorwiegend flächige Faserverbundbauteile hergestellt (Schalenelemente)
- ...können auch komplexe Geometrien hergestellt werden.
- Der **Laminataufbau** erfolgt schichtweise.  
(lat.: lamina:die Schicht)



# Das Vakuumverfahren...

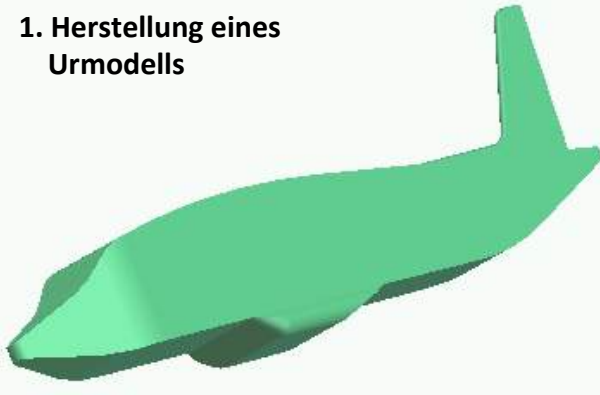
- ... unterstützt viele Herstellverfahren zur **Verbesserung der Laminatqualität**
- Fasern und Matrix werden **während der Aushärtung** durch den Umgebungsdruck verdichtet.
- Das Laminat befindet sich im Vakuum-Unterdrucksack.
- Die Druckdifferenz zwischen Umgebung und Vakuum-Unterdrucksack wirkt als „Presse mit konstantem Flächendruck.“
  - ⇒ Luftblasen und überschüssiges Harz werden aus dem Laminat gepresst
  - ⇒ bei Sandwichbauteilen werden Kern und Deckhäute verpresst

# Konstruktionsbeispiel: Ultraleichtflugzeug *Silence*

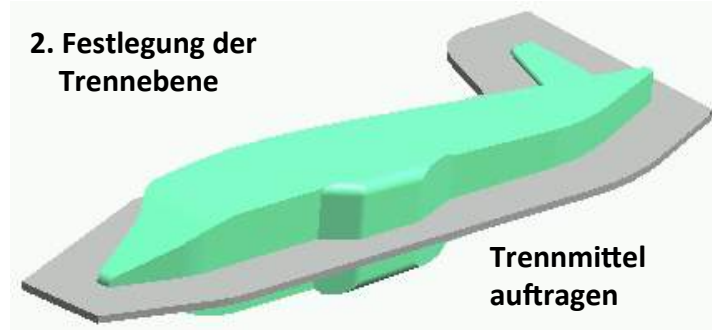


# Formenherstellung:

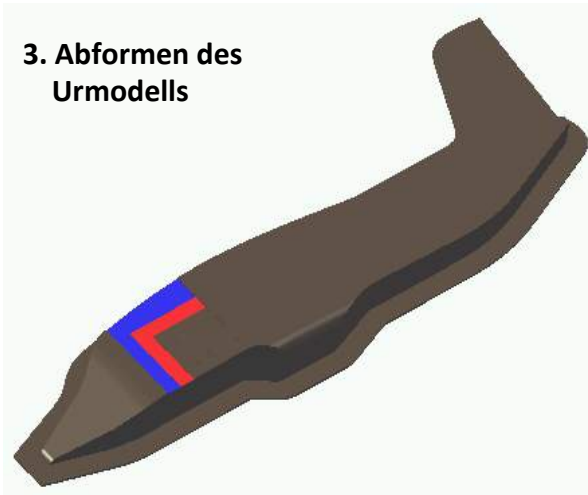
1. Herstellung eines  
Urmodells



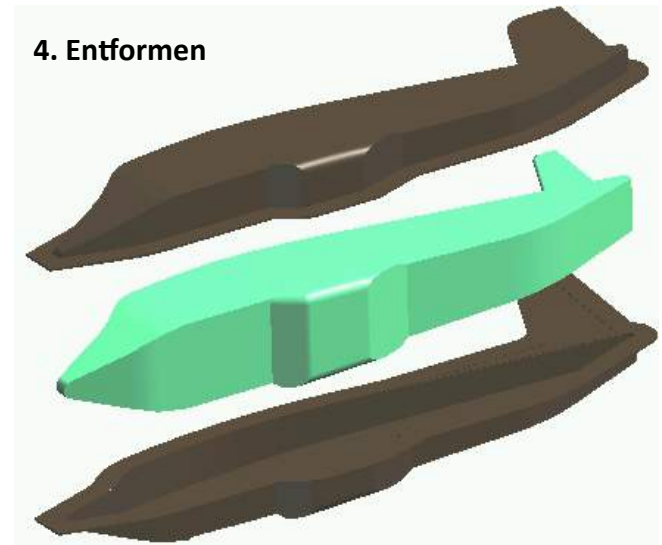
2. Festlegung der  
Trennebene



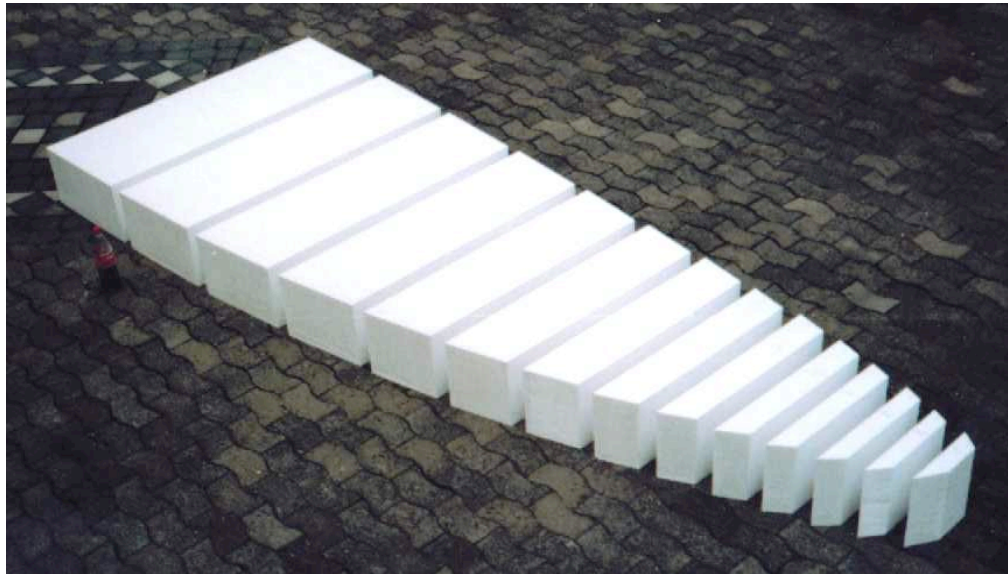
3. Abformen des  
Urmodells



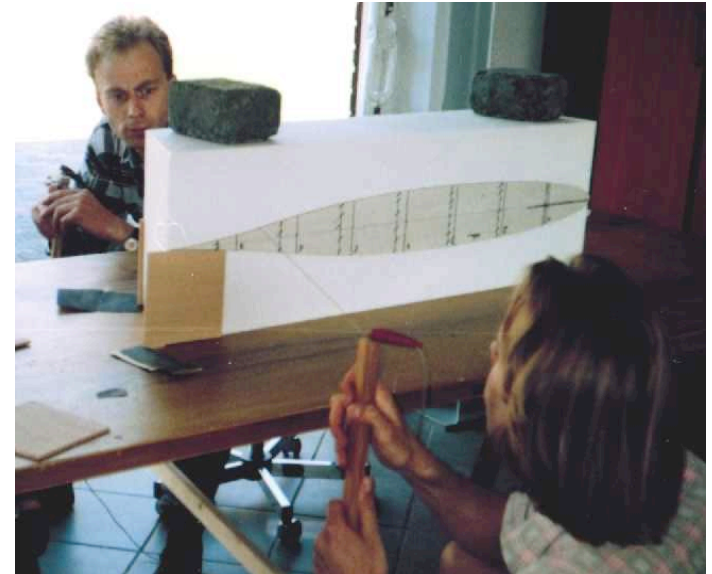
4. Entformen



# Tragflügelurmodell:



Aufteilung des elliptischen Tragflügelgrundrisses in Trapezsegmente



Zuschneiden einzelner Segmente über Schablonen

# Tragflügelurmodell:



Lackiertes Tragflügelurmodell



# Formenherstellung: Rumpfurmodell



# Formenherstellung:

mehrteilige Rumpfform



in Sandwichbauweise



# Formenherstellung:



Verpressen der Formen im  
Vakuumsackverfahren



Öffnen der Formen nach  
dem Aushärten

# Formenherstellung:



Formensatz für die Strukturbauteile des Ultraleichtflugzeuges Silence

# Bauteilherstellung:

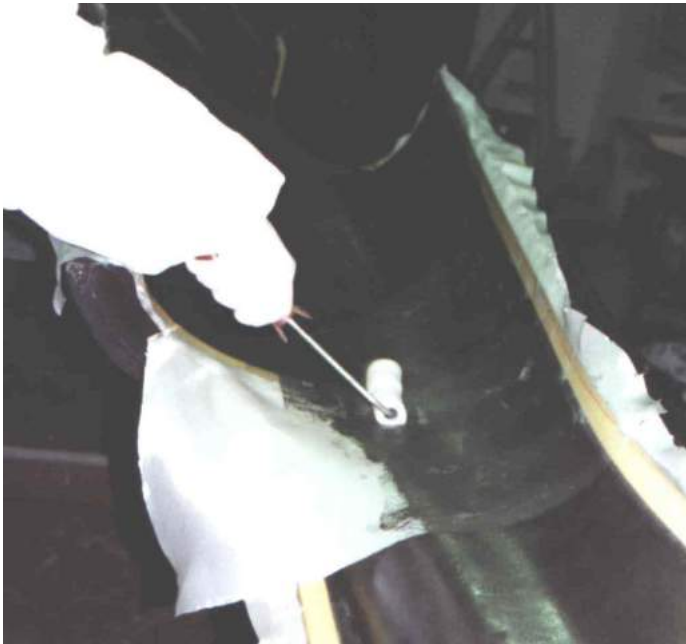


Ausrollen der Form mit Laminierharz



Einlegen der zugeschnittenen  
Gewebestücke

# Bauteilherstellung:



Laminieren der ersten  
Decklage



Verpressen von Decklage und  
Wabenkern im Vakuum

# Bauteilherstellung:



Einlegen des vorgetränkten  
inneren Decklaminates



Entformen des  
Wabensandwichrumpfes

# Take it easy:



Leichtbau in  
**Faserverbund-Wabensandwichbauweise**



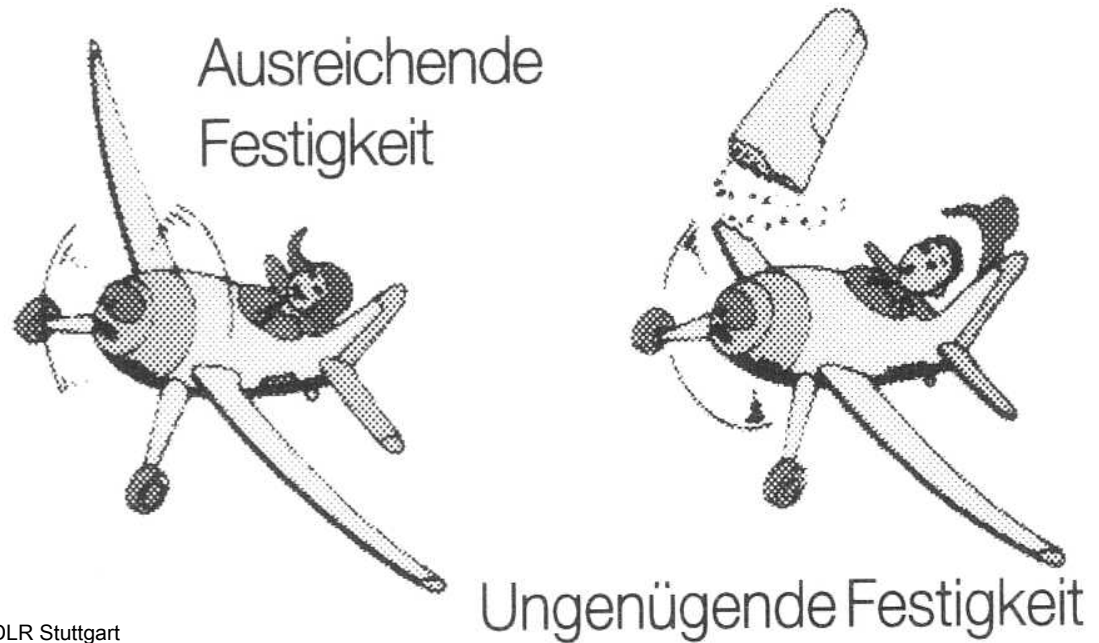
# Bemerkung FVK-Entwicklung

- Vorgenannte „handwerkliche Herstell- und Entwicklungsmethoden sind in der Fahrzeugzulieferindustrie durchaus noch üblich.
- Sie werden zunehmend von modernen Entwicklungsverfahren abgelöst.
- Diese wollen wir hier (auch) kennen lernen.



Bildquelle: [www.race-ing.de](http://www.race-ing.de)

# Berechnungsverfahren

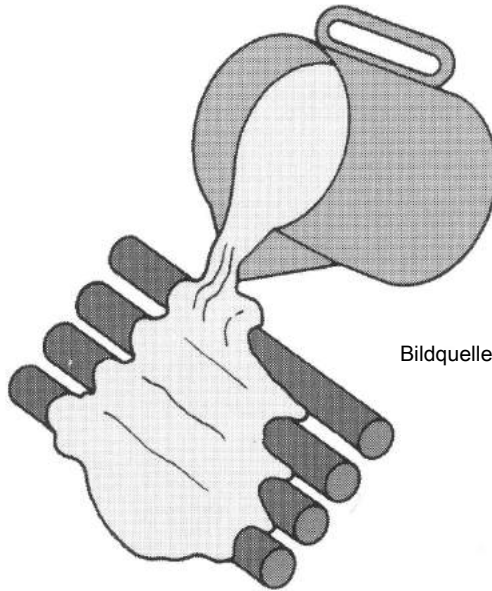


- Zum **Nachweis der Festigkeit** benötigt der Konstrukteur **verlässliche Werkstoffkennwerte**.

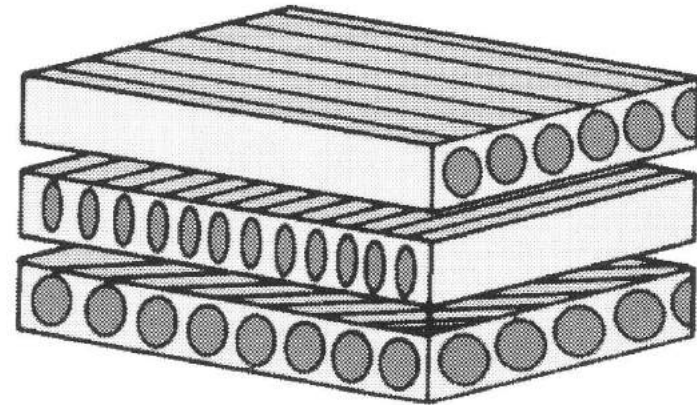
**Für viele Konstruktionswerkstoffe...**

... entnimmt man diese Kennwerte umfangreichen **Tabellensammlungen**.

# Faserverbundwerkstoffe...



Bildquellen: DLR Stuttgart



... entstehen erst bei  
der Bauteilherstellung

⇒ **Der Konstrukteur** (und der Hersteller) sind für die  
**Werkstoffkennwerte selbst verantwortlich!**

# Faser-Verbund-Laminat...

Zu berücksichtigen sind:

- unterschiedliche Faserorientierungen
- Die Fasern sind wesentlich steifer als die Matrix.

⇒ Die Fasern bestimmen die **mechanischen Eigenschaften** des Verbundes

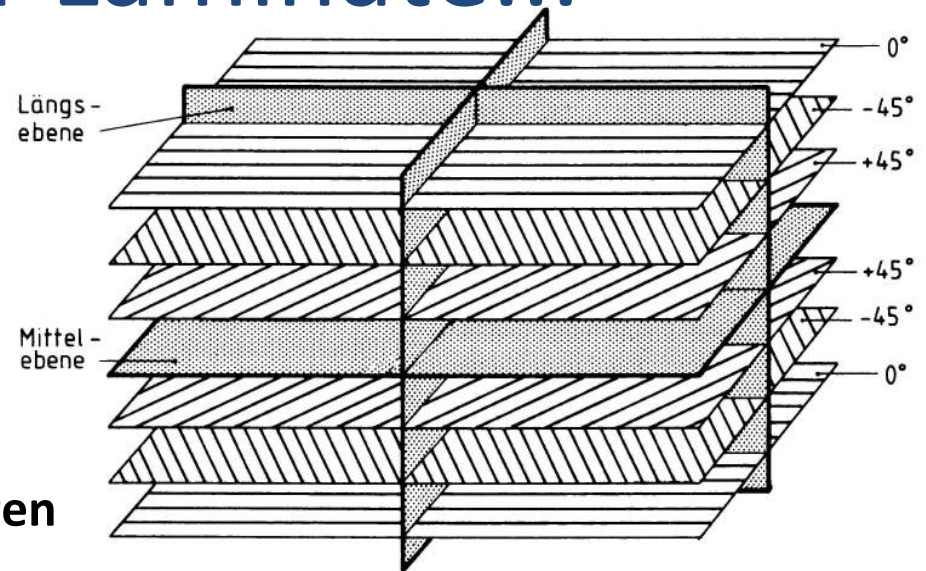
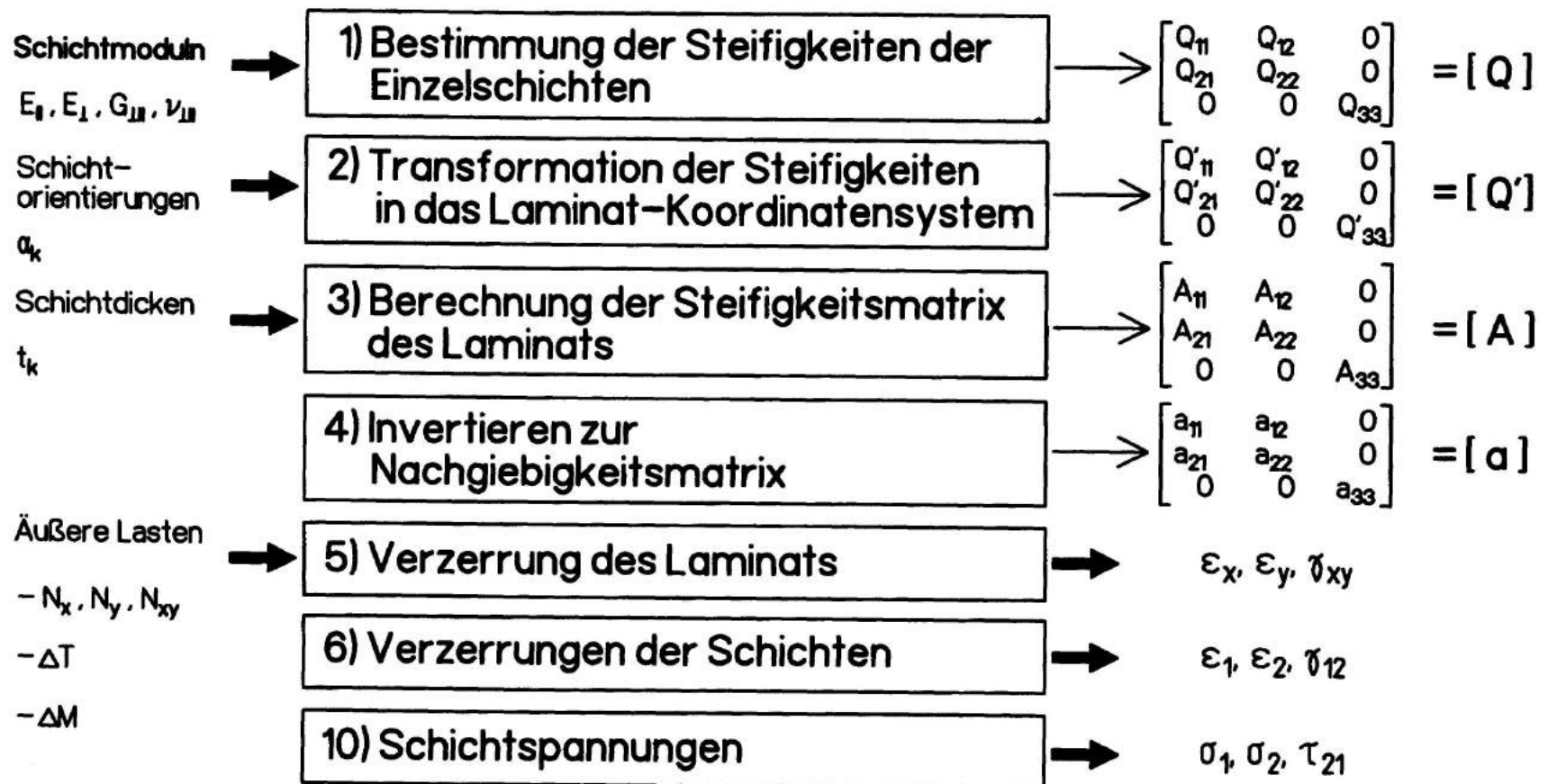


Bild: Michaeli / Wegener 89

Bildquelle: Michaeli / Wegener

# Die klassische Laminattheorie (CLT)

## Ermittlung der mechanischen Laminatkenngößen:

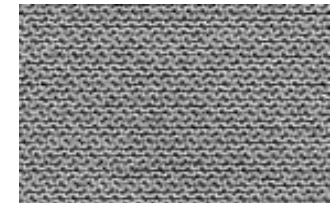
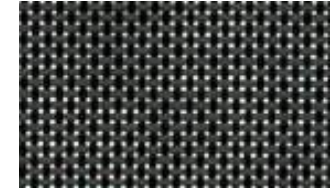
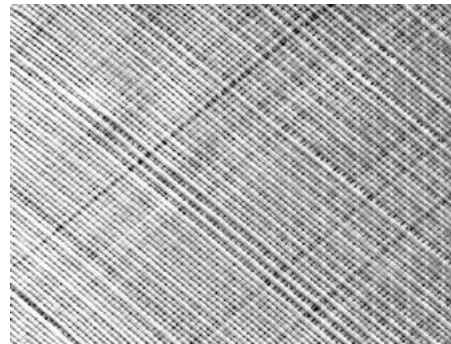
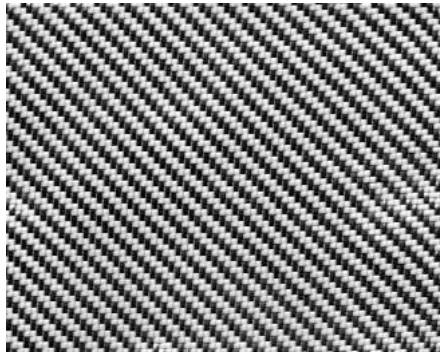




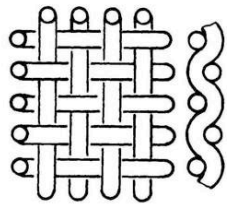
# Zusammenfassung

- Faserverstärkte Kunststoffe haben ausgezeichnete mechanische Eigenschaften bei geringem Gewicht.
- Im Handlaminierverfahren können mit geringen Investitionskosten sehr komplexe Strukturen hergestellt werden.
- Handlaminierete FVK eignen sich sehr gut für Prototypen und kleine Serien.
- Bei Prototypen und Kleinserien ist ein kostengünstiger Werkzeugbau (Formenbau) entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Gesamtentwicklung.
- Für größere Stückzahlen gibt es weitere, maschinelle Fertigungsverfahren.
- Der Konstrukteur von FVK-Konstruktionen muss nicht nur das Bauteil, sondern auch den Werkstoff berechnen.

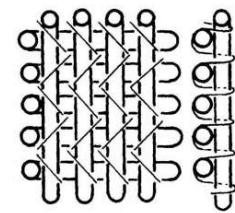
# Fasern und Faserhalbzeuge



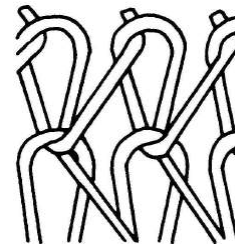
Gewebe



Gelege mit Wirkfäden



Wirkfäden



Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

Fasern und Faserprodukte für

**FaserVerstärkte Kunststoffe**



# Die Fasern

- bestimmen die **mechanischen Eigenschaften** des Werkstoffverbundes
  - Steifigkeit
  - Festigkeit
  - Wärmedehnung
- haben eine sehr viel höhere **Steifigkeit** und **Festigkeit** als die Matrix



# Faserverbundwerkstoffe

- viele Faser / Matrix Kombinationen sind möglich
  - Beton / Stahl
  - Stroh / Lehm
  - Borfaser / Keramik
  - Glasfaser / Kunststoff
  - Kohlenstofffaser / Kunststoff

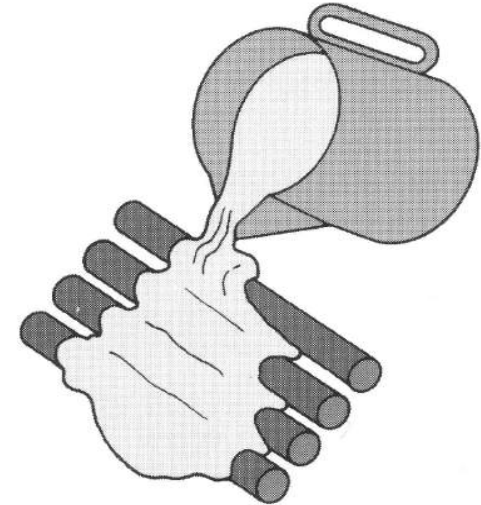


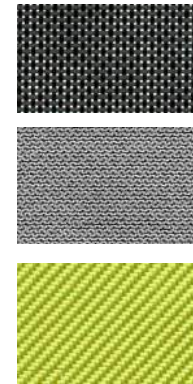
Bild: DLR Stuttgart

- **Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)** erreichen sehr hohe Festigkeiten bei geringem Gewicht

# Fasern für FaserVerstärkte Kunststoffe (FVK):

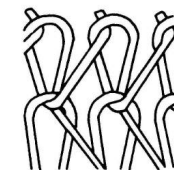
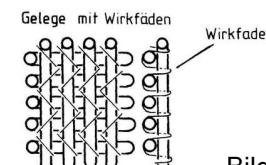
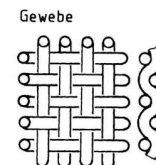
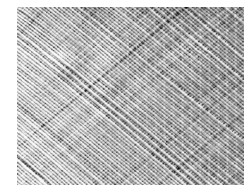
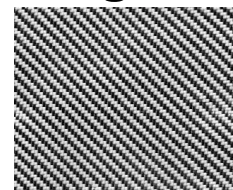
- verschiedene Typen

- Kohlenstofffasern (CFK)
- Glasfasern (GFK)
- Aramidfasern (AFK)
- ...



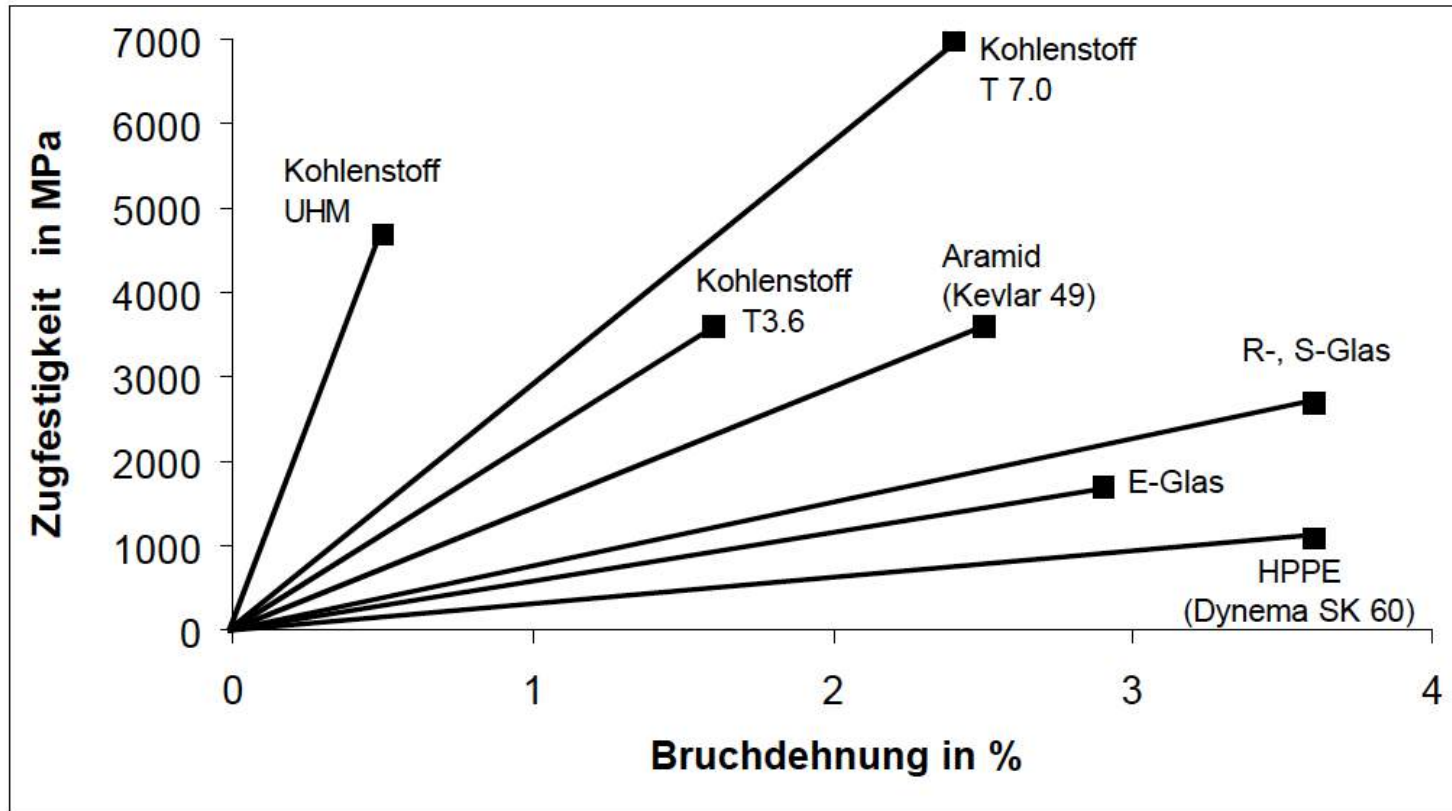
- sind als textile Halbzeuge verfügbar

- Fäden
- Vliese
- Gewebe, Gelege
- Gewirke, Gestricke, ...



Bildquellen: Michaeli, Wegener 89

## Typische Eigenschaften der gebräuchlichsten Verstärkungsfasern :



**Beachte:** Die **Eigenschaften** gelten nur für die jeweiligen Fasern **in Faserrichtung!**

Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

## Typische Eigenschaften der gebräuchlichsten Verstärkungsfasern :

Eigenschaft	Einheit	E-Glas	Aramid HM	C-Faser HT
Dichte	g/cm <sup>3</sup> (20°C)	2,6	1,45	1,78
Zugfestigkeit	MPa	3.400	2.900	3.400
E-Modul längs	GPa	73	120	235
E-Modul quer	GPa	73	5,4	15
Bruchdehnung	%	3,5	1,9	1,4
Wärmeausdehnungs- koeffizient längs	10 <sup>-6</sup> / K	5	- 3,5 bis -4,1	-0,1
Wärmeausdehnungs- koeffizient quer	10 <sup>-6</sup> / K	5	17	10
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	1	0,04 - 0,05	17
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>-3</sup> bis 10 <sup>-4</sup>
Feuchtigkeitsaufnahme (20°C, 65% rel.Feuchte)	%	0,1	3,5	0,1

# Glasfasern

sind sehr preisgünstig und die am meisten genutzten Verstärkungsfasern:

Eigenschaft	Einheit	E-Glas
Dichte	g/cm <sup>3</sup> (20°C)	2,6
Zugfestigkeit	MPa	3.400
E-Modul	GPa	73
Bruchdehnung	%	3,5 - 4
Querkontraktionszahl	-	0,18
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	10 <sup>15</sup>
Dielektrizitätskonstante	10 <sup>6</sup> Hz	5,8 - 6,7
thermischer Ausdehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> / K	5

Chemische Zusammensetzung (Richtwerte)		
SiO <sub>2</sub>	%	53 - 55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	14 - 15
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6 - 8
CaO	%	17 - 22
MgO	%	< 5
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	%	< 1
andere Oxide	%	ca. 1

- Die Dichte und der E-Modul der Glasfaser liegen im Bereich von Aluminium.
- Die Glasfaser ist eine der wenigen Verstärkungsfasern mit orthotropen Eigenschaften

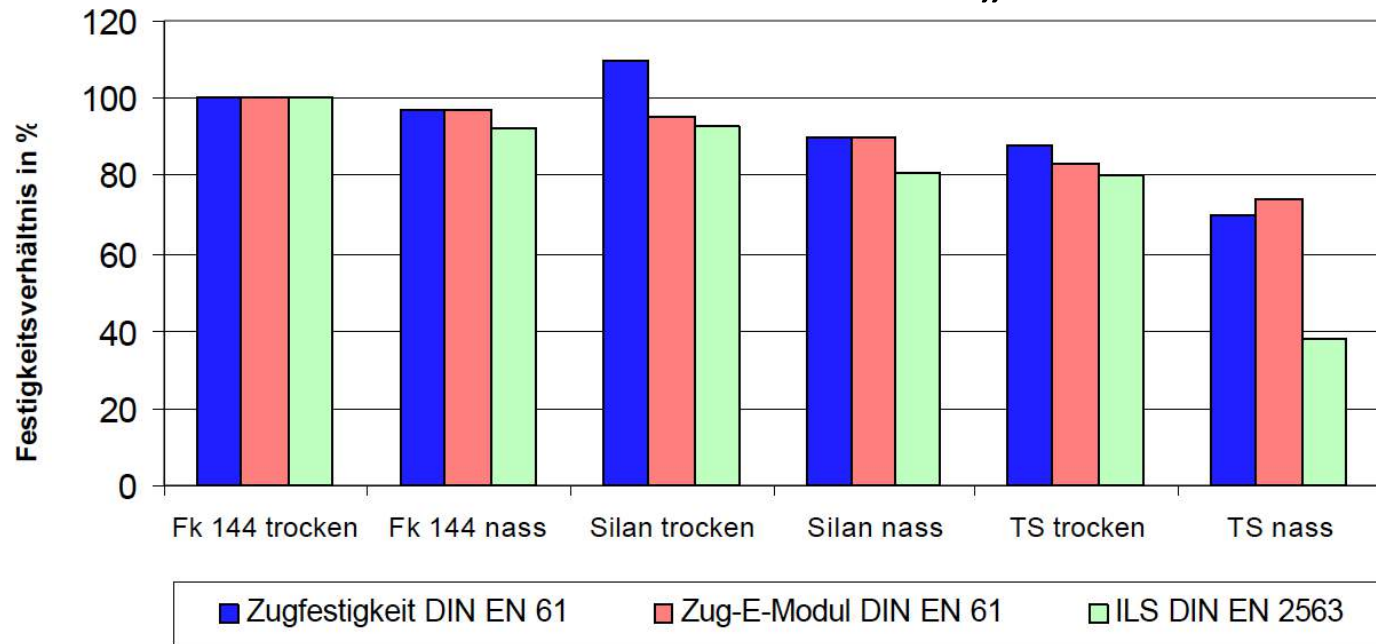


# Glasfasern

werden aus der flüssigen Glasschmelze gezogen und versponnen

- Die E-Glasfaser wurde ursprünglich für **Elektrotechnische** Anwendungen entwickelt.
- E-Glasfasern sind sehr günstig herstellbar und daher weit verbreitet.
- R- und S-Glasfasern haben etwas bessere mechanische Eigenschaften, sind aber deutlich teurer und nicht so weit verbreitet.
- Die meisten verfügbaren Glasfaserhalbzeuge (Gewebe, Gelege) sind aus E-Glasfasern hergestellt.
- Glasfasern sind transparent (Glas).
- Zur besseren Verklebung mit den Matrixharzen sind die Oberflächen angeraut, so dass sie aufgrund der Lichtbrechung weiß erscheinen. (vergl.: Milchglasscheibe!)
- Wenn beim Laminieren die Oberflächenrauigkeiten mit transparentem Harz gefüllt werden, wird das Laminat transparent. Auf diese Weise lässt sich bei GFK-Laminat der Tränkungsgrad sehr gut kontrollieren.

**Glasfasern:** Haftvermittler verbessern zusätzlich die Verklebung mit dem Matrixwerkstoff. Sie werden auch als „**Schlichte**“ bezeichnet.



- Die Textilschlichte macht die Glasfaser für den Webprozess geschmeidig. Sie muss nach dem Webprozess entfernt werden, da sie die Verklebung verschlechtert.
- Die Silanschlichte ist die Standardschlichte für Glasfasern.
- Fk 144 und Schichten ähnlicher Bezeichnung sind firmenspezifische Sonderschichten, die im Vergleich zur Silanschlichte eine verbesserte Haftung zwischen Glasfasern und Kunstharzen gewährleisten. Sie werden allgemein auch als „Finish“ bezeichnet.

## Aramidfasern (Aromatisiertes Polyamid)

wurden Anfang der 70er Jahre von DuPont entwickelt.

Eigenschaft	Einheit	Niedermodul- faser (LM)	Hochmodul- faser (HM)
Herstellerbezeichnung	DuPont Akzo	Kevlar 29 Twaron	Kevlar 49 Twaron
Dichte	g/cm <sup>3</sup> (20°C)	1,44	1,45
Zugfestigkeit	MPa	2.800	2.900
Zug-E-Modul	GPa	59	127
Bruchdehnung	%	4	1,9
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
thermischer Aus- dehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> / K	- 2,3	- 4,1
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	0,04	0,4
Zersetzungstemperatur	°C	550	550
Feuchtigkeitsaufnahme (20°C, 65% rel.Feuchte)	%	7	3,5

- Aramidfasern sind besonders zäh.  
⇒ Schwierig zu verarbeiten.
- Bauteile aus Aramid haben eine sehr hohe Schlagzähigkeit und werden daher bevorzugt für Panzerungen eingesetzt.
- Die Druckfestigkeit der Aramidfasern ist gering und sie lassen sich nur schlecht mit Kunstharzen verkleben.  
⇒ Dynamisch belastete Bauteile mit Aramidfaserverstärkung neigen zum Delaminieren.
- Aramidfasern sind besonders UV-empfindlich und neigen zur Feuchtigkeitsaufnahme

- Aramidfasern von **DuPont** werden unter dem Markennamen **Kevlar** vertrieben.
- Aramidfasern von **Akzo** werden unter dem Markennamen **Twaron** vertrieben.



# Kohlenstofffasern (Carbonfasern)

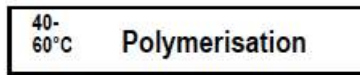
bestehen zu über 90% aus reinem Kohlenstoff

## Carbonfaserherstellung

auf der Basis von

### Polyacrylnitril

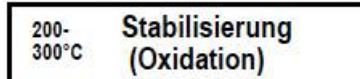
(Acrylnitril AN)



Polyacrylnitril (PAN)



anisotrope PAN-Faser



oxidierte PAN-Faser  
(unschmelzbar)

### Mesophasenpech

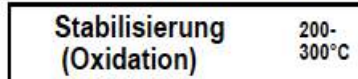
isotropes Pech (QI-frei)



Pech mit Flüssigkristallen  
(Mesophasenpech = MPP)



anisotrope Pechfaser



oxidierte Pechfaser  
(unschmelzbar)

### PAN-Typen

HT	- 240 GPa
IM	- 300 GPa
HM	≤ 400 GPa
UHM	> 400 GPa bis 560 GPa

### Carbonisierung

1200°C	
1500°C	1600°C
1700°C	
	2000°C
	2200°C
	Graphitierungs- glühung
	3000°C

### MPP-Typen

< 500 GPa	HM
≥ 500 GPa bis 900 GPa	UHM

- Bei der Herstellung der Carbonfasern werden Kunststoffäden auf der Basis von Polyacrylnitril oder Mesophasenpech in langen Öfen bei hoher Temperatur „verkokt“.
- Entscheidend für die Eigenschaften der Fasern ist insbesondere die gleichmäßige Fadenvorspannung im Glühprozess sowie die Glühtemperatur.
- So entstehen graphitische Schichten, die in Faserrichtung orientiert sind.
- Je höher der Reinheitsgrad und je homogener die Orientierung, desto höher die mechanischen Eigenschaften.
- Der theoretische E-Modul der Kohlenstofffaser liegt bei 1.024 GPa (E-Modul des Diamantgitters)
- Ultra-Hochmodulfasern (UHM) können E-Module bis 900 GPa erreichen

## Typische Eigenschaften der Kohlenstofffasern:

Eigenschaft	Einheit	HT (HTA)	IM (IM 600)	HM (HM 35)
Dichte	g/cm <sup>3</sup> (20°C)	1,78	1,8	1,97
Zugfestigkeit	MPa	3.400	5.400	2350
Zug-E-Modul	GPa	235	290	358
Bruchdehnung	%	1,4	1,7	0,6
spez. Elektr. Widerstand	Ohm/cm (20°C)	710	---	710
thermischer Aus- dehnungskoeffizient	10 <sup>-6</sup> / K	- 0,1	---	-0,5
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	17	---	115
spez. Wärme	J / kgK	710	---	710

- Zwischenmodulfasern (**InterModulus IM**) haben gegenüber der Standard-Hochfestigkeitsfaser (**HighTensity HT**) einen höheren E-Modul und eine größere Bruchdehnung.
- Kohlenstofffasern sind elektrisch leitfähig, haben aber einen hohen spezifischen Widerstand (950 mal höher als Kupfer)



## Typische Eigenschaften der Kohlenstofffasern:

- Kohlenstofffasern werden nach der Herstellung mit einer Epoxidschlichte versehen (ca. 1%)
  - ⇒ Die Verklebbarkeit mit Epoxidharzen ist besonders gut.
  - ⇒ Kohlenstofffaser verstärkte Epoxidbauteile haben eine besonders hohe dynamische Dauerfestigkeit. Sie kann bis zu 80% der Eingangsfestigkeit betragen.
- Kohlenstofffaserlaminat haben eine besonders „interessante“ Optik.
- Sogenannte „Carbonsichtbauteile“ werden mit speziellen Klarlacken mehrschichtig lackiert und erzielen in einigen Anwendungen sehr hohe Verkaufspreise („schwarzes Gold“)

## Typische Eigenschaften der Kohlenstofffasern:

- Ein einzelnes Filament einer Kohlenstofffaser hat einen Durchmesser von ca. 7  $\mu\text{m}$ . **Mehrere Tausend Filamente** werden zu einem Faden versponnen.
- ⇒ **k-Zahl** der Kohlenstofffasern
- Folgende Fadenstärken der HT-Fasern sind üblich:

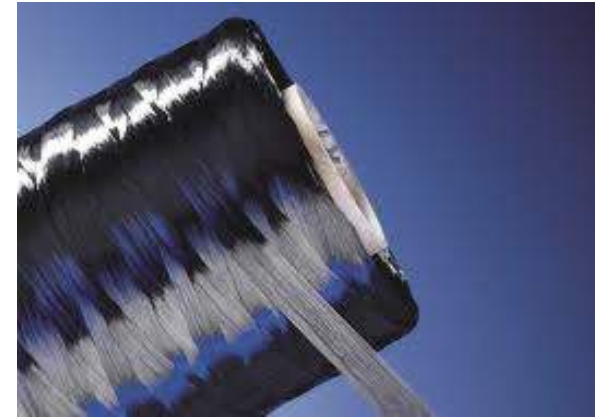
C-Faser-Fäden			ca. Fadenquerschnitt
<b>1 k</b>	<b>1.000</b> Einzelfilamente	(67 tex)	0,038 mm <sup>2</sup>
<b>3 k</b>	<b>3.000</b> Einzelfilamente	(200 tex)	0,112 mm <sup>2</sup>
<b>6 k</b>	<b>6.000</b> Einzelfilamente	(400 tex)	0,225 mm <sup>2</sup>
<b>12 k</b>	<b>12.000</b> Einzelfilamente	(800 tex)	0,449 mm <sup>2</sup>
<b>24 k</b>	<b>24.000</b> Einzelfilamente	(1.600 tex)	0,899 mm <sup>2</sup>

- Die tex-Zahl bezeichnet das Längengewicht der Faser:  
**1 tex = 1 g/km**
- Aus der tex-Zahl und der Dichte lassen sich der Fadenquerschnitt berechnen.

Angaben sind ca.-Werte,  
die aus der tex-Zahl und  
der Dichte berechnet  
wurden!

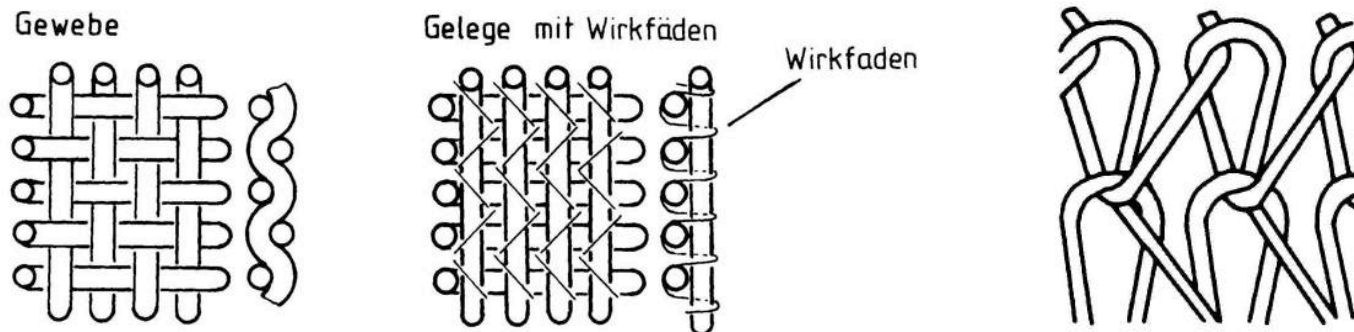
## Lieferformen von Verstärkungsfasern:

- Verstärkungsfasern bestehen aus mehreren Tausend Einzelfilamenten, die zu Fäden versponnen sind und auf Spulen aufgewickelt werden.
- Die Fadenstärke wird als Längengewicht in **[tex]** angegeben.
- Einzelne Fäden oder Fadenbündel werden nur selten direkt zu einem Bauteil weiter verarbeitet.
- Insbesondere für Bauteile mit großer Oberfläche empfiehlt sich die Weiterverarbeitung der Fasern zu textilen Flächengebilden.
- Textile Flächengebilde werden als Vliese, Gewebe, Gelege o.Ä. als Rollenware geliefert und lassen sich rationell weiter verarbeiten.



## Textile Faserhalbzeuge:

- Verstärkungsfasern bestehen aus mehreren Tausend Einzelfilamenten, die zu Fäden versponnen sind und auf Spulen aufgewickelt werden.
- Die Fadenstärke wird als Längengewicht in **[tex]** angegeben.
- Einzelne Fäden oder Fadenbündel werden nur selten direkt zu einem Bauteil weiter verarbeitet.
- Insbesondere für Bauteile mit großer Oberfläche empfiehlt sich die Weiterverarbeitung der Fasern zu textilen Flächengebilden.
- Textile Flächengebilde werden als Vliese, Gewebe, Gelege o.Ä. als Rollenware geliefert und lassen sich rationell weiter verarbeiten.

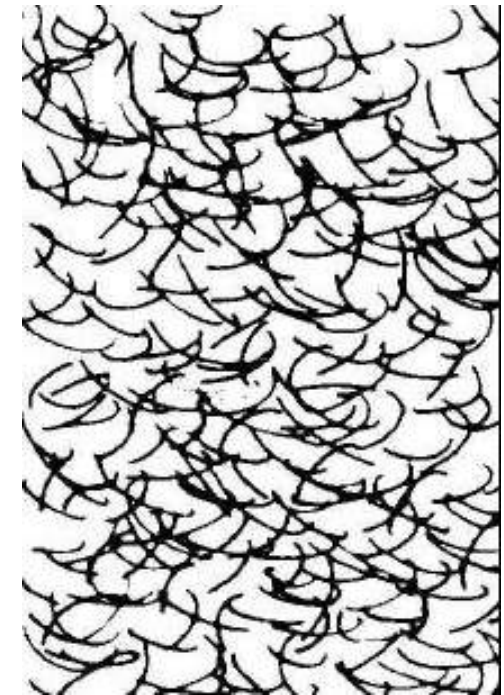


## Textile Faserhalbzeuge:

- Die Angabe der Materialstärke von textilen Flächengebilden erfolgt als Flächengewicht in  $\text{g/m}^2$ .
- Manchmal werden von den Herstellern auch Angaben zur Dicke in mm gemacht. Diese sind aber zumeist recht ungenau, und es sollte eine Umrechnung aus dem Flächengewicht zur Laminatstärke unter Einbeziehung des Faservolumenanteils, der Fadendichte und der Lagenanzahl vorgenommen werden.
- Grob lassen sich drei Gruppen von textilen Flächengebilden unterscheiden:
  - ⇒ Vliese,
  - ⇒ nichtmaschenbildende Systeme (Gewebe, Gelege, Geflechte),
  - ⇒ maschenbildende Systeme (Gewirke, Gestricke).

## Vliese:

- Vliese sind Flächengebilde aus Kurzfasern (Fasern mit mehreren cm Länge)
- Fasern werden geschnitten und fallen auf ein Förderband. Dabei ist ihre Faserorientierung regellos statistisch verteilt.
- Damit das Fasergebilde zu einem Flächengebilde zusammen hält, werden die Fasern mit einem Binder versehen.
- Oft sind die Binder styrollöslich, damit sie sich unter Einwirkung von Polyester auflösen. Entsprechend lassen sich auch dicke Vliese, die zunächst beim Abwickeln von der Rolle sehr steif sind, bei der Weiterverarbeitung sehr gut in Ecken und Kanten drapieren.
- Die Verarbeitung von Vliesen erfolgt vorzugsweise in Polyesterlaminaten. Es werden nur geringe Faservolumenanteile (20-30%) erreicht.
- Manchmal werden Vliese auch als Verschleißschicht in hochwertigen Epoxidlaminaten als harzreiche Oberflächenschicht eingesetzt.
- Vliese werden in der Praxis auch als „Matten“

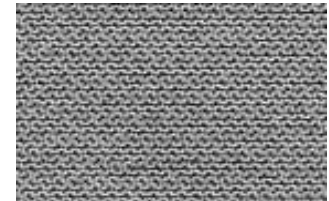
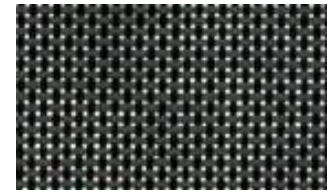


Bildquelle:  
Michaeli, Wegener 89

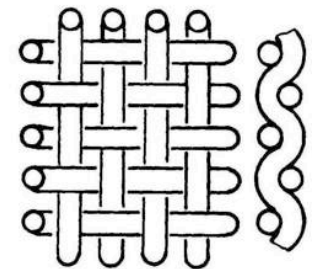


## Gewebe:

- Gewebe zählen wie Gelege und Geflechte zu den nicht maschenbildenden Faserhalbzeugen. Sie sind neben den Gelegen die am häufigsten verwendeten textilen Faserhalbzeuge.
- Die Herstellung erfolgt wie bei auf Webstühlen.
- Übliche Gewebe werden in Breiten zu 100 cm oder 120 cm gewoben.
- Sonderbreiten sind möglich
- Typisch für Gewebe sind die beiden orthogonal zueinander ausgerichteten Faserrichtungen:
- Der Kettfaden ist im Kettbaum des Webstuhls eingefädelt und verläuft in Längsrichtung (Aufrollrichtung) des Gewebes.
- Üblicher Weise wird die Kettrichtung auch als Bezugsrichtung ( $0^\circ$ ) bei der Bezeichnung der Faserorientierung gewählt.
- Der Schussfaden wird beim Webprozess senkrecht zur Kettrichtung „durchgeschossen“.
- Gewebe halten dadurch zusammen, dass Kett und Schussfaden ineinander verwoben sind. Dadurch ist eine weitere Fixierung der sich kreuzenden Fäden zumeist nicht erforderlich.
- Gewebe haben (i.A.) zwei senkrecht zueinander ausgerichtete Faserrichtungen).
- Die verwobenen Fadenkreuzungen bedingen eine Umlenkung der Fäden, die auch als **Fadenondulation** bezeichnet wird.



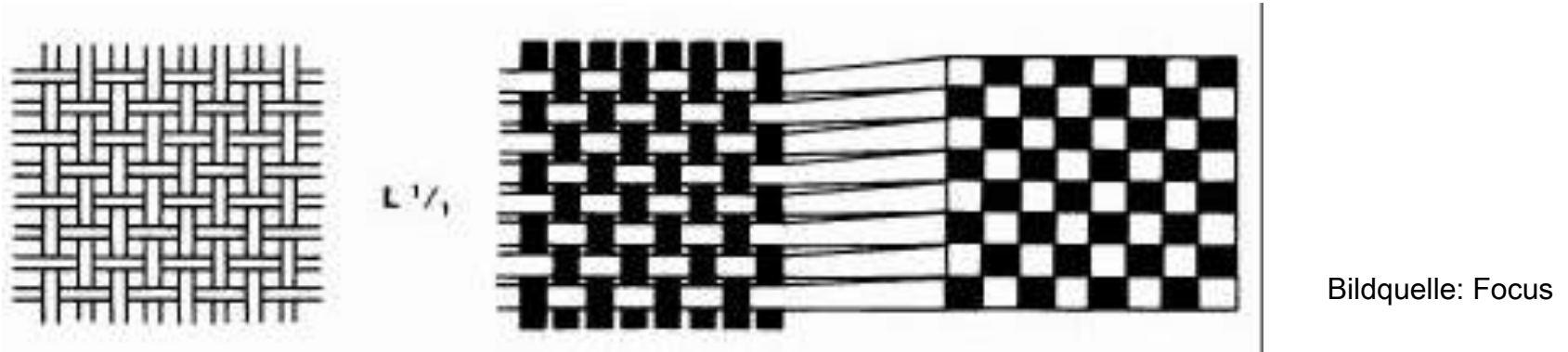
Gewebe



Bildquelle:  
Michaeli, Wegener 89

# Webarten:

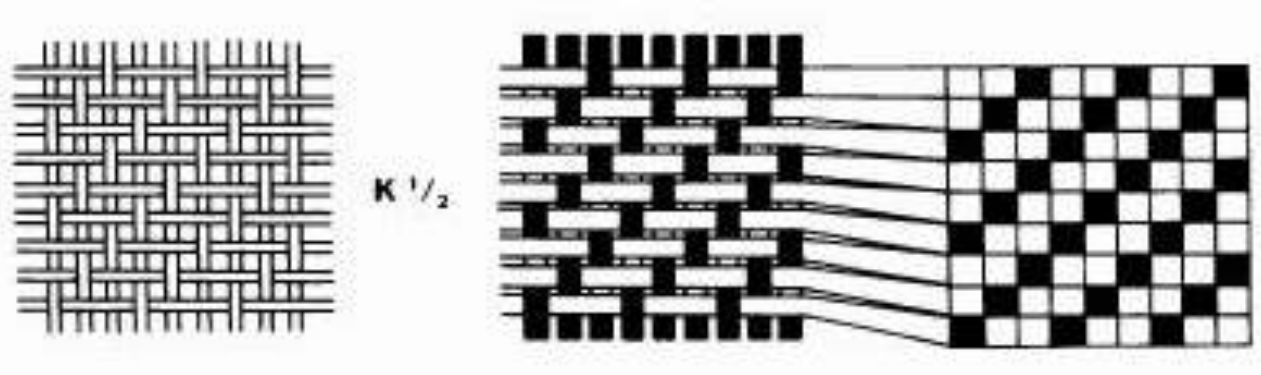
## Leinwandbindung:



- Bei der Leinwandbindung verlaufen Kett- und Schussfaden abwechselnd unter einem einzelnen kreuzenden Faden her und über den nächsten Faden drüber.
- Im Gewebebild ergibt sich ein schachbrettartiges Gewebemuster.
- Es ergeben sich sehr viele Fadenkreuzungen, so dass das Leinwandgewebe von allen Webarten die höchste Schiebefestigkeit hat.
- Die Leinwandbindung bedingt aber auch eine vergleichsweise starke Fadenondulation und eine vergleichsweise schlechte Drapierbarkeit (räumliche Verformbarkeit) des Gewebes.

# Webarten:

## Körperbindung:

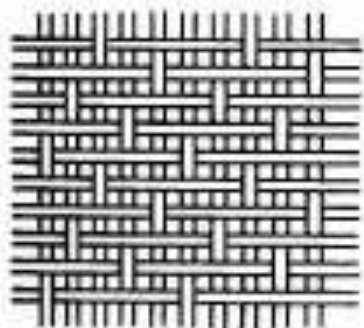


Bildquelle: Focus

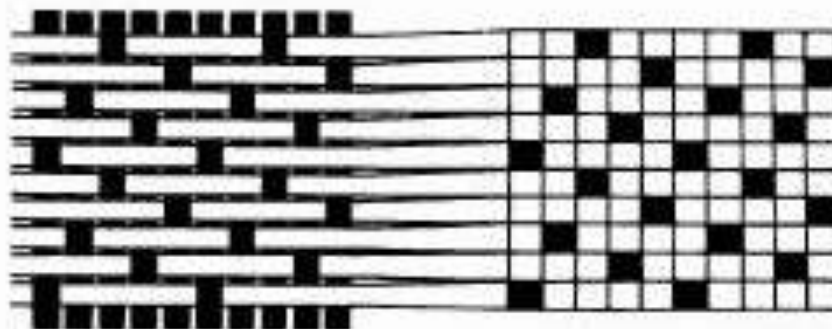
- Bei der Körperbindung ist die Anzahl der überkreuzten Fäden unterschiedlich.
- Bei der hier dargestellten 1/2 Körperbindung taucht ein Faden unter einem einzelnen Faden drunter her, und überkreuzt dann zwei Querfäden.
- Typisch für Körperbindung ist das Gewebemuster, bei dem unter 45° zur Faserrichtung sich ein sogenannter „Körpergrad“ (auch als „Körperstich“ bezeichnet) ausbildet.
- Es ergeben sich weniger Fadenkreuzungen als beim Leinwandgewebe, so dass das Köpergewebe eine geringere Schiebefestigkeit aber eine höhere Drapierfähigkeit als Leinwandgewebe aufweisen.
- Die Fadenondulation ist etwas geringer als bei der Leinwandbindung.

## Webarten:

**Atlasbindung:** (auch als „Satinbindung“ bezeichnet)



A 1/4

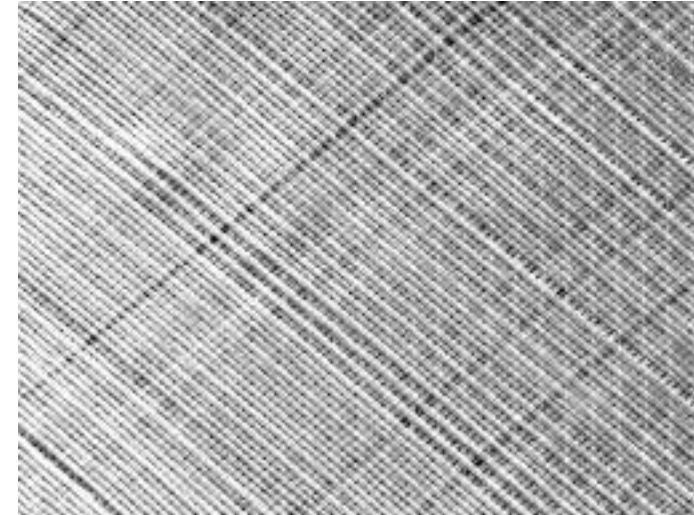


Bildquelle: Focus

- Atlasgewebe haben noch einmal weniger Kreuzungspunkte als Köpergewebe.
- Bei der hier dargestellten 1/4 Atlasbindung taucht ein Faden unter einem einzelnen Faden drunter her, und überkreuzt dann 4 Querfäden.
- Es ergeben sich weniger Fadenkreuzungen als beim Leinwand- und Köpergewebe, so dass das Atlasgewebe eine sehr geringe Schiebefestigkeit aber eine sehr hohe Drapierfähigkeit aufweisen.
- Außerdem ist bei Atlasgeweben die Fadenondulation am geringsten von allen Geweben.
- Üblich sind Atlas 1/4 und Atlas 1/7 Bindungen.
- Sonderformen sind möglich.

## Gelege:

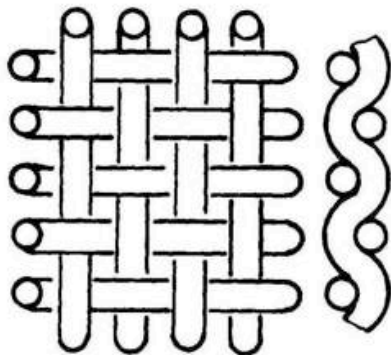
- Gelege entstehen durch Aufeinanderlegen parallel angeordneter unidirektionaler (UD) Schichten.
- Die einzelnen Schichten werden mit dünnen Haltefäden (Wirkfäden) an den Kreuzungspunkten vernäht.
- Gelege können unterschiedliche Faserorientierungen und auch mehr als zwei Richtungen in einem einzelnen Halbzeug aufweisen.
- Üblich sind bi, tri- und auch quadraxiale Gelege mit entsprechend zwei bis vier Faserorientierungen.
- Darüber hinaus können noch Wirrfaserschichten und Füllstoffschichten eingearbeitet werden, die einen sandwichähnlichen Aufbau ergeben.



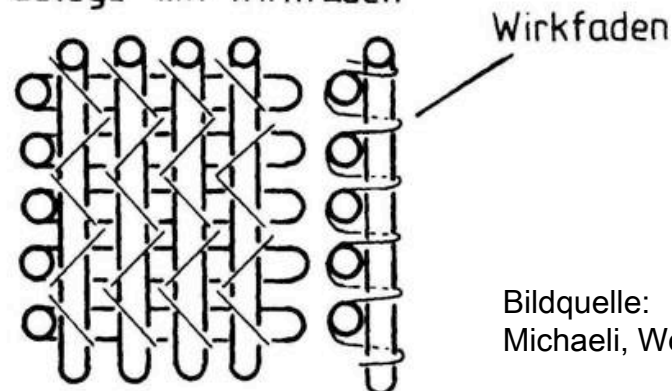
## Vergleich zwischen Gewebe und Gelege:

- Gewebe habe (je nach Webart) eine deutliche Fadenondulation.
- ⇒ Das vermindert die Steifigkeit des Laminats in Faserrichtung.
- Gewebe haben nur zwei Faserrichtungen (Kett- und Schussrichtung), die senkrecht zueinander orientiert sind.
- Bei Geweben sind die beiden Faserrichtungen ineinander verwoben, also formschlüssig miteinander verbunden.
- ⇒ Die beiden Faserrichtungen eines Gewebes können kaum untereinander delaminieren.
- Gelege haben kaum Ondulation und sind damit (theoretisch) in Laminaten in Faserrichtung steifer.
- In Gelegen lassen sich mehr Faserrichtungen in einem einzelnen Halbzeug verwirklichen.
- ⇒ Insbesondere sehr dickwandige Laminare (Schiffsrümpfe, Rotoren von Windkraftanlagen) lassen sich wirtschaftlicher mit Gelegen herstellen.

Gewebe



Gelege mit Wirkfäden



Bildquelle:  
Michaeli, Wegener 89

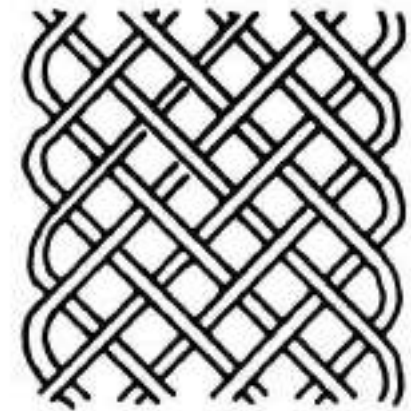
## Geflechte:

- Geflechte sind Fadensysteme, bei denen im Gegensatz zu Geweben zwei Fadenorientierungen jeweils spiegelbildlich in einem Winkel zwischen 30 bis 60 Grad zur Abzugsrichtung verlaufen.
- Man unterscheidet Rundgeflechte und Flachgeflechte.
- Geflechte kommen bevorzugt in der Sportartikelindustrie zum Einsatz. (Golfschläger, Tennisschläger, Ski)



Flexschläuche als Rundgeflecht

Bildquelle:  
R&G

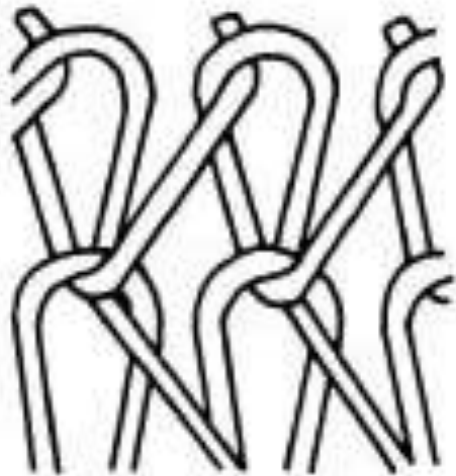


Geflecht (Litze)

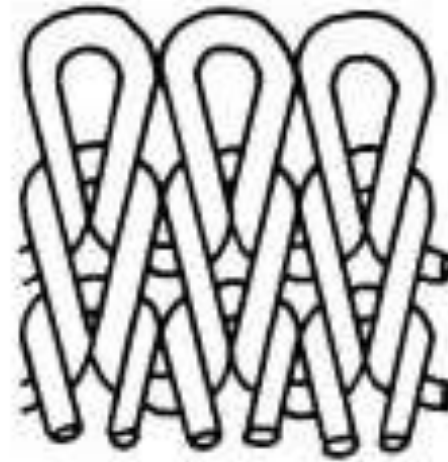
Bildquelle:  
Michaeli, Wegener 89

## Gestricke und Gewirke:

- Gestricke und Gewirke sind Sonderhalbzeuge, die bei komplexen Geometrien unterschiedlichste Faserorientierungen in einem zusammenhängenden Faserhalbzeug ermöglichen.
- Sie werden auf speziellen Strickmaschinen hergestellt.
- Aufgrund der vielen Faserumlenkungen werden mit Gewirken und Gestricken nur geringe Faservolumenanteile und geringe Steifigkeiten erzielt.



Kettengewirk

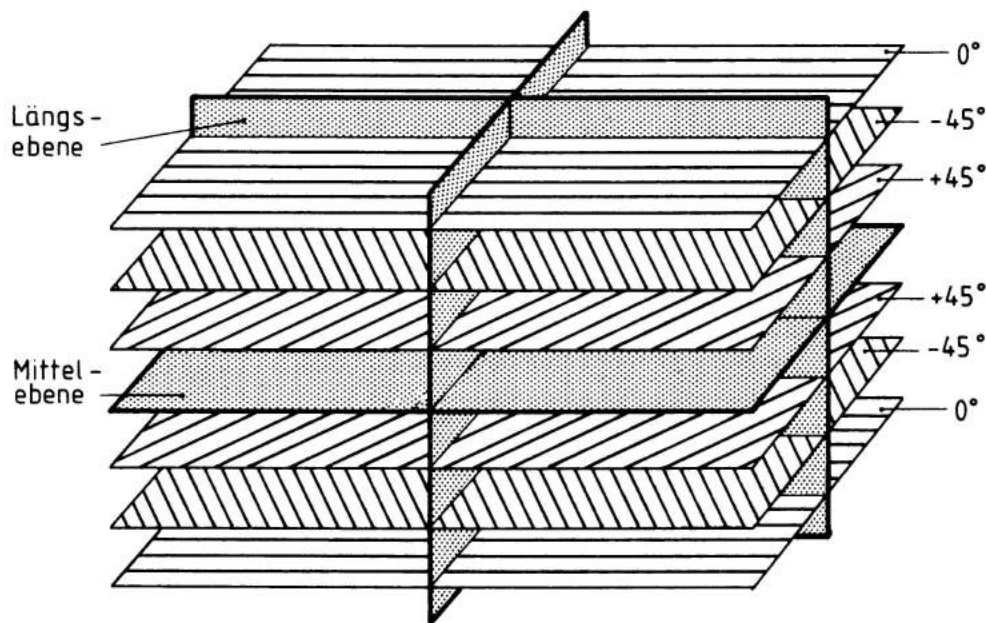


Gestrick

Bildquellen:  
Michaeli, Wegener 89



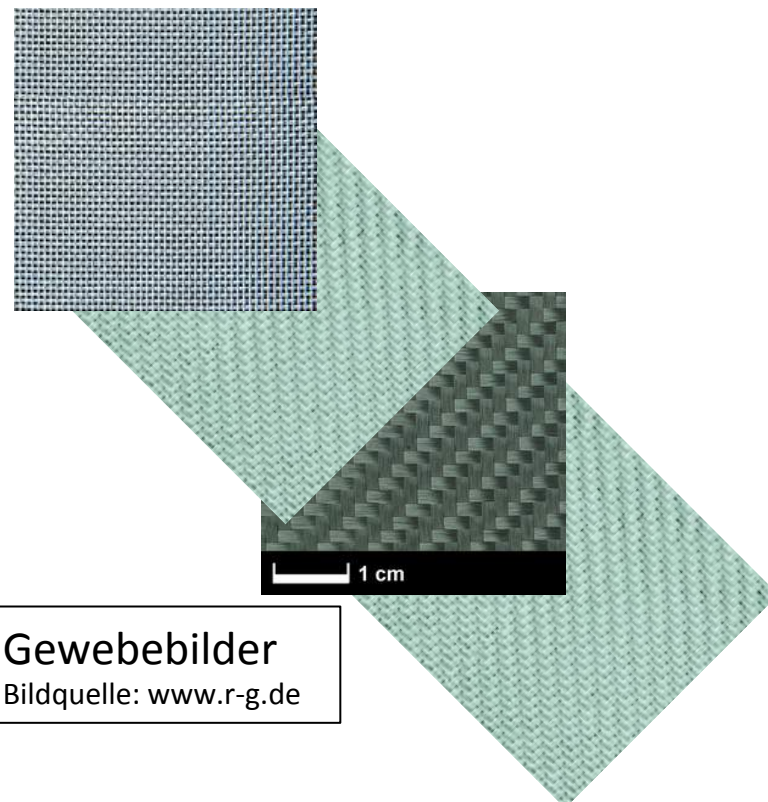
# Laminataufbau



Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

## Schichtweiser Aufbau

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

## flächiger Faserverbundstrukturen



# 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	$\varphi_{Faser}$
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:

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

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

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

# 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) <sub>Gewebe</sub>	$\varphi_{\text{Faser}}$	$s_{\text{Faser}}$	$s_{\text{Lage}}$	$s_{\text{Harz}}$	(m/A) <sub>Harz</sub>
1	Glasgewebe	80 g/m <sup>2</sup>	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) <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%				
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 Einzelfächengewichte 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

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

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

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

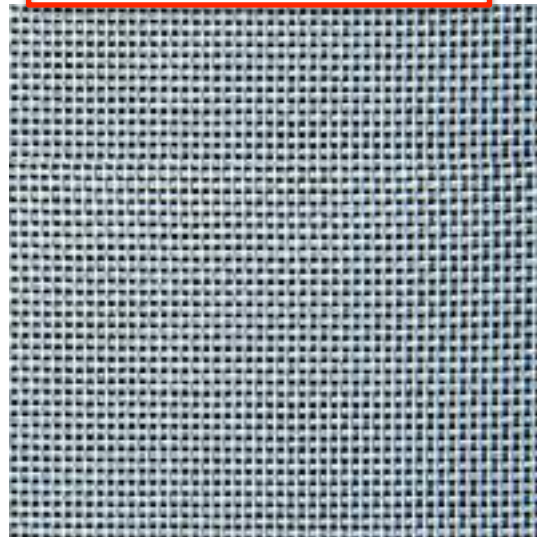
# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

Betrachten wir die bislang  
verwendeten Lagen im Einzelnen:

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		

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.

Gewebebilder

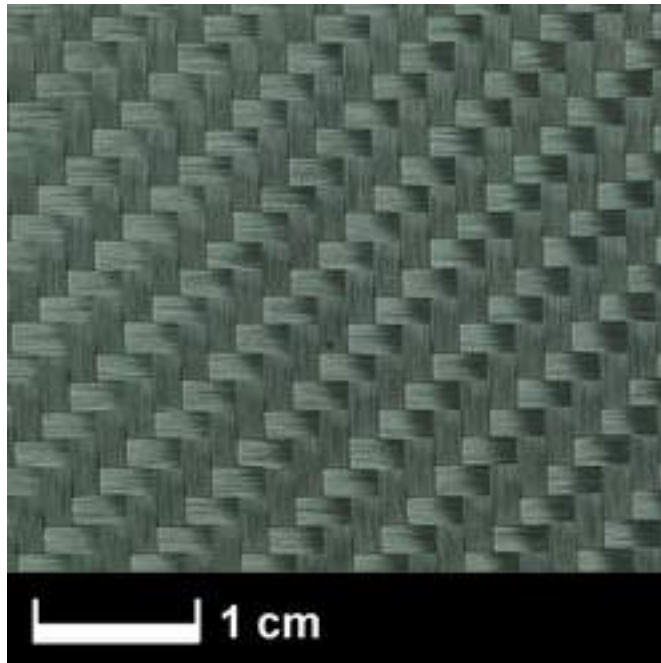
Bildquelle: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)

# Laminataufbau

mit unterschiedlichen Fasermaterialien:

Betrachten wir die bislang  
verwendeten Lagen im Einzelnen:

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



lfd. Nr.	Bezeichnung	Ablagewinkel	φ <sub>Faser</sub>
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)

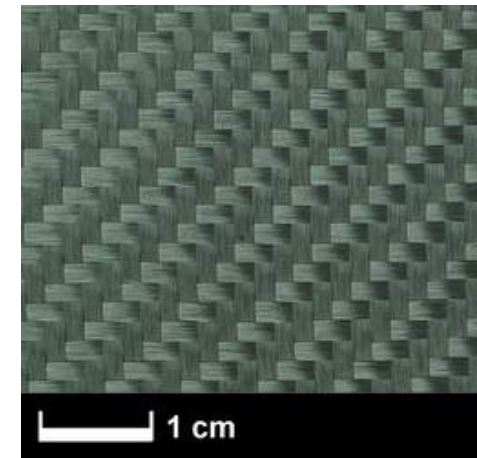
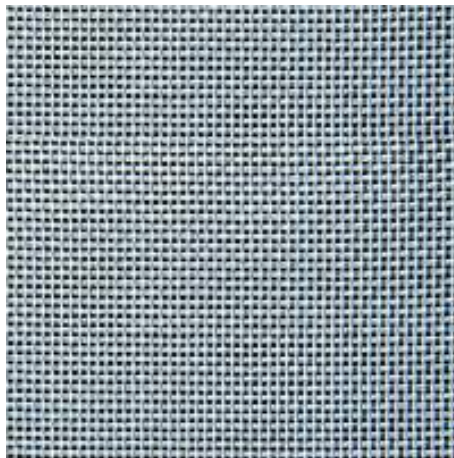
# Laminataufbau

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		



Gewebebilder  
Bildquelle: www.r-g.de





# Laminataufbau

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

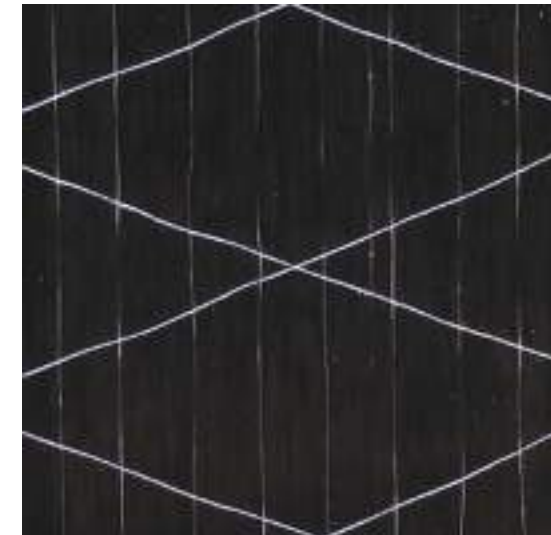
- Als **Laminatlage** wird das Faserhalbzeug bezeichnet, welches als **zusammenhängendes Faserhalbzeug** (verwobenes Gewebe oder zusammenhängendes Gelege) in einer Lage in die Form gelegt und laminiert wird.
- Jede **einzelne Faserrichtung** stellt eine **Einzelschicht** dar.
- ⇒ Eine **Lage** eines **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 Haftpapier aus PET.



UD-Kohlefasergelege

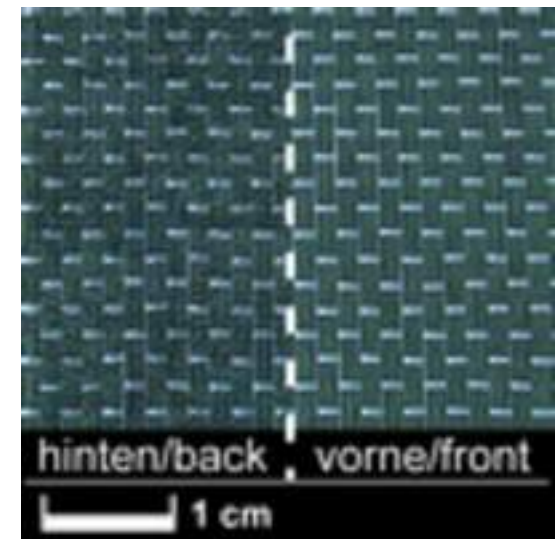
Bildquelle: [www.r-g.de](http://www.r-g.de)

# 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.



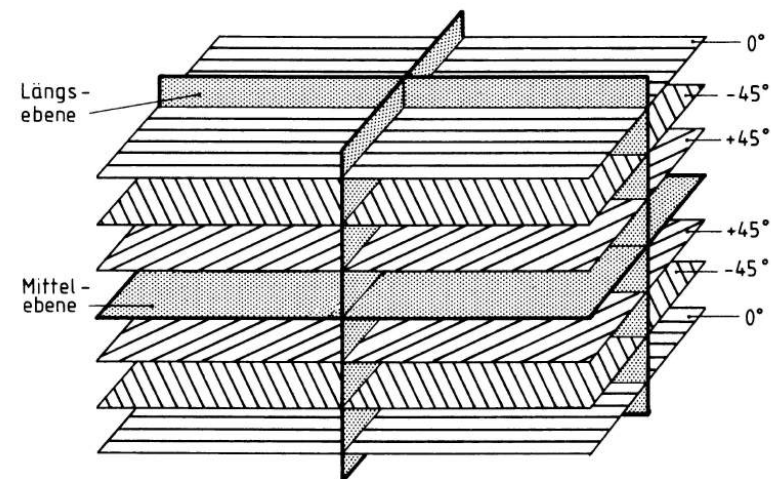
UD-Kohlefasergewebe

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.



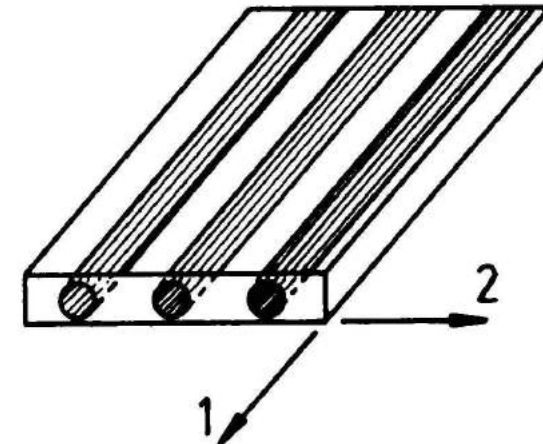
# Laminataufbau

## UniDirektionale Schichten im Laminat ⇒ 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)*



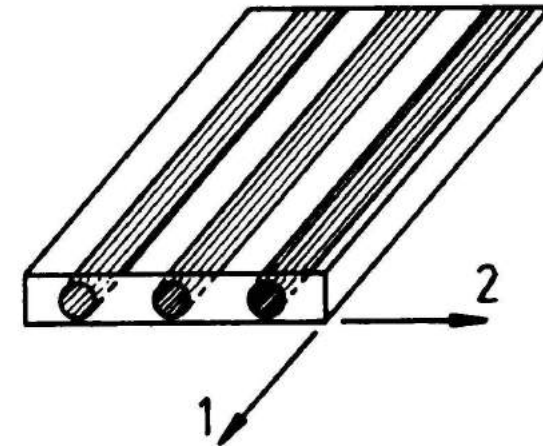
Laminat-EinzelSchicht

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

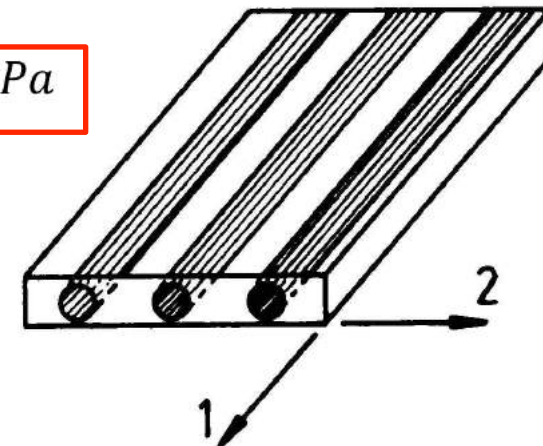
## UniDirektionale Schichten im Laminat ⇒ UD-EinzelSchicht

- 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<sub>1</sub> 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<sub>2</sub>-Modul der ES dagegen nur sehr gering (hier ca. 8 GPa).
- ⇒ Die Einzelschicht ist **in Faserrichtung** sehr **viel steifer** als **quer zur Faserrichtung**!



Laminat-EinzelSchicht

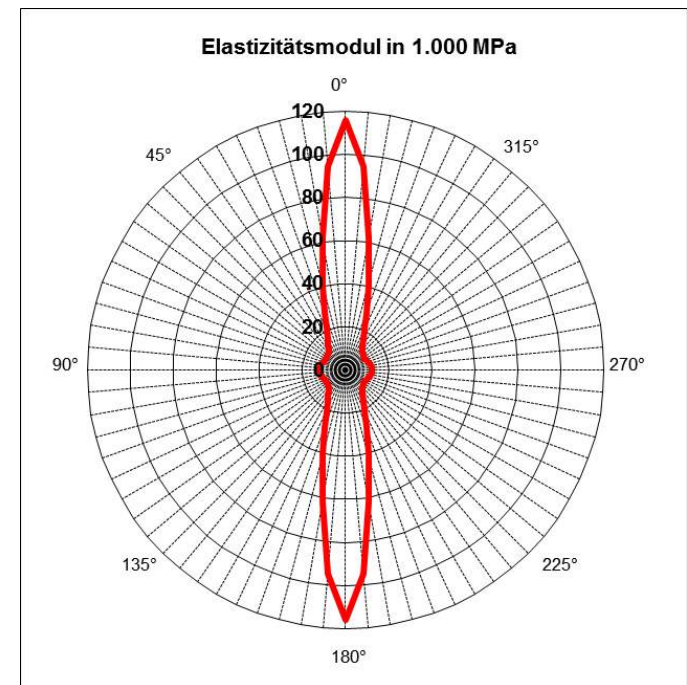
Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

## 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

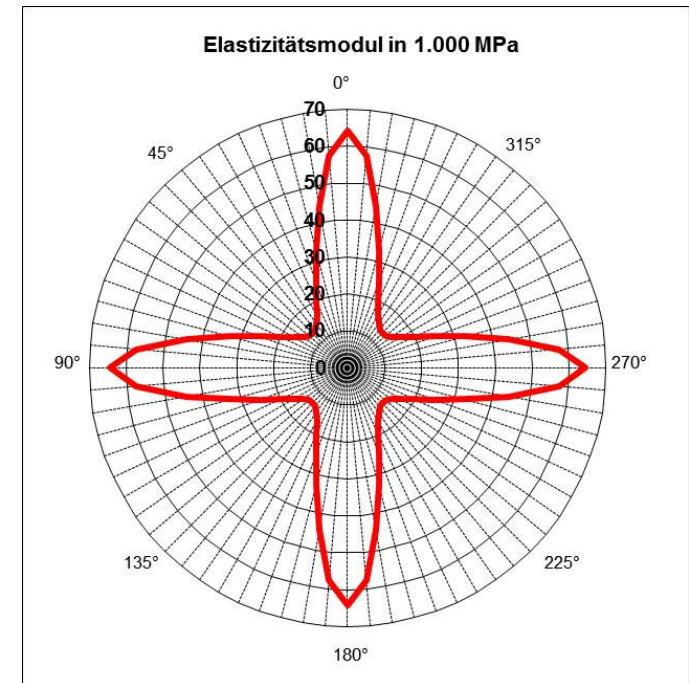


## Berücksichtigung der Faserorientierung im Laminataufbau:

### Beispiel:

#### E-Modul zweier um 90° gekreuzter CFK-UD-Einzelschichten:

- Stellt man den E-Modul zweier um 90° gekreuzten CFK-UD-Schichten in der Draufsicht richtungsabhängig dar, so werden die beiden Faserrichtungen sofort erkennbar:
  - in den Faserrichtungen (0°/90°/180°/270°) 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°/90°)

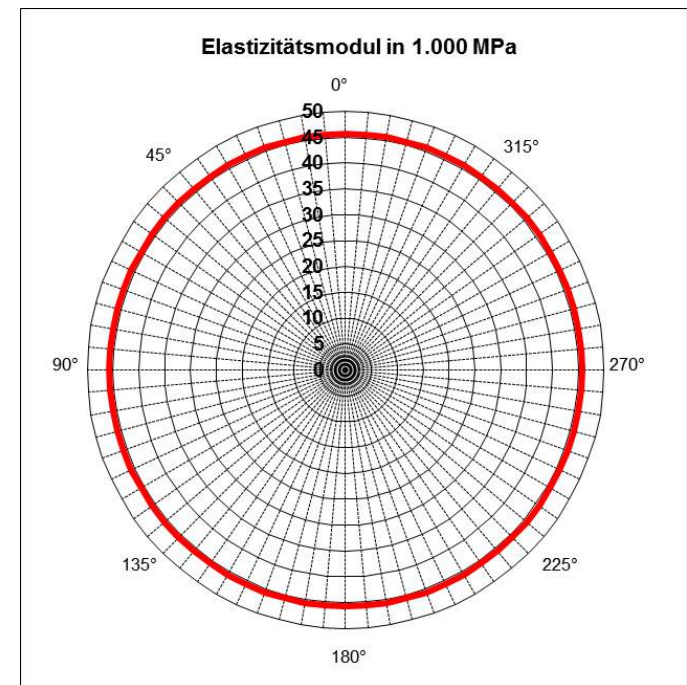
Bildquelle: LamiCens

## 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)*



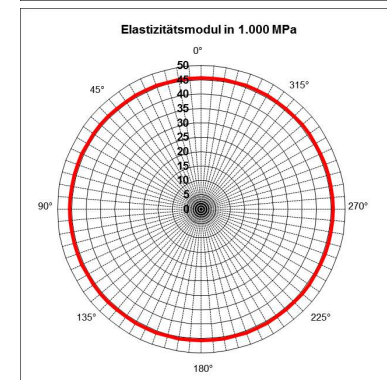
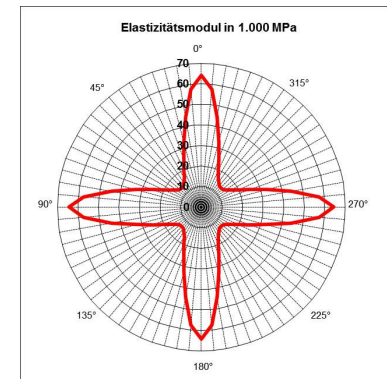
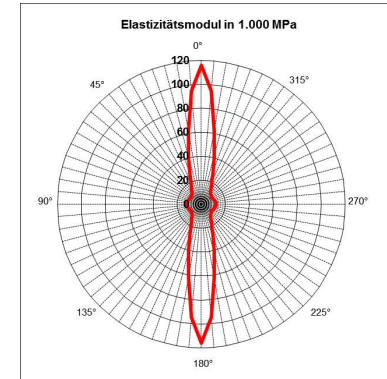
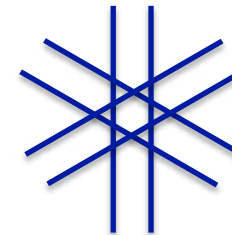
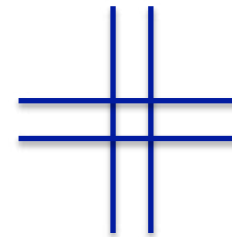
E-Modul triaxiales CFK;  $(-60^\circ/0^\circ/60^\circ)$

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:

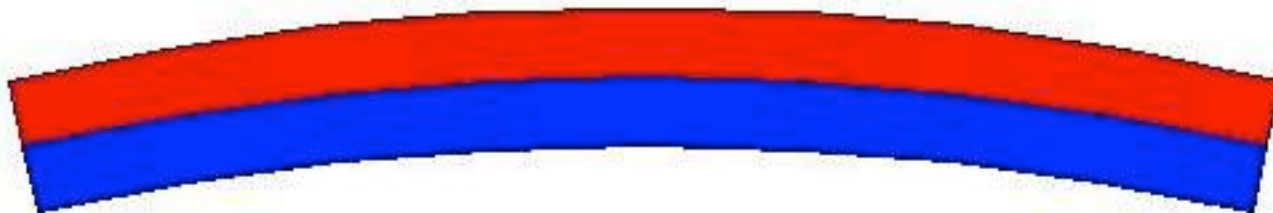
## Berücksichtigung der Stapelfolge im Laminataufbau:

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:

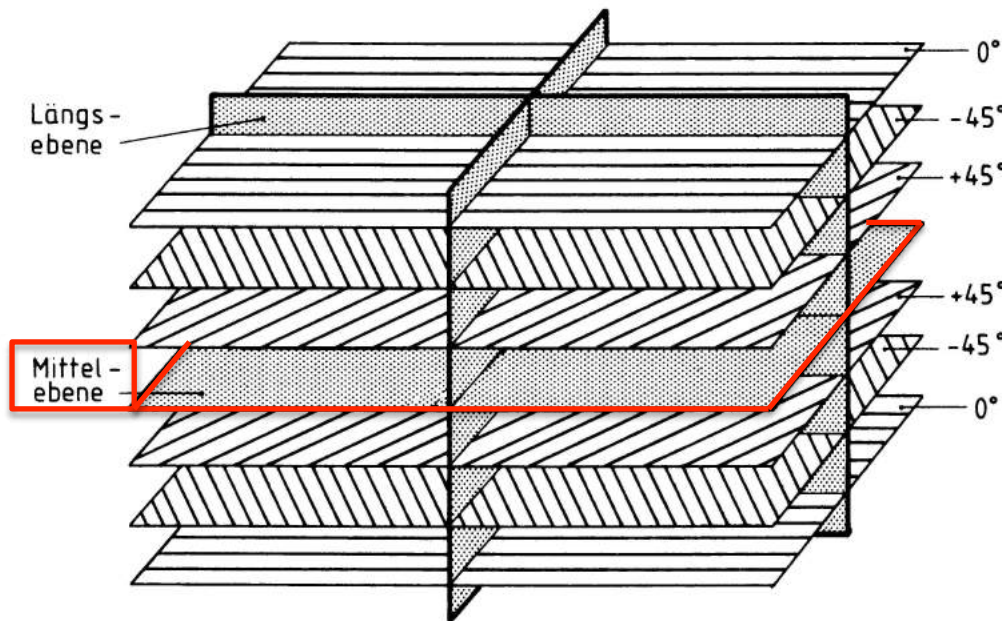


Wenn sich aufgrund unterschiedlicher Dehneigenschaften die rote Lage ausdehnt und sich die blaue Lage zusammen zieht, kann folgender Verzug beobachtet werden:



## 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**.

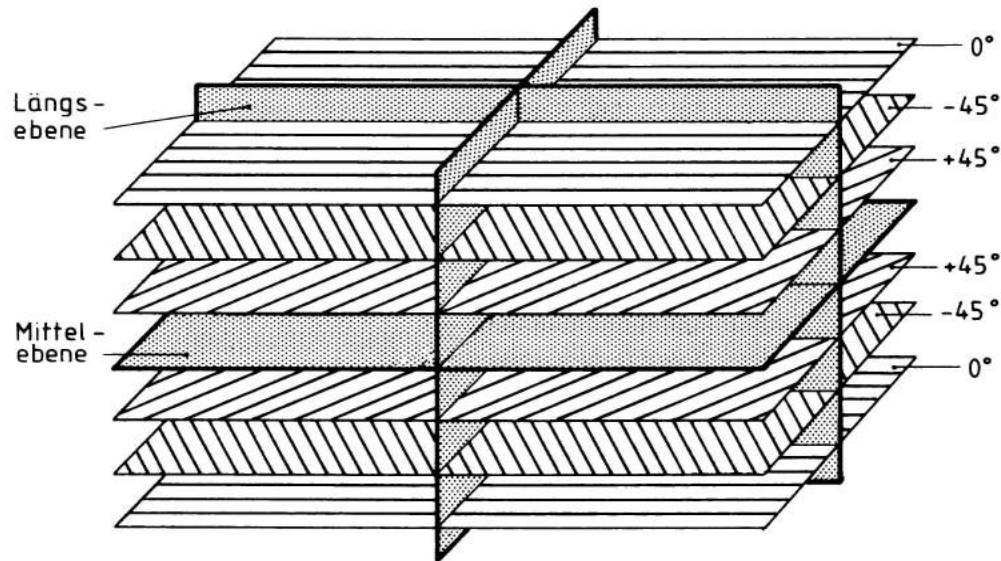
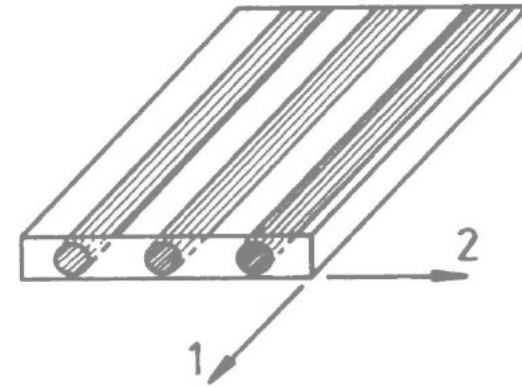


# Laminataufbau:

## 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?

# Laminatberechnungen...



Bildquelle: Michaeli, Wegener 89

Bilder: Michaeli, Wegener 89

...nach der klassischen

# Laminattheorie (CLT)



# Laminatberechnungen

## Inhalt:

- Einleitung und Problemstellung
- Laminataufbauten
  - ⇒ Eingangsgrößen
  - ⇒ fertigungsspezifische Kennwerte
- Die klassische Laminattheorie (CLT)
  - ⇒ Berechnung in 10 Schritten
- Festigkeitskriterien
- Beispiele für Laminataufbauten

# Laminatberechnungen sind für einen Festigkeitsnachweis zwingend erforderlich:

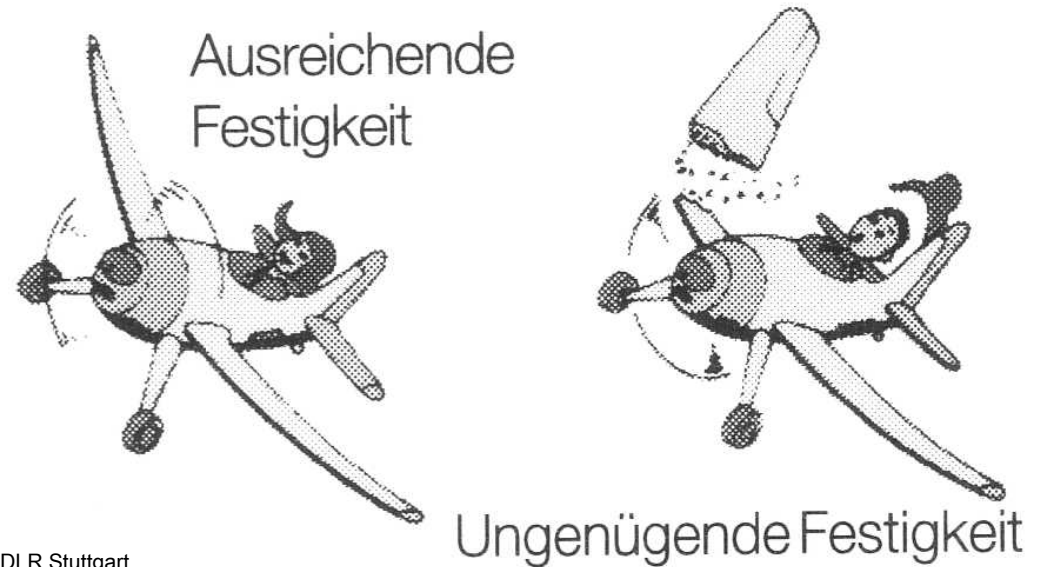


Bild: DLR Stuttgart

- Zum **Nachweis der Festigkeit** benötigt der Konstrukteur **verlässliche Werkstoffkennwerte**.

**Für viele Konstruktionswerkstoffe...**

... entnimmt man diese Kennwerte umfangreichen **Tabellensammlungen**.

# Faserverbundwerkstoffe

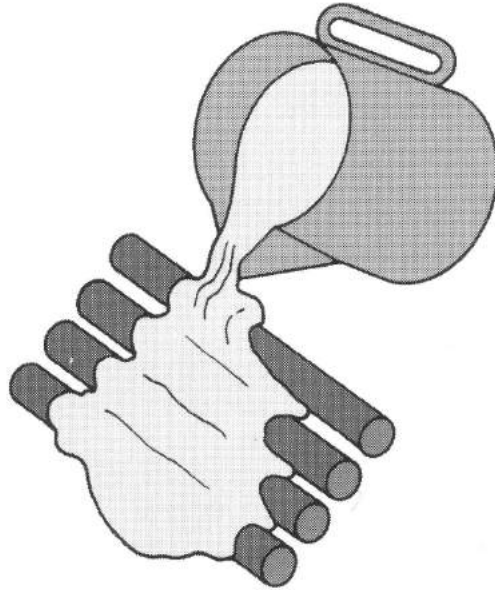


Bild: DLR Stuttgart

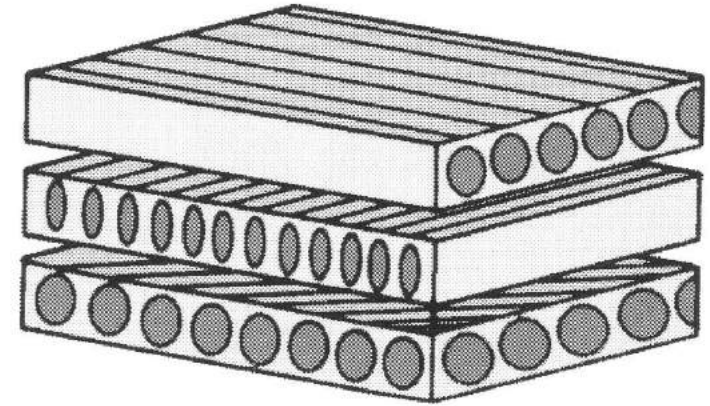


Bild: DLR Stuttgart

... entstehen erst bei der  
Bauteilherstellung

⇒ **Der Konstrukteur (und der Hersteller) sind für die  
Werkstoffkennwerte selbst verantwortlich!**

## Faser-Verbund-Lamine...

... sind schichtweise aufgebaut.

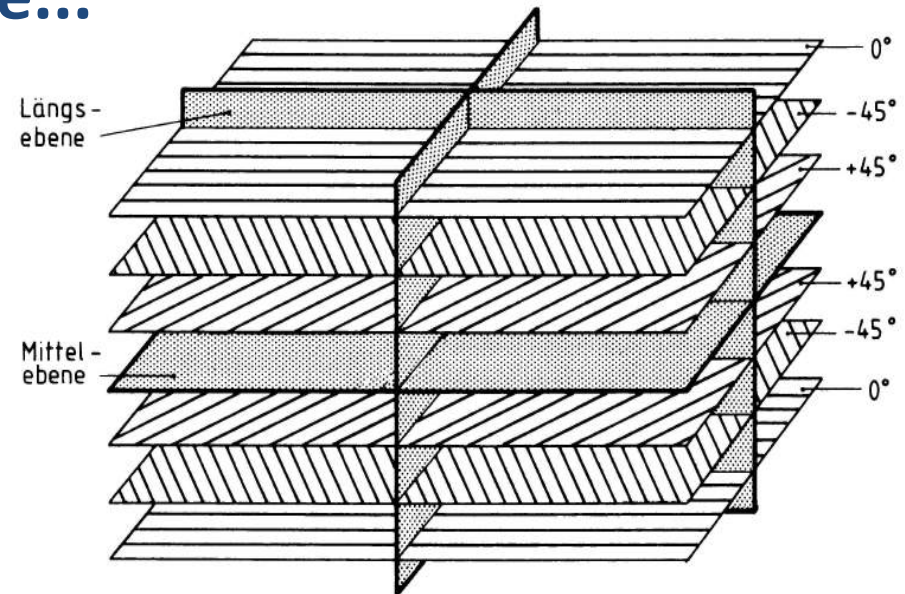


Bild: Michaeli, Wegener 89

Zu berücksichtigen sind:

- unterschiedliche Faserorientierungen
- Die Fasern sind wesentlich steifer als die Matrix.

⇒ Die Fasern bestimmen die  
mechanischen Eigenschaften des Verbundes

## Eingangsgrößen zur Berechnung der Eigenschaften einer Einzelschicht (ES)

### Steifigkeitskennwerte der Fasern:

- E-Module längs zur Faser  $E_{\text{Faser},1}$
- E-Module quer zur Faser  $E_{\text{Faser},2}$
- Schubmodul der Faser  $G_{\text{Faser}}$
- Querdehnung der Faser  $\nu_{\text{Faser}}$

### Steifigkeitskennwerte der Matrix:

- E-Modul  $E_{\text{Harz}}$
- Schubmodul  $G_{\text{Harz}}$
- Querdehnung  $\nu_{\text{Harz}}$

### Laminatkennwert

- Faservolumenanteil  $\phi_{\text{Faser}}$

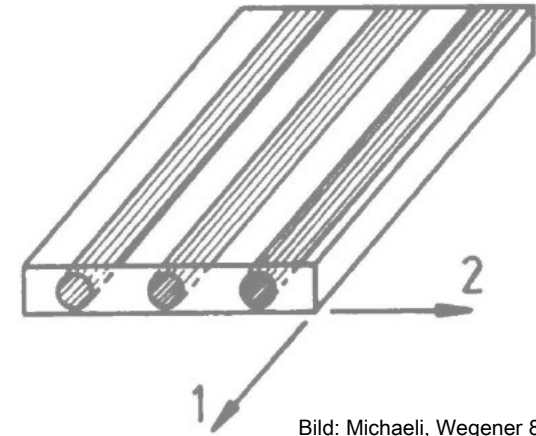


Bild: Michaeli, Wegener 89

- Für jedes im Laminat verwendete Material müssen diese entsprechenden Kennwerte zur Laminatberechnung berücksichtigt werden.



# Laminatkennwerte...

... müssen für jeden Laminataufbau  
individuell bestimmt werden:

## Fertigungsspezifische Laminatkennwerte:

- Laminatstärke..... [mm]
- Laminatgewicht..... [g/m<sup>2</sup>]
- Faservolumenanteil..... [%]

## Steifigkeitskennwerte des Verbundes:

- E-Modul.....  $E(\alpha)$
- Schubmodul.....  $G(\alpha)$
- Querdehnung.....  $\nu(\alpha)$

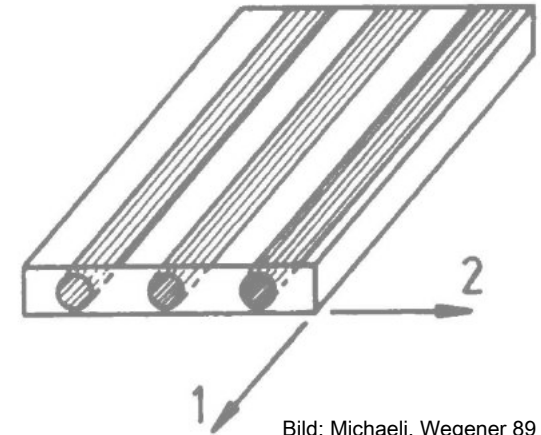


Bild: Michaeli, Wegener 89

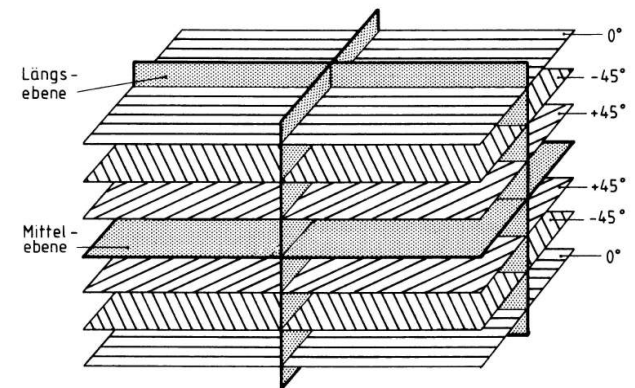
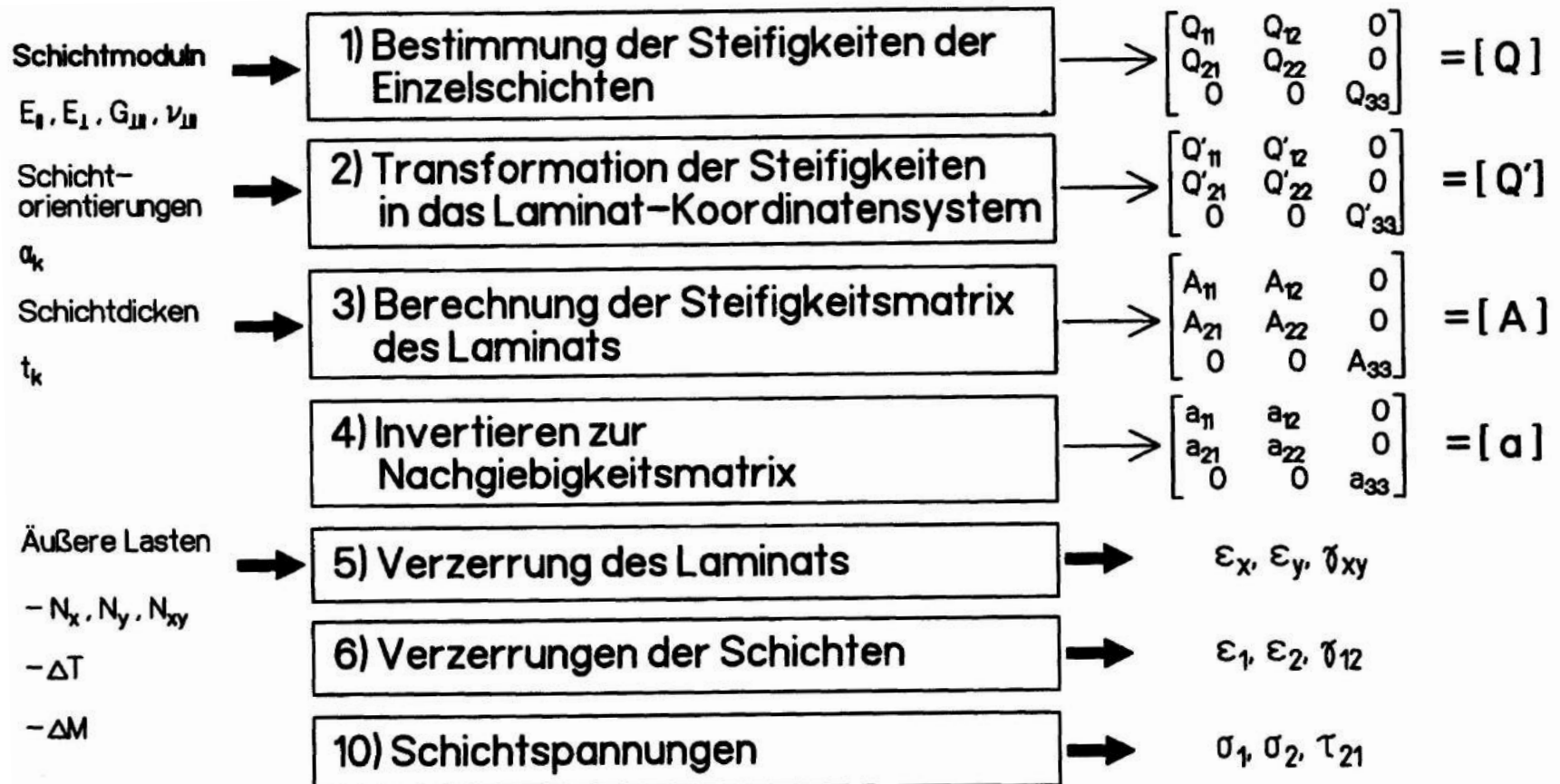


Bild: Michaeli, Wegener 89

# Die klassische Laminattheorie (CLT)

## Ermittlung der mechanischen Laminatkenngößen:



# Vorbereitungen:

Ermittlung der Steifigkeitskennwerte  
für jede Einzelschicht (ES) k:

$$E_1 = \phi \cdot E_F + (1 - \phi) \cdot E_H$$

$$E_2 = \frac{E_H \cdot E_{F2}}{\phi \cdot E_H + (1 - \phi) \cdot E_{F2}}$$

$$G_{12} = \frac{G_F \cdot G_H}{\phi \cdot G_H + (1 - \phi) \cdot G_F}$$

$$\nu_{12} = \phi \cdot \nu_F + (1 - \phi) \cdot \nu_H$$

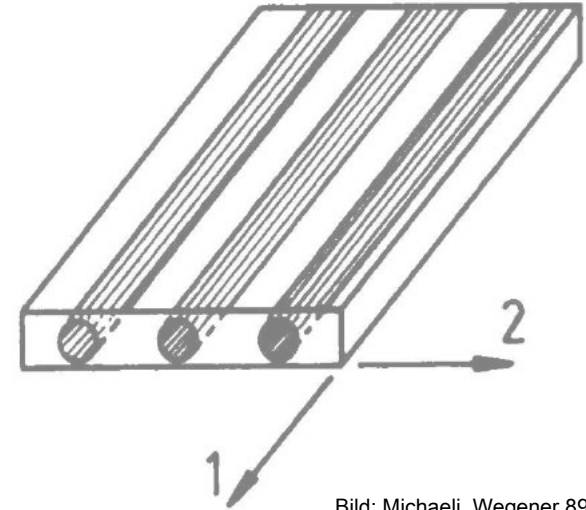


Bild: Michaeli, Wegener 89

- Nebenstehende Formeln ergeben sich nach der Mischungsregel für die Berechnung der Steifigkeitskennwerte in den Hauptachsen.
- Während die **Steifigkeit in Faserrichtung ( $E_1$ )** und die **Querdehnzahl ( $\nu_{12}$ )** gut mit experimentellen Messungen übereinstimmen, müssen die Steifigkeit quer zur Faserrichtung ( **$E_2$** ) und der Schubmodul ( **$G_{12}$** ) anhand empirischer Modelle modifiziert werden.

## Modifizierte Steifigkeitskennwerte der Einzelschicht nach Puck:

- Alfred Puck hat anhand zahlreicher Experimente an Faser Kunststofflaminaten herausgefunden, dass sich diese insbesondere bei Beanspruchung quer zur Faser deutlich steifer verhalten, als anhand der Mischungsregel berechnet.
- Die Ursache liegt im komplexen mechanischen Verhalten und der Kombination zweier deutlich unterschiedlich steifer Materialkomponenten.



- Bei Beanspruchung quer zur Faser möchte sich das Harz mehr dehnen als die deutlich steifere Faser. Dieses führt zur **Dehnungsüberhöhung** der Faser.
- Die Überlagerung mit **Querdehnungen** führt dann zu komplexen Verformungs- und Spannungszuständen, die mit der Mischungsregel alleine nicht hinreichend beschrieben werden können.

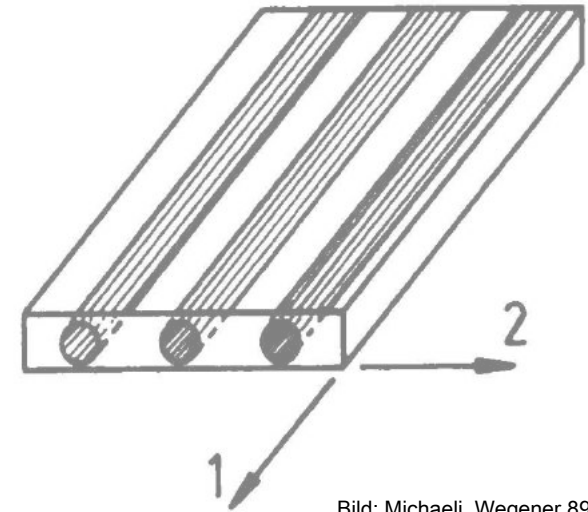


Bild: Michaeli, Wegener 89

## Modifizierte Steifigkeitskennwerte der Einzelschicht nach Puck:

- Zunächst führte Puck den **modifizierten Harzmodul  $E_H^*$**  ein, der die Querdehnung mit berücksichtigt.

Es gilt:

$$E_H^* = \frac{E_H}{(1 - \nu_H^2)}$$

- Der E-Modul der Einzelschicht quer zur Faserrichtung lässt sich dann anhand der modifizierten Regel nach Puck gemäß folgenden Zusammenhangs beschreiben:

$$E_2 = \frac{E_H^* \cdot (1 + 0,85\varphi^2)}{\varphi \cdot E_H^* / E_F + (1 - \varphi)^{1,25}}$$

- Für den Schubmodul gilt folgende modifizierte Regel nach Puck:

$$G_{12} = \frac{G_H \cdot (1 + 0,6\varphi^{0,5})}{\varphi \cdot G_H / G_F + (1 - \varphi)^{1,25}}$$

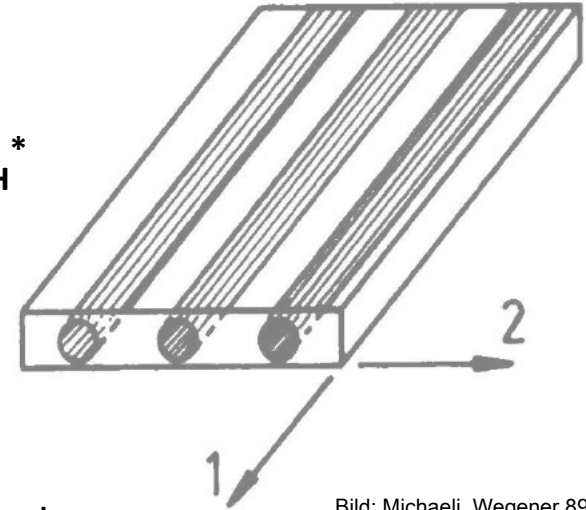


Bild: Michaeli, Wegener 89

# Schritt 1:

## Bestimmung der **ES-Steifigkeiten**:

$$[Q]_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}_k$$

- Die Einzelschicht-Steifigkeiten werden in Matrizen-Schreibweise dargestellt.
- So wird eine 2-dimensionale Beanspruchung abgebildet.

⇒ **Anmerkung:** Für  $E_2$  und  $G_{12}$  werden die **modifizierten Regeln nach Puck** angewendet.

## Schritt 2:

### Transformation der ES-Steifigkeiten

- Beim Laminieren werden die einzelnen Schichten (im Gewebe mit einer Lage zu je 2 Schichten gruppiert) aufeinandergelegt, also sozusagen „addiert“.
- Bevor die Steifigkeiten der einzelnen Lagen addiert werden, ist zu berücksichtigen, dass ihre Faserorientierung unterschiedlich ist.
- Diese „Drehung“ erfolgt mathematisch durch eine

#### **Koordinatentransformation:**

#### **Drehung** der Steifigkeitskennwerte:

- vom lokalen EinzelSchicht-KoordinatenSystem (**ESKS**)



- in das globale **Laminat-KoordinatenSystem (LamKS)**

## Schritt 2:

### Transformation der ES-Stifigkeiten

- Für jede Einzelschicht (**ES**) gilt das lokale ES-Koordinatensystem, das mit der Richtung  $1_{ES}$  in Faserrichtung und mit der Richtung  $2_{ES}$  quer zur Faserrichtung ausgerichtet ist.
- Für die Gesamtbetrachtung des Laminates ist aber ein einheitliches, gemeinsames Koordinatensystem erforderlich.
- Mit der Koordinatentransformation wird für jede Einzelschicht das gemeinsame Laminatkoordinatensystem zum Bezug.

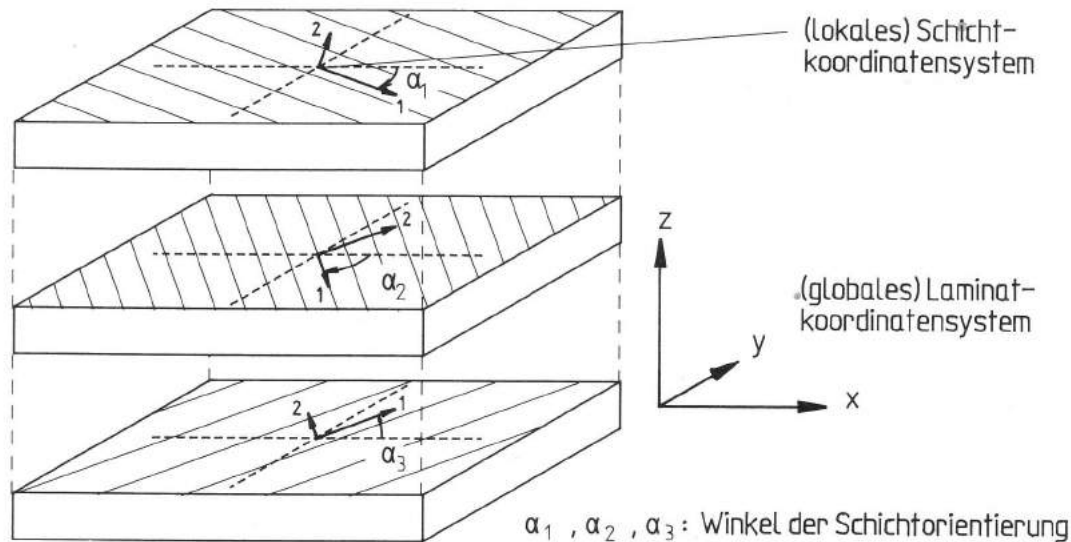


Bild: Michaeli, Wegener 89



## Schritt 2:

### Transformation der ES-Steifigkeiten

- Bei der Transformation wird die Verdrehung jeder Einzelschicht zum Gesamtkoordinatensystem (*LamKS*) berücksichtigt.
- Für alle trigonometrischen Funktionen innerhalb der Matrix gilt als Argument der **Verdrehwinkel  $\alpha$** , der angibt, um welchen Winkel die Faserrichtung der Einzelschicht zum Gesamtsystem verdreht ist.

$$[Q]_{LamKS,k} = [T_\sigma]_k \cdot [Q]_{ESKS,k} \cdot [T_\sigma]_k^T$$

mit:

$$[T_\sigma]_k = \begin{bmatrix} \cos^2 & \sin^2 & 2 \sin \cos \\ \sin^2 & \cos^2 & -2 \sin \cos \\ -\sin \cos & \sin \cos & \cos^2 - \sin^2 \end{bmatrix}$$

Diese Berechnung muss für jede Einzelschicht durchgeführt werden.

## Schritt 3:

Berechnung der **Laminat-Steifigkeits-Matrix [A]**:

$$[A] = \sum_k \frac{t_k}{t_{Lam}} \cdot [Q]_{LamKS,k}$$

- Die **Laminatsteifigkeitsmatrix [A]** wird berechnet indem die **gedrehten Matrizen** der Einzelschichten (*Schicht 1 bis k*) **aufsummiert** werden.
- Dabei werden die **Werte der Einzelschichten** mit ihrem **Schichtdickenanteil** an der Gesamtdicke des Laminats **gewichtet**.

## Schritt 4:

Invertierung der **Laminatsteifigkeitsmatrix [A]**

zur **Laminat-Nachgiebigkeits-Matrix [a]**:

$$[a] = [A]^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

Die „**Ingenieurkonstanten**“ des Laminats können aus einzelnen Elementen der Laminatsteifigkeitsmatrix berechnet werden:

$$E_{x,Lam} = \frac{1}{a_{11}}$$

$$E_{y,Lam} = \frac{1}{a_{22}}$$

$$G_{xy,Lam} = \frac{1}{a_{33}}$$

$$\nu_{xy,Lam} = \frac{a_{21}}{a_{11}}$$

$$\nu_{yx,Lam} = \frac{a_{12}}{a_{22}}$$



## Schritte 5-6: Berechnung der Laminatverzerrungen

- Da die einzelnen Schichten eines Laminates fest miteinander verbunden sind, verzerren sie sich auch in alle Richtungen gleich.
- Die Gesamtverzerrung des Laminates und die Verzerrung jeder Einzelschicht sind folglich identisch.
- Die Laminatverzerrung als Ganzes kann folgende Ursachen haben:

### Verzerrungen aufgrund von:

- **Mechanischer Beanspruchung**                      äußere Lasten (Kräfte)
- **Wärmedehnung**                                      Temperaturänderung
- **Quellung**    Feuchtigkeitsaufnahme

## Schritte 7-10: Berechnung der Laminatverzerrungen

### Zuordnung der Verzerrungen aufgrund:

- Mechanischer Beanspruchung
- Wärmedehnung
- Quellung

zu den Einzelschichten



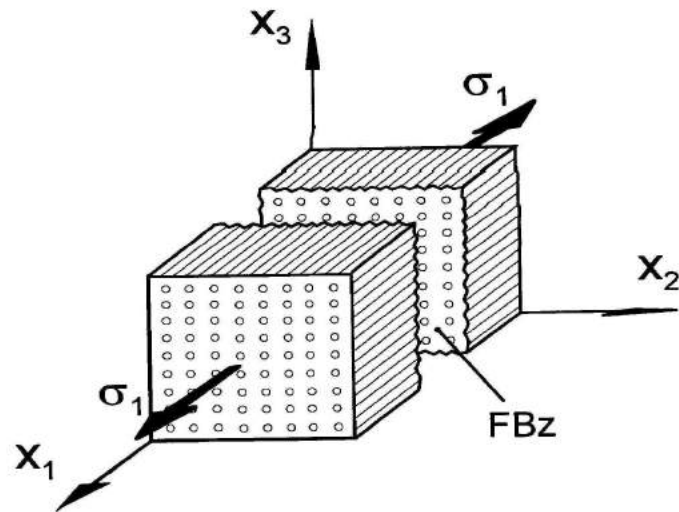
Anschließend erfolgt die **Rücktransformation** der spannungswirksamen Verzerrungen **in** das **Koordinatensystem (KS) der Einzelschicht.**

*Beachte:*

- *Die Gesamtverzerrung ist in allen Schichten gleich!*
- *Unterschiedlich ist von Schicht zu Schicht aber der jeweilige Anteil der verschiedenen Ursachen!*

# Festigkeitsanalyse von FVK-Laminaten: Anwendung spezieller Bruchkriterien:

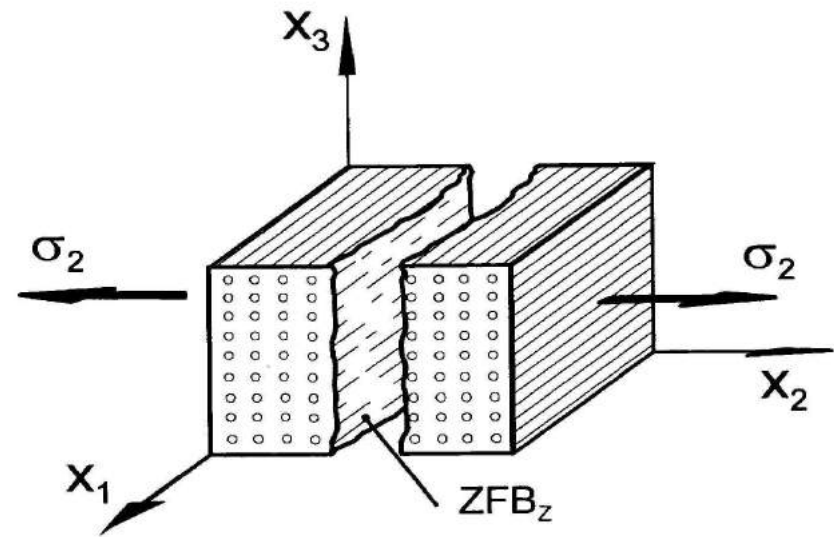
Faserbruch:



$$\sigma_1 > 0$$

Bilder: Michaeli, Wegener 94

Zwischenfaserbruch:



## Die CLT in der Zusammenfassung:

- Die kleinste Berechnungseinheit in der CLT ist die Einzelschicht.
- Für jede Einzelschicht werden Steifigkeitsparameter ermittelt.
- Die Ermittlung der Laminatkennwerte erfolgt schrittweise.
- Dieses erfolgt in Form von Matrizenoperationen.

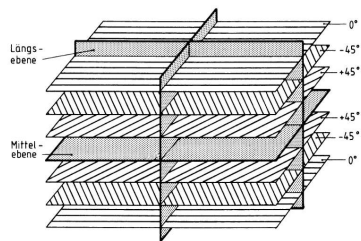


Bild: Michaeli,  
Wegener 89

**Fleißarbeit!**



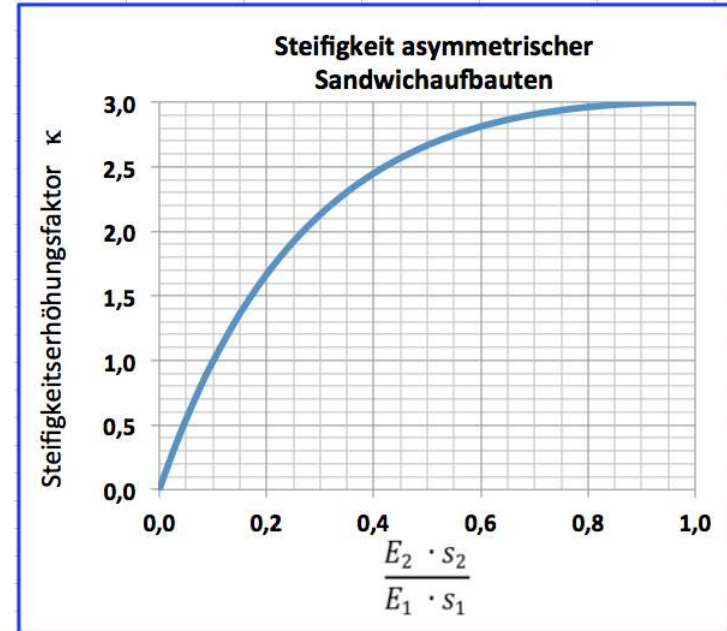
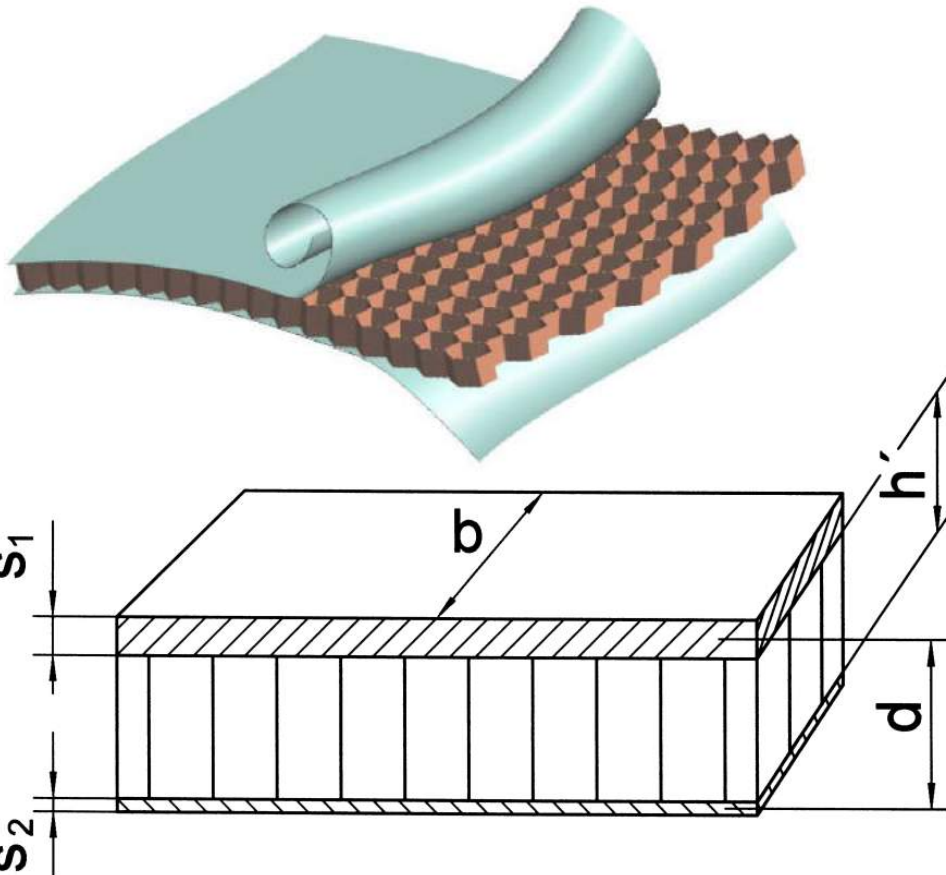
$$[Q]_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}^2 \cdot \frac{E_2}{E_1}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}_k$$

$$[Q]_{LamKS,k} = [T_\sigma]_k \cdot [Q]_{ESKS,k} \cdot [T_\sigma]_k^T$$

$$[T_\sigma]_k = \begin{bmatrix} \cos^2 & \sin^2 & 2 \sin \cos \\ \sin^2 & \cos^2 & -2 \sin \cos \\ -\sin \cos & \sin \cos & \cos^2 - \sin^2 \end{bmatrix}$$

# Sandwichbauweise

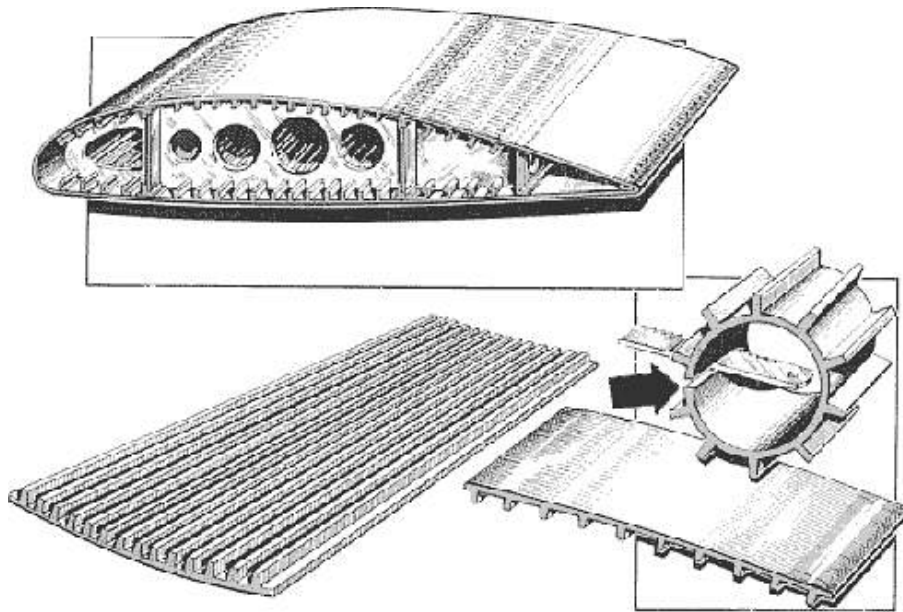
## Berechnung und Auslegung von Sandwichstrukturen



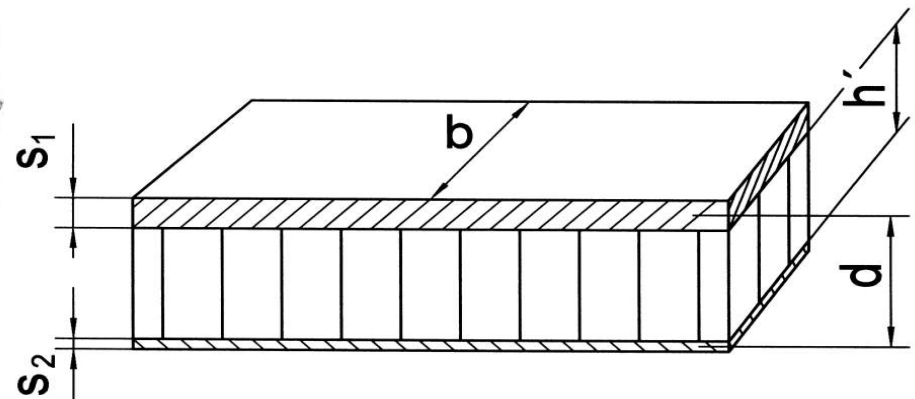
$$\kappa = 3 \cdot \frac{4 \cdot \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1}}{\left(1 + \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1}\right)^2}$$



# Struktureller Leichtbau



- Allgemeine Regeln
- Leichtbauweisen
- Sandwichbauweise



## Begriff **Struktur** im Leichtbau

- Die Struktur im Leichtbau ist das **mechanische Bindeglied** zwischen den **Wirkstellen** der Konstruktion.

### **Bsp.: Pkw-Karosserie:**

Beispiele für **Wirkstellen** der Konstruktion (hier: Karosserie):

- Aufnahme der Fahrwerksanbindungspunkte
- Aufnahmepunkte der Antriebsaggregate
- Aufnahmepunkte der Insassenlasten (Sitzanbindungspunkte, Gurtanbindungspunkte, ...)
- ...viele weitere Wirkstellen, Anbindungspunkte lassen sich benennen
- Hauptaufgabe der (Leichtbau-) struktur ist es, diese Wirkstellen miteinander zu verbinden.
- Darüber hinaus übernimmt die Karosseriestruktur des Fahrzeuges auch noch Verkleidungsfunktion. Die von außen sichtbare Struktur ist Teil der tragenden Struktur, die die mechanische Lasten aufnimmt.

# Allgemeine Regeln zur Gestaltung von Leichtbaustrukturen

## In der Hauptsache gilt:

- Der Konstrukteur einer Leichtbaukonstruktion muss die mechanischen Zusammenhänge der jeweiligen Konstruktionsaufgabe präzise analysieren.
- Der Kraftfluss durch das Bauteil (Kraftübertragung zwischen verschiedenen Wirkstellen der Konstruktion) muss auf optimalem Wege geführt werden, so dass möglichst wenig Strukturwerkstoff benötigt wird.
- Allgemeine Regeln und Beispiele können hierbei Hilfestellung leisten.
- Sie können aber nicht das mechanische Grundverständnis ersetzen, welches ein Konstrukteur von Leichtbaukonstruktionen zwingend benötigt.

## Allgemeine Regeln zur Gestaltung von Leichtbaustrukturen

- Hohe Strukturlasten sollten auf kürzestem, möglichst geradlinigem Wege zwischen den Wirkstellen übertragen werden. (Kräfte nicht „spazieren führen“.)
- Kraftübertragung sollte möglichst eindeutig erfolgen. (unnötige statische Überbestimmtheiten vermeiden).
- Unnötige Biege- und Torsionsmomente sind zu vermeiden.  
*Bsp.: Einseitige Hinterradschwinge beim Zweirad*

⇒ **Besser: Symmetrisch** konstruieren.





Unter einer **Leichtbauweise** versteht man eine **prinzipielle**, unter **verschiedenen Bedingungen** **anwendbare Bauweise**, die geeignet ist Strukturmasse einzusparen.

- Nicht immer sind die genannten Bauweisen klar abzugrenzen.
- Oft ergeben sich gute Leichtbaukonstruktionen erst durch die Kombination mehrerer Bauweisen miteinander.
- Der Konstrukteur sollte die Bauweisen kennen.
- Die Schwierigkeit liegt in der Anwendung auf neue, unbekannte Konstruktionsaufgaben.



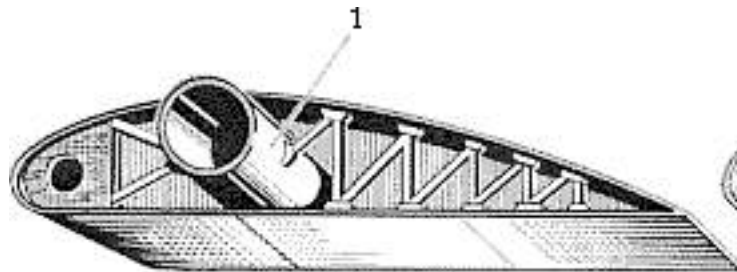
- **Prinzipiell unterscheidet man:**
- **Differenzialbauweise**
  - Klassische Bauweise aus vielen Einzelteilen, wobei zumeist jedem Einzelteil klare Funktionen zugeordnet werden
  - Klare Baugruppenstruktur, aber viel Montageaufwand, oft schwer
- **Integralbauweise**
  - Reduzierung der Einzelteile, viele Funktionen in einem Bauteil integriert
  - Geringer Montageaufwand, ggf. schwierige Reparatur, Wartung
- **Integrierende Bauweise**
  - „Kompromiss“ zwischen Differenzial- und Integralbauweise
  - Differenzierung, um Teiletausch /Reparatur zu ermöglichen bei möglicher Integration mehrerer Funktionen in einzelnen Baugruppenbauteilen
- **Verbundbauweise**
  - Kombination unterschiedlicher Werkstoffe in einem Bauteil
  - Meistens auch gleichzeitig Integral- oder Integrierende Bauweise  
Bsp.: Fahrzeugstoßstange



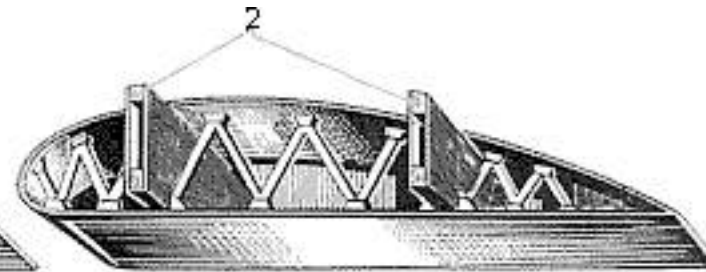
- **Spezielle Leichtbauweisen:**
- **Stabwerksbauweise**
  - „klassische“ Leichtbauweise
  - Feingliedrige räumliche Struktur aus Zug- und Druckstäben  
keine Biegung in den Stäben!
  - Jeder einzelne Stab kann (theoretisch) optimal dimensioniert werden
  - Wenn erforderlich, kann eine sehr leichte Verkleidung z.B. durch Bespannung erfolgen
- **Fachwerkbauweise**
  - Fachwerksstruktur aus Balken und Stäben für die tragende Struktur
  - Deckbleche als (nichttragende) Verkleidung
- **Vollwand und Schalensysteme**
  - Die Verkleidung (Deckbleche) nimmt die wesentlichen Belastungen tangential zur Oberfläche auf
  - Oft ist eine zusätzliche Beulversteifung durch Stringer, Spanten etc. erforderlich

## Beispiele:

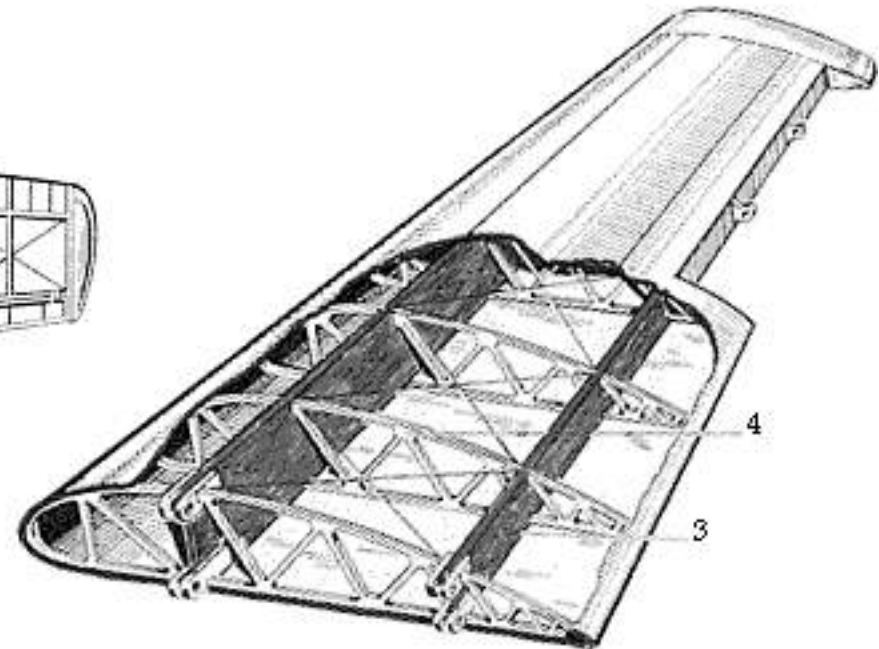
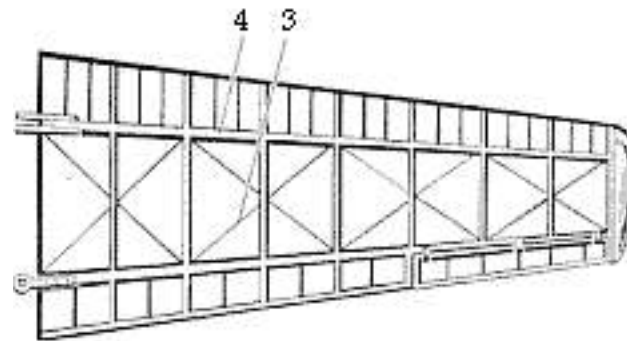
- Fachwerkbauweise im Flugzeugbau



Einholm Bauweise



Zweiholm Bauweise



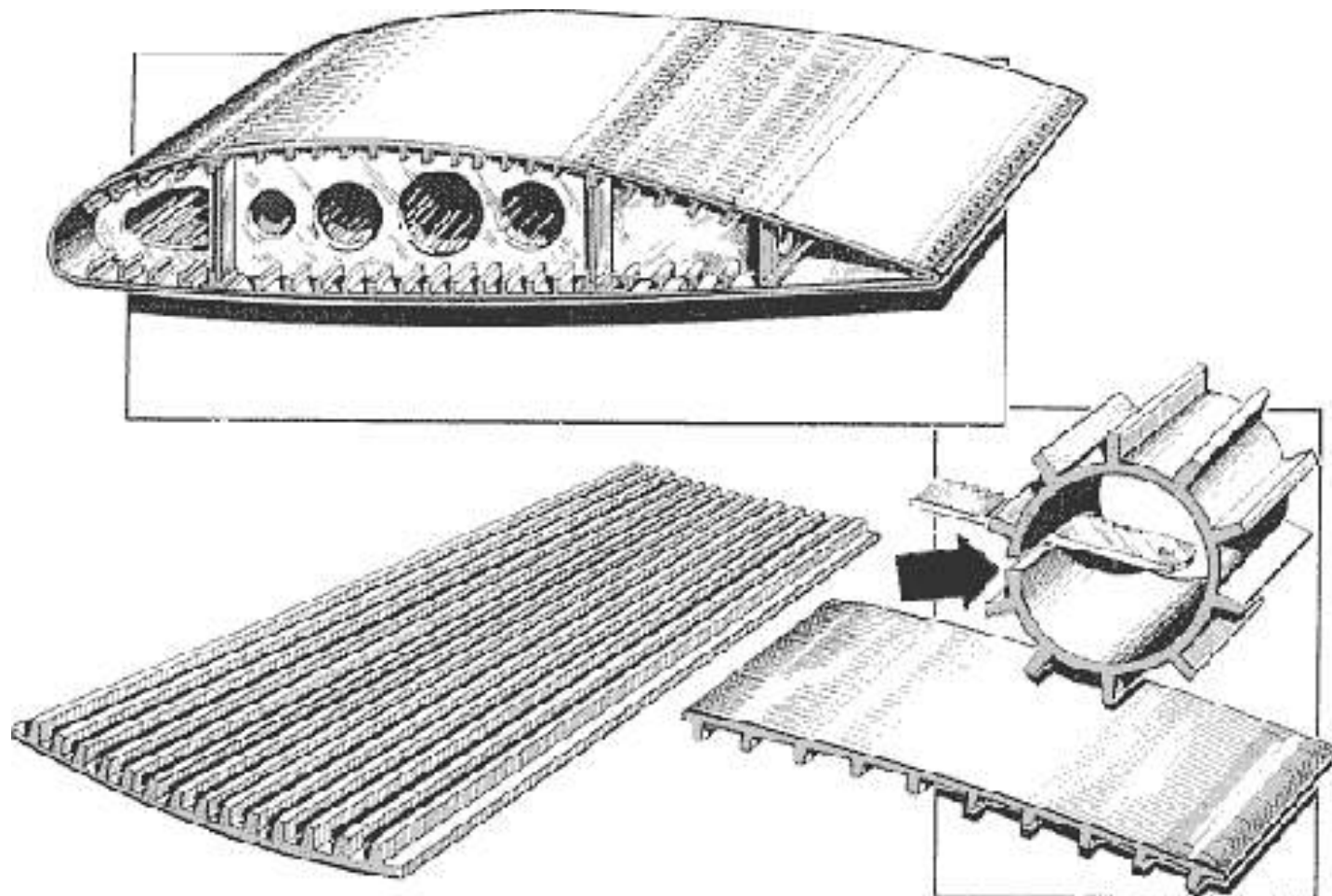
Quelle:

<http://www.aviation4u.de/school/bau-tragwerk.htm>



## Beispiele:

- Schalenbauweise im Flugzeugbau

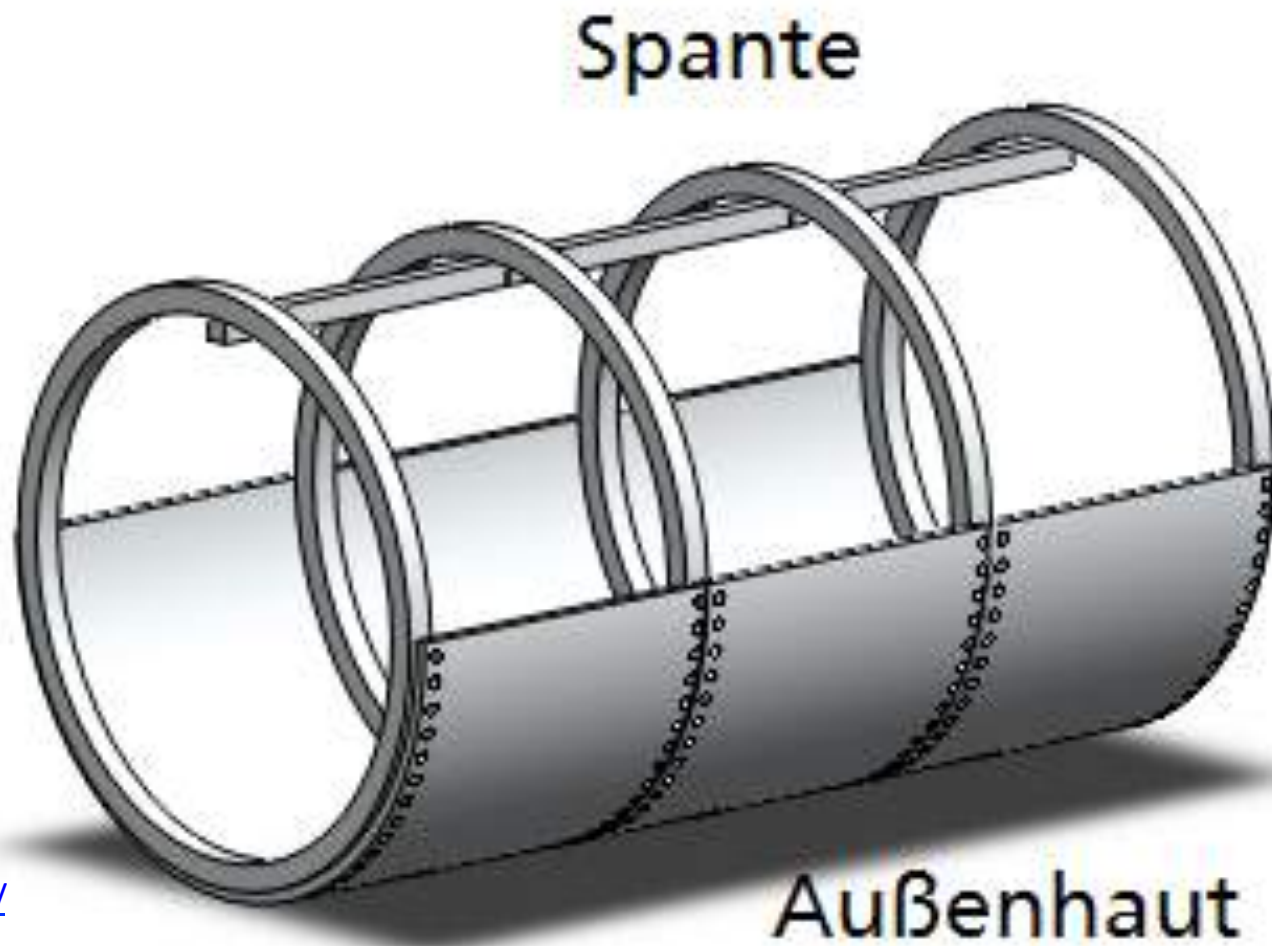


Quelle:

<http://www.aviation4u.de/school/bau-tragwerk.htm>

## Beispiele:

- Schalenbauweise

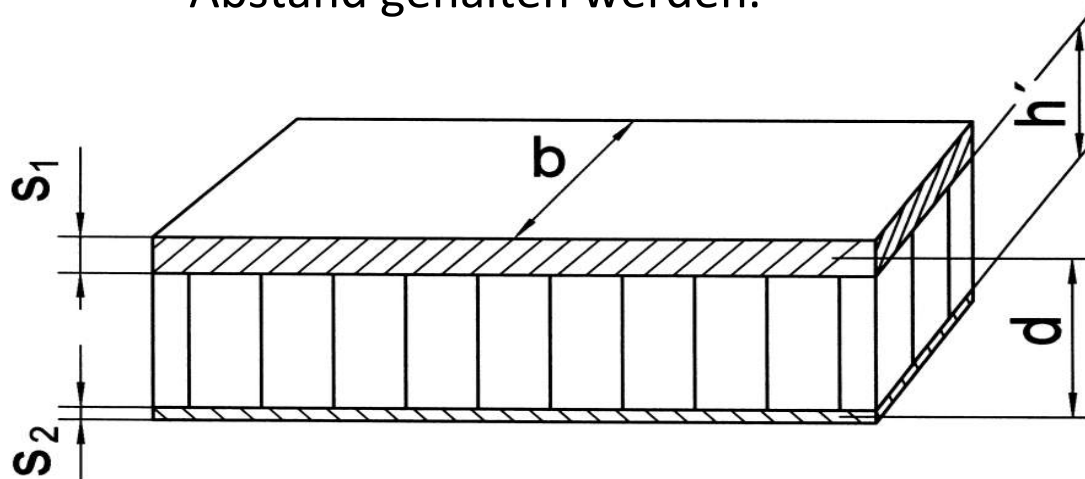


Quelle:

[http://commons.wikimedia.org/wiki/  
File:Schalenbauweise.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schalenbauweise.png)

## Sandwichbauweise:

- Das wesentliche Prinzip einer Sandwichbauweise ist es, die Wandstärke und damit das Flächenträgheitsmoment zu erhöhen ohne dass dabei die Masse im gleichen Maße zunimmt.
- Ein Sandwichaufbau besteht aus zwei relativ dünnwandigen, festen Deckhäuten, die durch einen leichten, aber druckfesten Kern auf Abstand gehalten werden.



Aufbau einer Sandwichplatte

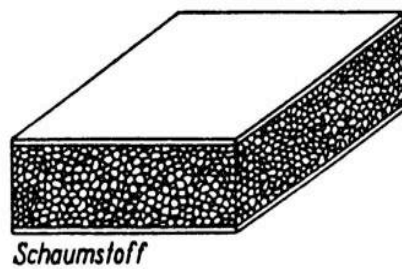
Für die symmetrische Sandwichplatte gilt:

$$s_1 = s_2 = s$$

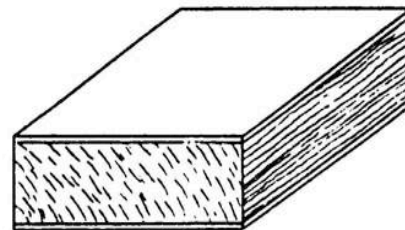
- Die Dichte des Kernes ist dabei deutlich geringer als die Dichte der Deckhäute.
- Als Deckhautmaterial werden oft Aluminiumbleche oder Faserverbundlaminat verwendet.
- Verschiedene Kernmaterialien kommen zum Einsatz.

# Typische Kernmaterialien für Sandwichbauweisen:

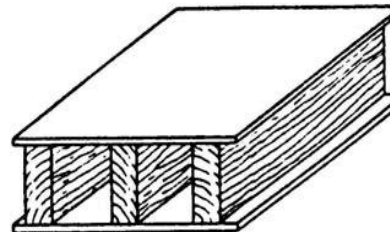
- Man unterscheidet zwischen homogenen Kernen geringer Dichte und strukturierten Kernen.
- Aufgabe des Kernwerkstoff ist es, Die Decklagen auf Abstand zu halten. Dabei werden aber auch Schubbeanspruchungen über den Kern übertragen.



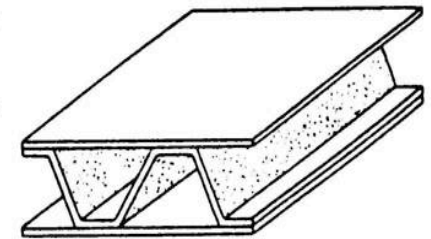
Schaumstoff



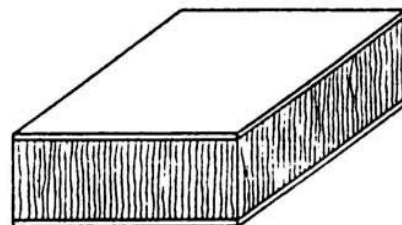
Balsa - Längsholz



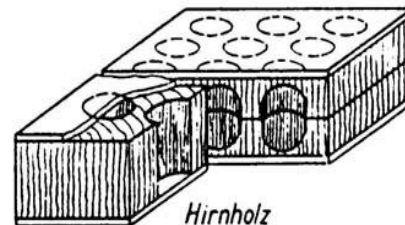
Balsa - Stege



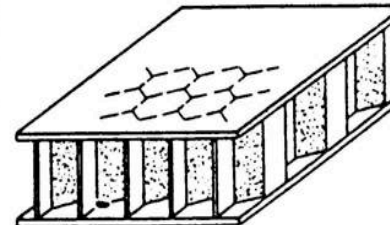
Wellblech



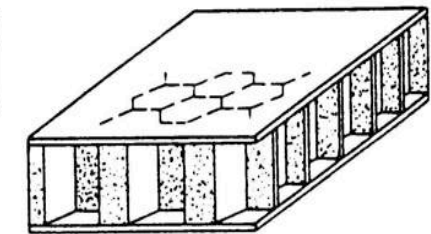
Balsa - Hirnholz



Hirnholz  
mit Erleichterungslöchern



Wabenkern - längs



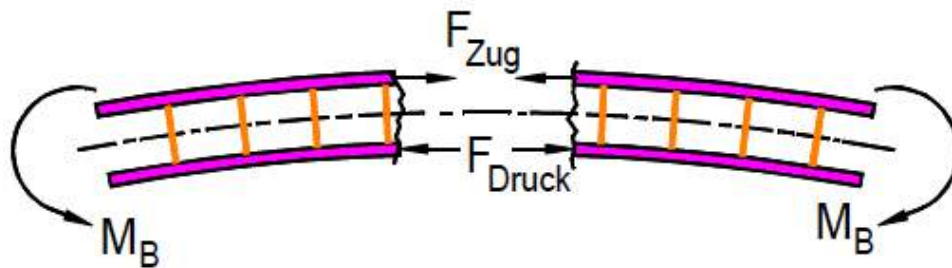
Wabenkern - quer

Verschiedene Kernwerkstoffe für Sandwichbauweisen

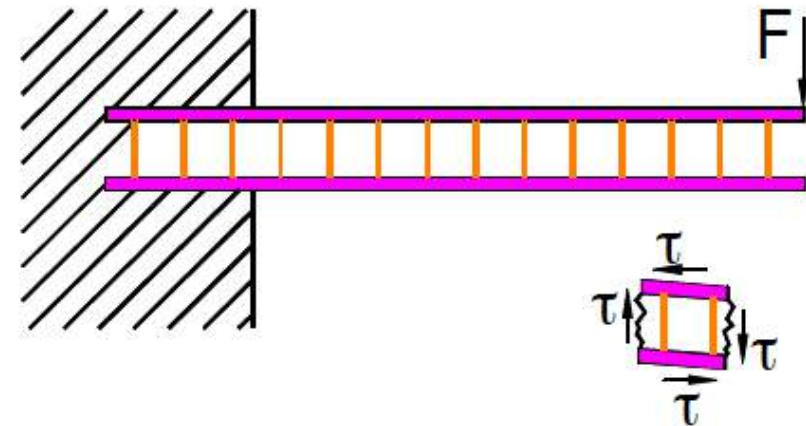
Bildquelle: Hertel: Leichtbau

## Belastungen im Sandwichtaufbau:

- Die Biegebeanspruchung des Sandwichtaufbaus wird durch Zug- und Druckkräfte in den beiden Decklagen aufgenommen.
- Der Sandwichkern nimmt die Schubkräfte auf.
- Die Verklebung zwischen Kernmaterial und Deckhaute wird dadurch ebenfalls auf Schub beansprucht.



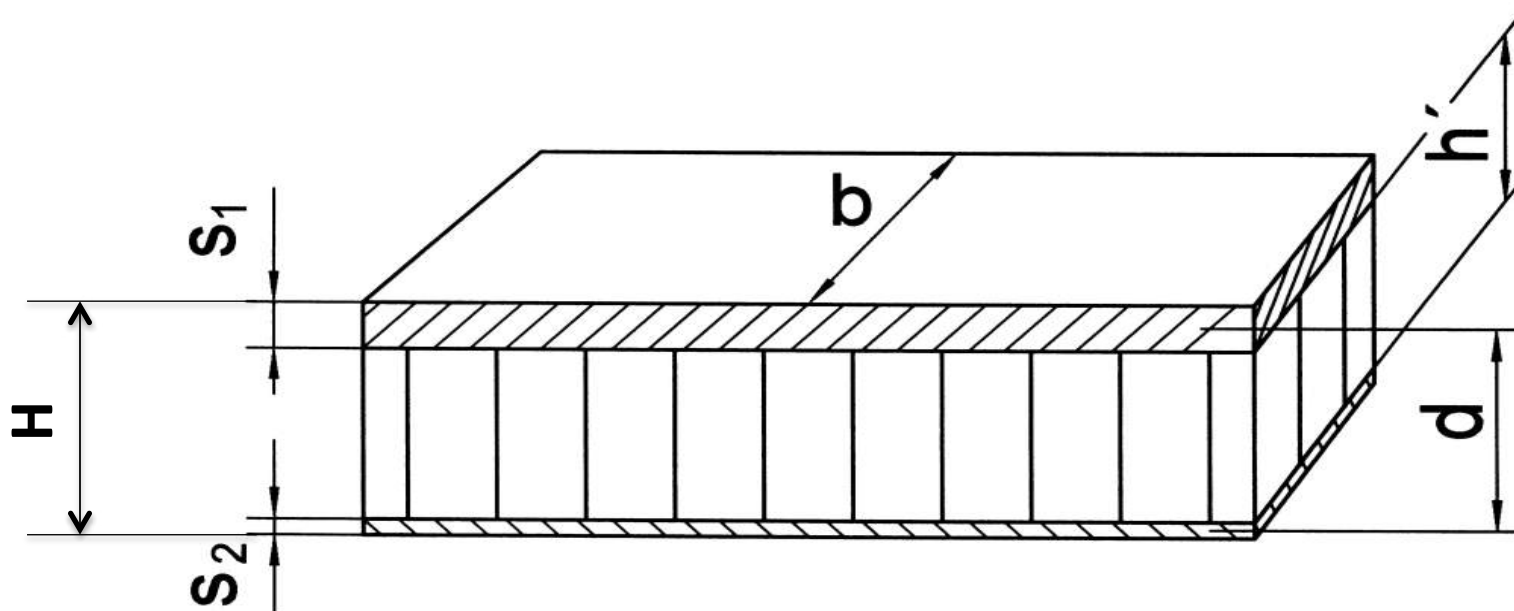
Biegebeanspruchung im Sandwich



Schubbeanspruchung im Sandwichkern

## Das Prinzip der Sandwichbauweise:

- Das Prinzip der Sandwichbauweise wird deutlich, wenn man eine massive Platte der Breite  $b$  und der Gesamtdicke  $H$  mit einem gleich großen Sandwichtaufbau vergleicht:
- Die Gesamtdicke  $H$  des Sandwichtaufbaus ist  $H = h' + s_1 + s_2$
- Mit  $h' = h_{\text{Kern}}$  gilt für den symmetrischen Sandwichtaufbau:  $H = h_{\text{Kern}} + 2s$



## Das Prinzip der Sandwichbauweise:

- Das Flächenträgheitsmoment der massiven Platte ist:

$$I_y = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

- Die Biegesteifigkeit der massiven Platte ist:

$$E \cdot I_y = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{12}$$

- Wählt man dagegen einen Sandwichtaufbau mit symmetrischem Decklagenaufbau  $s = s_1 = s_2$ , der Kerndicke  $h_{\text{Kern}} = h'$ , dann gilt für die Gesamtdicke des Sandwichtaufbaus:

$$H_{\text{Sandwich}} = h_{\text{Kern}} + 2s$$

- Für den Sandwichtaufbau gilt zudem:

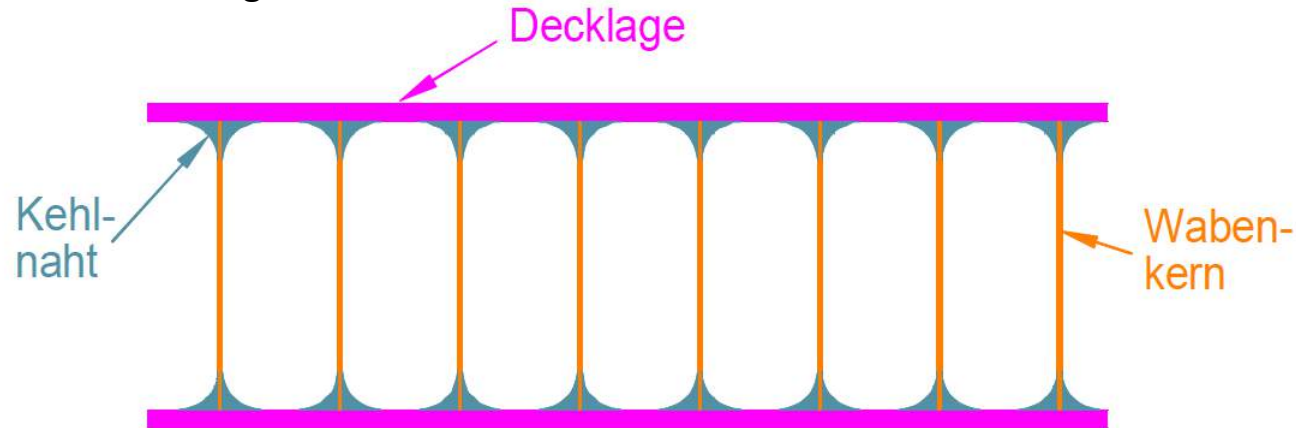
$$I_{y, \text{Sandwich}} = b \cdot \frac{H^3 - h^3}{12}$$

sowie:

$$(E \cdot I_y)_{\text{Sandwich}} = E \cdot b \cdot \frac{H_{\text{Sandwich}}^3 - h_{\text{Kern}}^3}{12}$$

## Biegesteifigkeit eines Sandwichaufbaus:

- Der Sandwichaufbau besteht aus zwei dünnen Decklagen, dem Kern und der Verklebung (Klebfilm) der jeweils die Decklagen mit dem Kern verklebt:

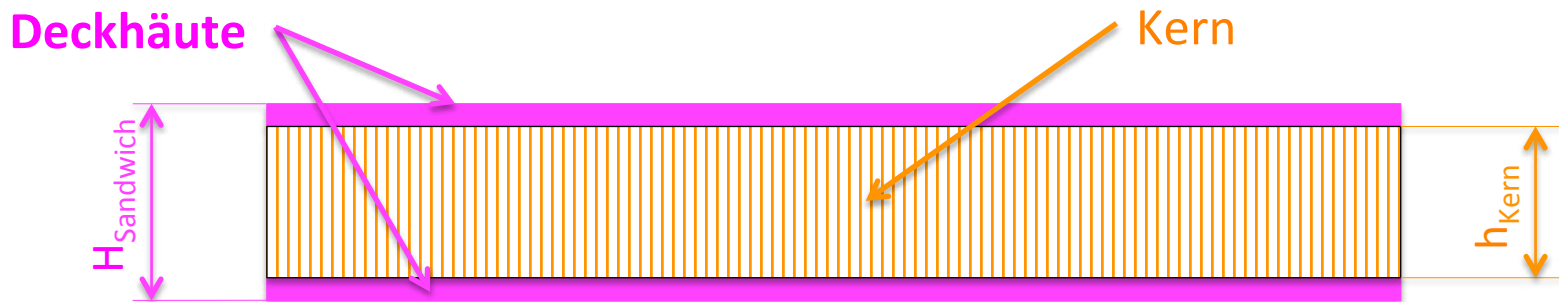


- Gegeben ist ein Sandwichaufbau aus 2 Aluminiumdecklagen ( $\rho_{\text{Alu}} = 2,8 \text{ g/cm}^3$ ) mit je 1 mm Decklagenstärke und einem 10 mm dicken Wabenkern mit der Dichte  $\rho_{\text{Kern}} = 80 \text{ kg/m}^3$ . Zum Verkleben der Decklagen mit dem Wabenkern wird ein Klebfilm von  $100 \text{ g/m}^2$  pro Verklebung benötigt.
- Aufgabe: Berechnen Sie das Flächengewicht [ $\text{kg/m}^2$ ] des Sandwichaufbaus und vergleichen Sie dieses mit dem Flächengewicht einer massiven Aluplatte bei gleicher Gesamtdicke.
- Wie groß sind die Biegesteifigkeit ( $\mathbf{E} \cdot \mathbf{I}_y$ ) des Sandwichaufbaus und der massiven Platte?
- Wie dick wäre eine massive Aluplatte bei gleichem Flächengewicht?
- Vergleichen Sie nun die Biegesteifigkeit des Sandwichaufbaus mit dem der massiven Aluplatte bei gleichem Flächengewicht.



# Sandwichstrukturen...

- ...haben durch die Kombination von Deckhäuten und Kern eine große Gesamtwandstärke.
- Dadurch sind sie besonders leicht und biegesteif.
- Die Kräfte in Ebenenrichtung werden fast ausschließlich von den Deckhäuten aufgenommen.
- Schubbeanspruchungen werden vom Kern aufgenommen.
- Grundvoraussetzung ist eine gute Verklebung zwischen dem Kern und den Deckhäuten.
- Das Ablösen der Deckhäute vom Kern (Delamination) ist eines der kritischsten Versagenskriterien beim Sandwichaufbau.



# Sandwichberechnung

- Das wesentliche Merkmal einer Sandwichaufbaus ist die Biegesteifigkeit
- Für einen schmalen Sandwichstreifen mit symmetrischem Aufbau gilt:

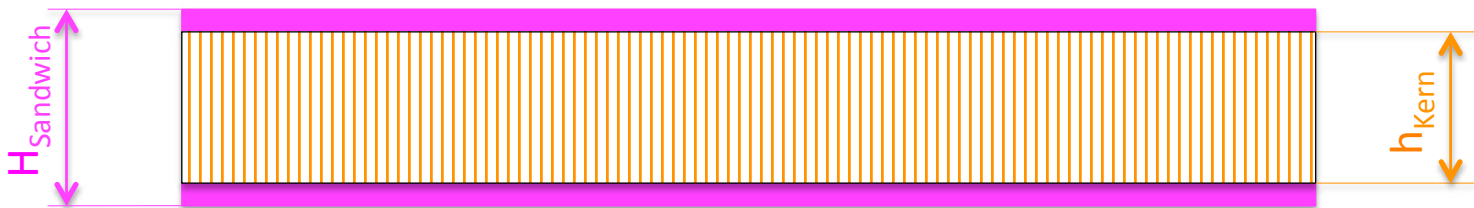
$$(E \cdot I_y)_{Sandwich} = E \cdot b \cdot \frac{H_{Sandwich}^3 - h_{Kern}^3}{12}$$

← symmetrischer  
Sandwichaufbau

- **Beachte:** Diese Formel ist nur anwendbar, wenn beide Decklagen den gleichen E-Modul haben und gleich dick sind ( $s_1 = s_2$  und  $E_1 = E_2$ )!
- Zum Vergleich unterschiedlicher Sandwichaufbauten muss man gleich breite Streifen miteinander vergleichen. Oft wird daher die auf die Breite normierte Biegesteifigkeit verwendet:

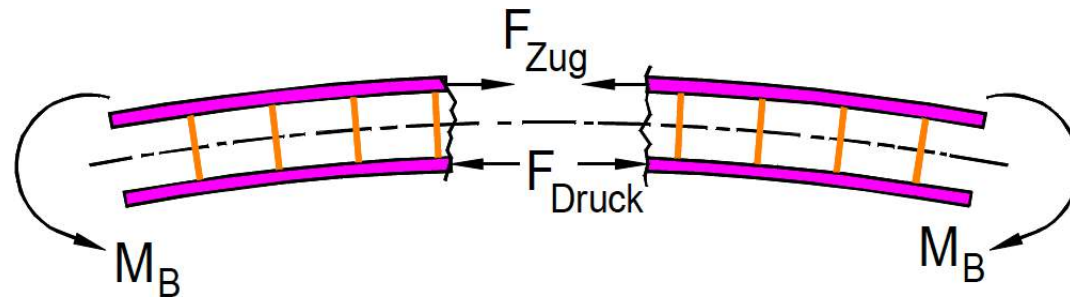
$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_{Sandwich} = E \cdot \frac{H_{Sandwich}^3 - h_{Kern}^3}{12}$$

← symmetrischer  
Sandwichaufbau

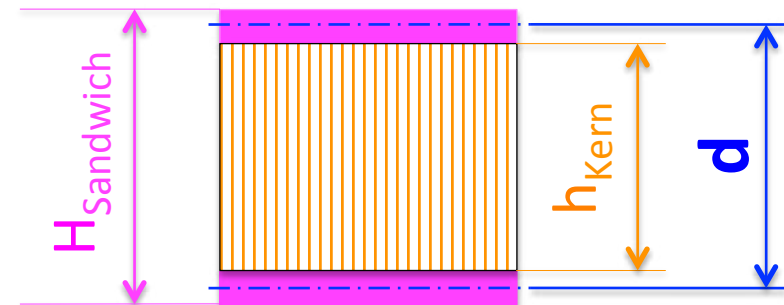


## Biegebeanspruchung im Sandwich

- Bei einer Biegebeanspruchung des Sandwichaufbaus bilden die Schnittkräfte der beiden Deckhäute ein Kräftepaar.
- Wenn man davon ausgeht, dass die Kräfte in beiden Deckhäuten gleich groß sind ( $F = F_{\text{Zug}} = -F_{\text{Druck}}$ ), so ist das Biegemoment:  $M_B = F \cdot d$
- $d$  ist dabei der Abstand der Kräfte  $F_{\text{Zug}}$  und  $F_{\text{Druck}}$ .

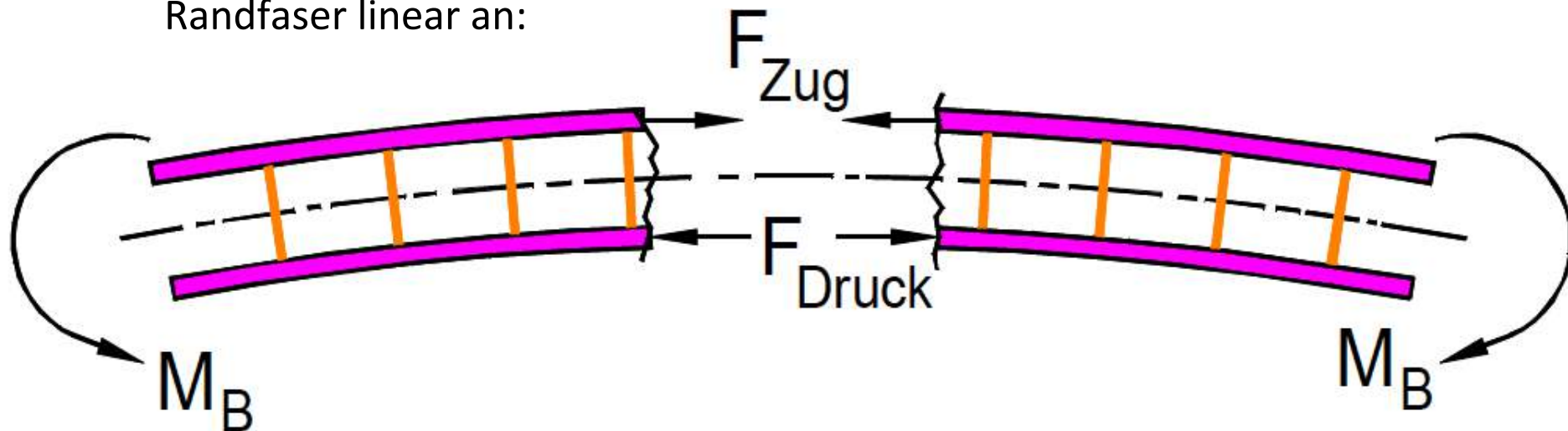


- Betrachten wir den Sandwichquerschnitt genau, so müsste also die rechnerische Sandwichdicke „ $d$ “ von Mitte Deckhaut bis Mitte Deckhaut gemessen werden:



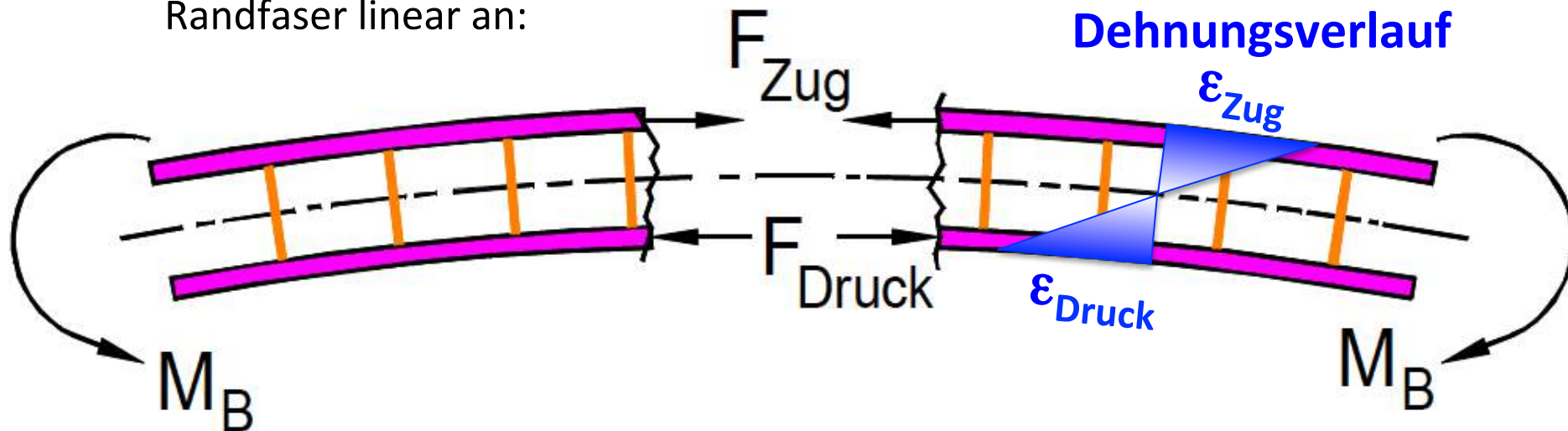
## Biegebeanspruchung im Sandwich

- Bei Biegebeanspruchung des Sandwichaufbaus können die Verläufe von Biegedehnung und Biegespannung analysiert werden.
- An der neutralen Faser sind Spannungen und Dehnungen gleich Null.
- An den Rändern werden Spannungen und Dehnungen maximal.
- Die Dehnungen steigen von der neutralen Faser ausgehend bis zur Randfaser linear an:



## Biegebeanspruchung im Sandwich

- Bei Biegebeanspruchung des Sandwichaufbaus können die Verläufe von Biegedehnung und Biegespannung analysiert werden.
- An der neutralen Faser sind Spannungen und Dehnungen gleich Null.
- An den Rändern werden Spannungen und Dehnungen maximal.
- Die Dehnungen steigen von der neutralen Faser ausgehend bis zur Randfaser linear an:

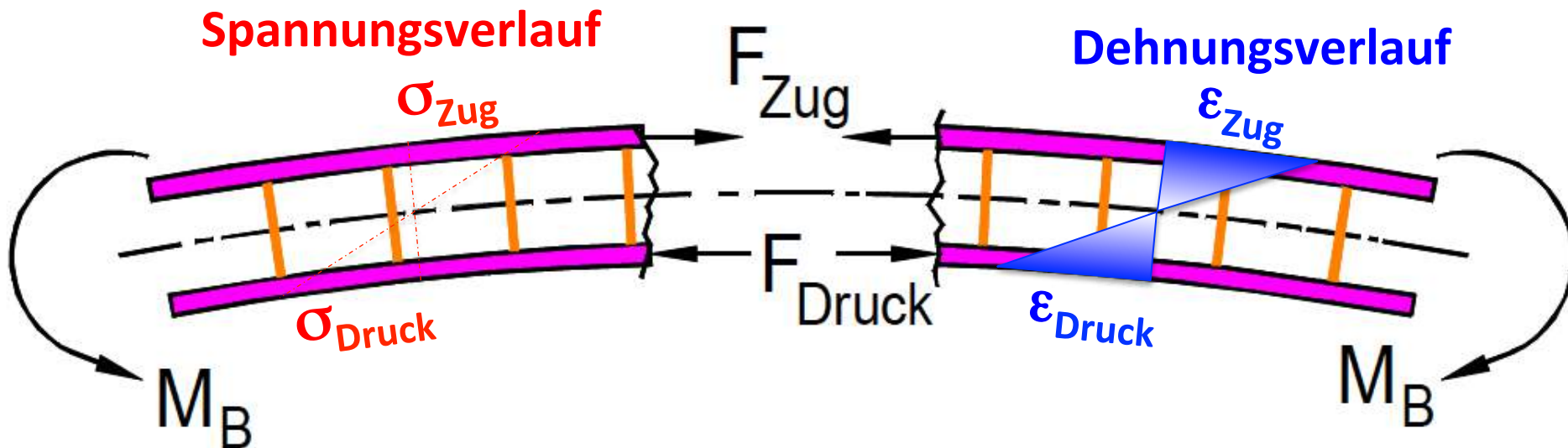


⇒ **Aufgabe:** Skizzieren Sie auf der linken Seite den Spannungsverlauf.

Beachten Sie dabei:  $E_{Kern} \ll E_{Deckhaut}$

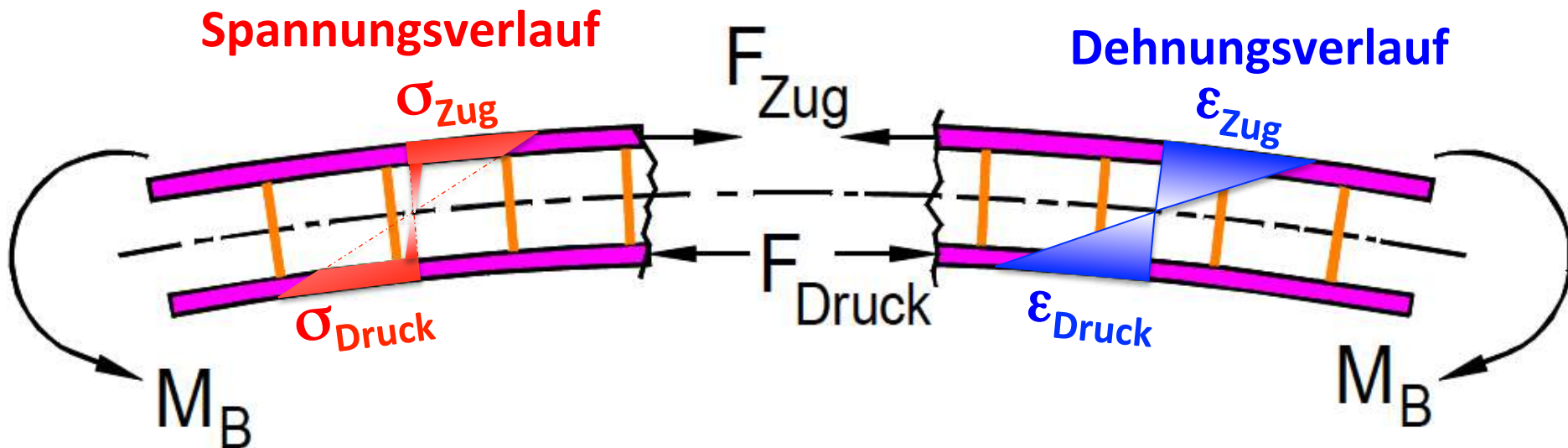
## Biegebeanspruchung im Sandwich

- An der neutralen Faser sind Spannungen und Dehnungen gleich Null.
- An den Rändern werden Spannungen und Dehnungen maximal.
- Die Spannungen im Kern sind vernachlässigbar klein, wenn der E-Modul des Kerns klein ist.



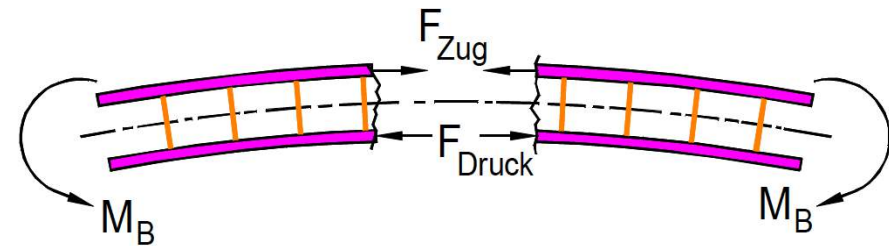
## Biegebeanspruchung im Sandwich

- An der neutralen Faser sind Spannungen und Dehnungen gleich Null.
- An den Rändern werden Spannungen und Dehnungen maximal.
- Die Spannungen im Kern sind vernachlässigbar klein, wenn der E-Modul des Kerns klein ist.

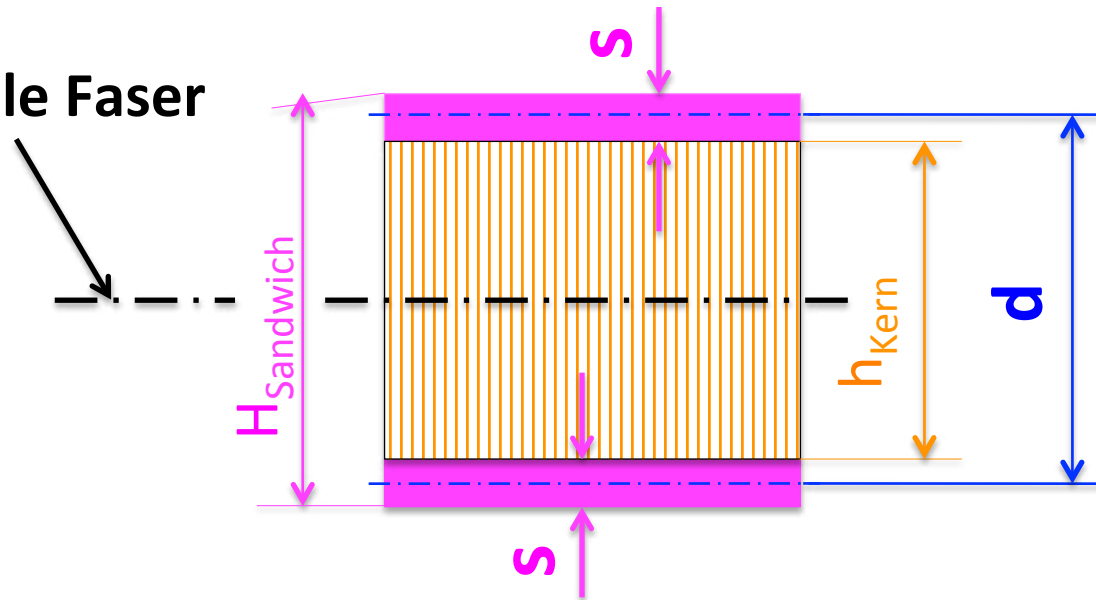


## Neutrale Faser im Sandwichaufbau

- Die **biegeneutrale Faser** erfährt bei Durchbiegung des Sandwiches **keine Längenänderung**.
- Bei einem **symmetrischen Sandwichaufbau** (gleichdicke Deckschichten mit gleichem E-Modul) liegt die **biegeneutrale Faser in der Mitte**.



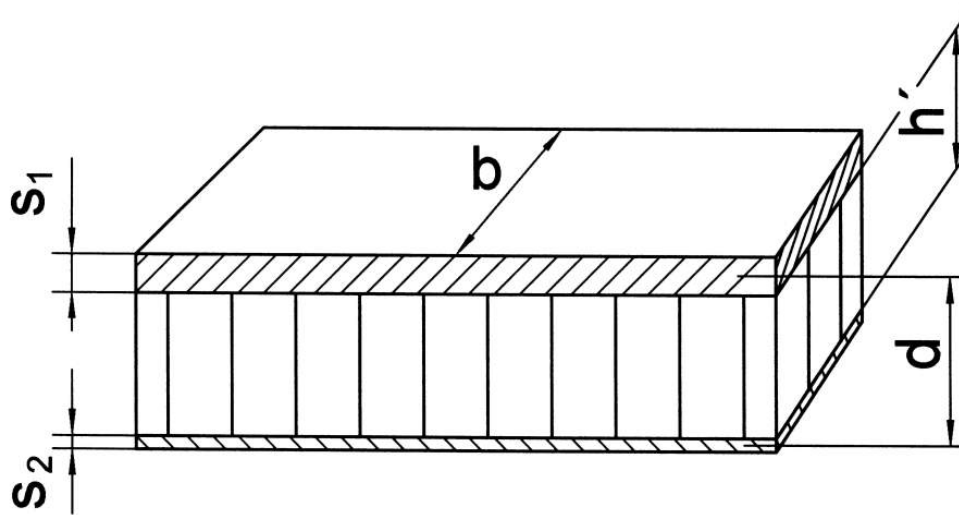
### Neutrale Faser





# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Viele Sandwichaufbauten in der Praxis sind asymmetrisch.
- Unterschiedlich können dabei sein:
  - die Dicken der beiden Deckhäute,
  - die E-Module der Deckhäute, wenn diese aus unterschiedlichen Materialien bestehen.



## Fragen:

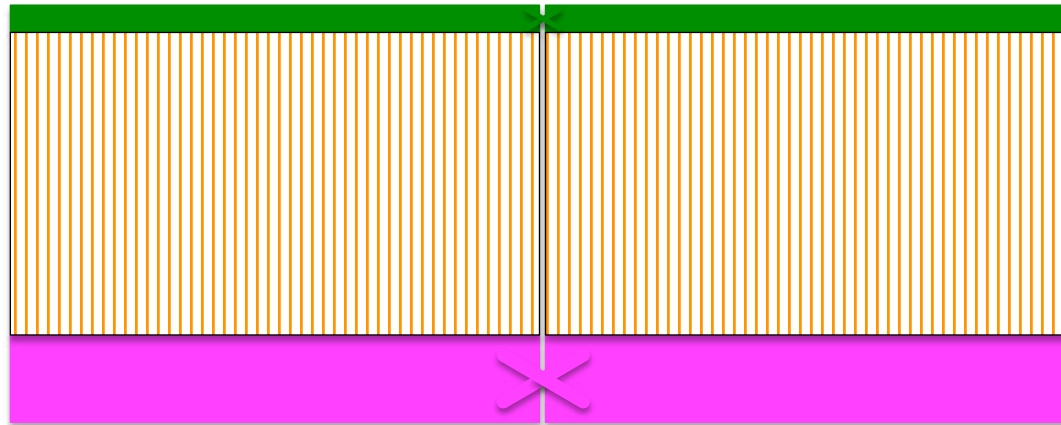
- Wo liegt bei einem asymmetrischen Sandwichaufbau die neutrale Faser?
- Wie berechnet man die Biegesteifigkeit?

# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

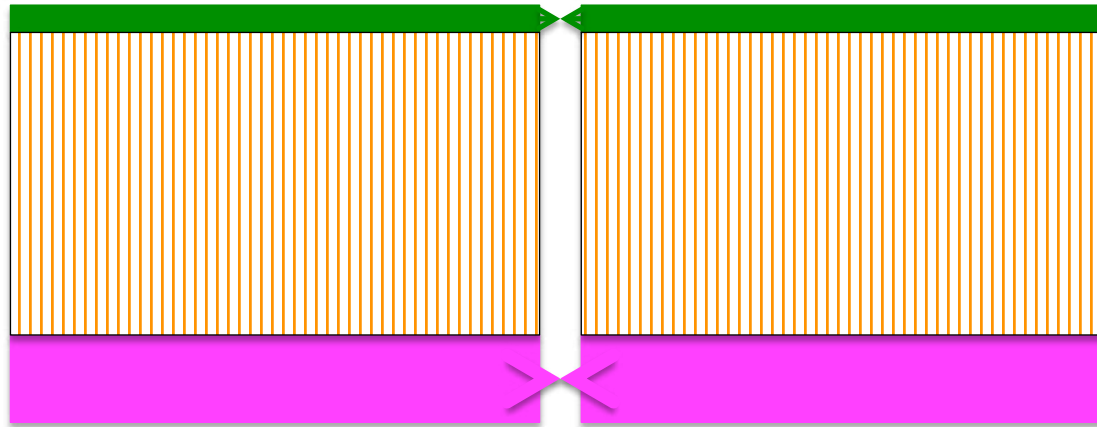


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

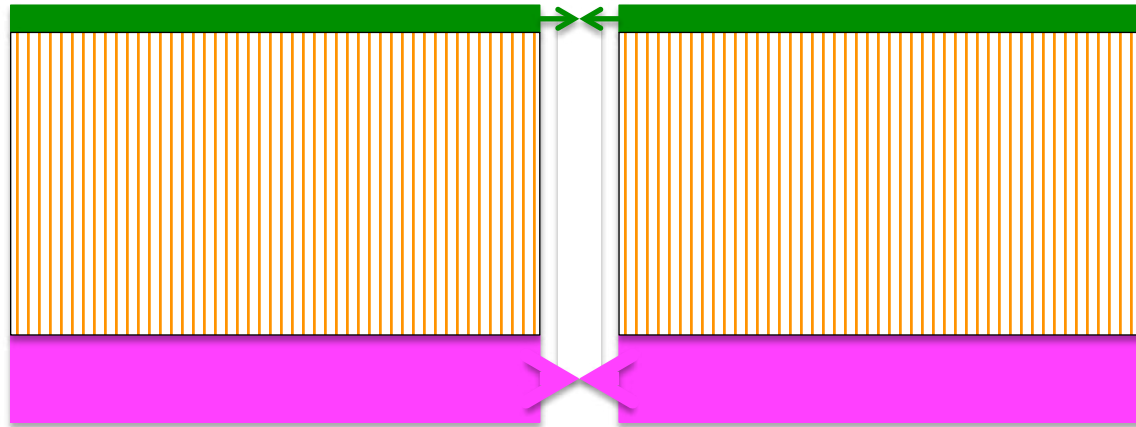


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

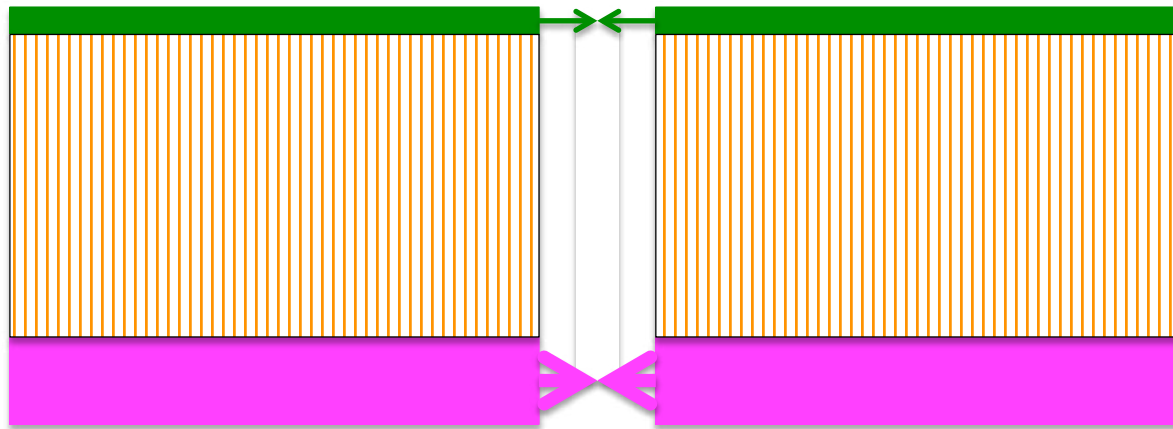


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

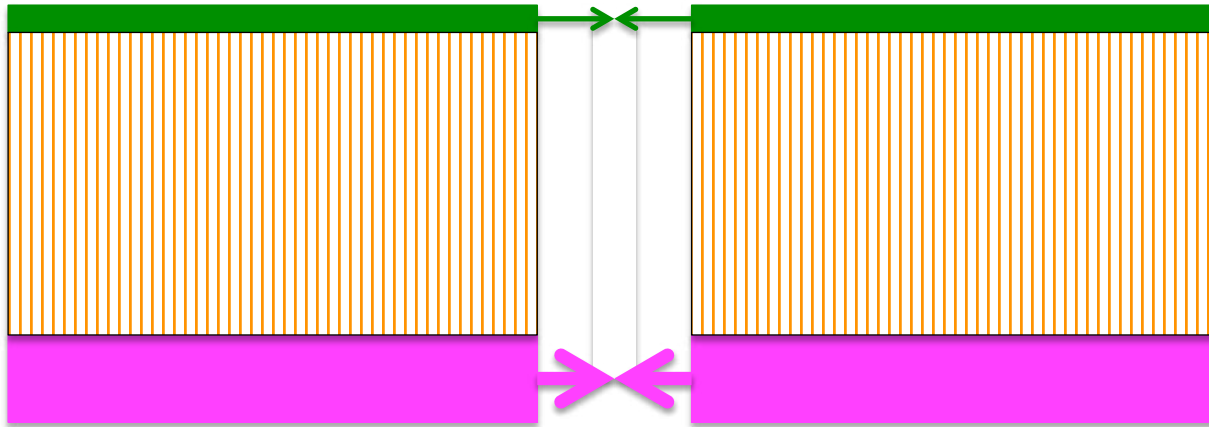


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

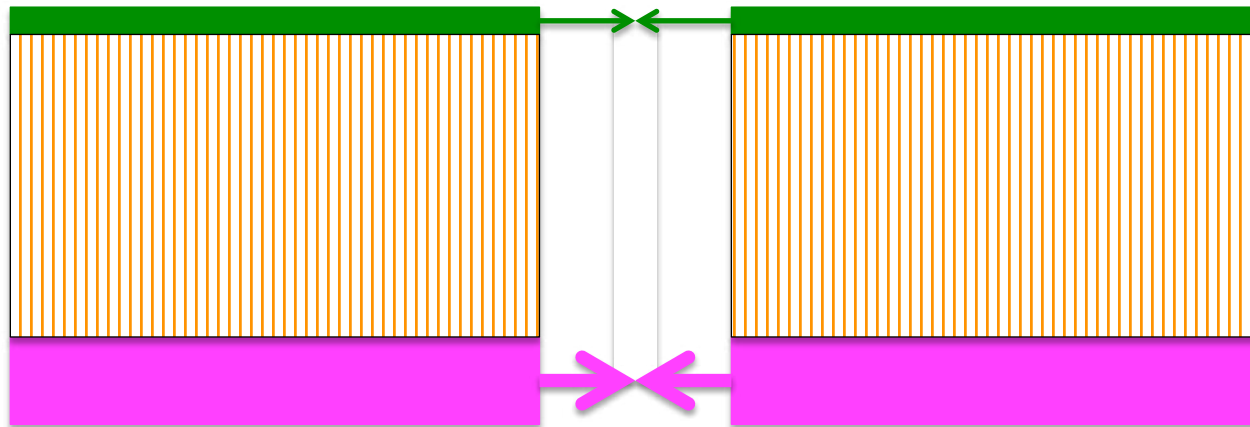


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

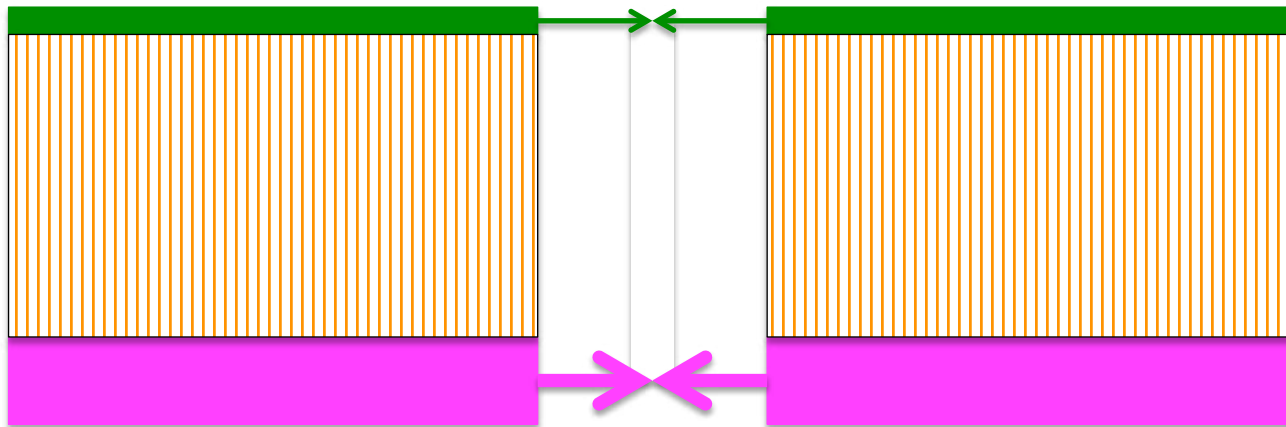


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$



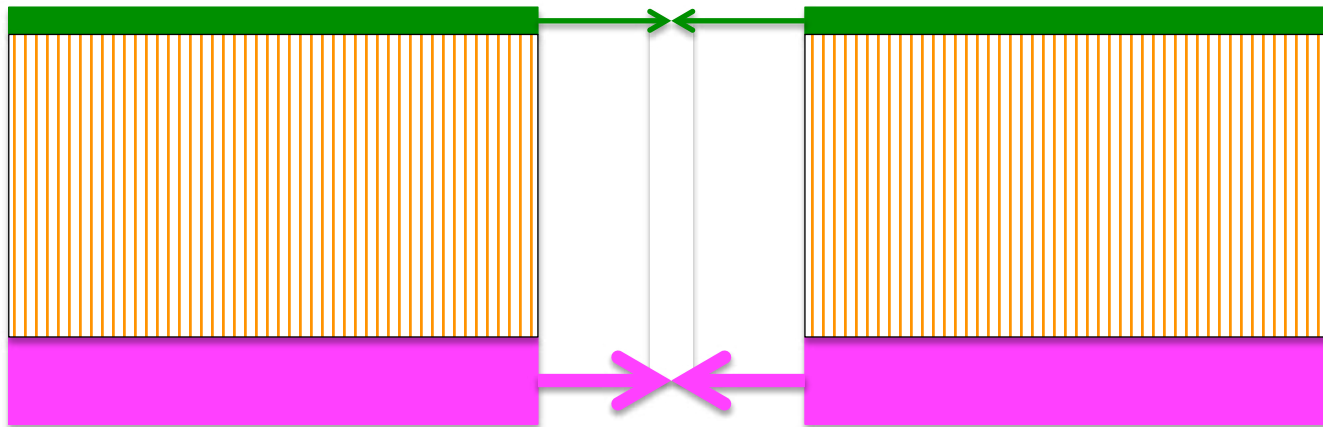


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

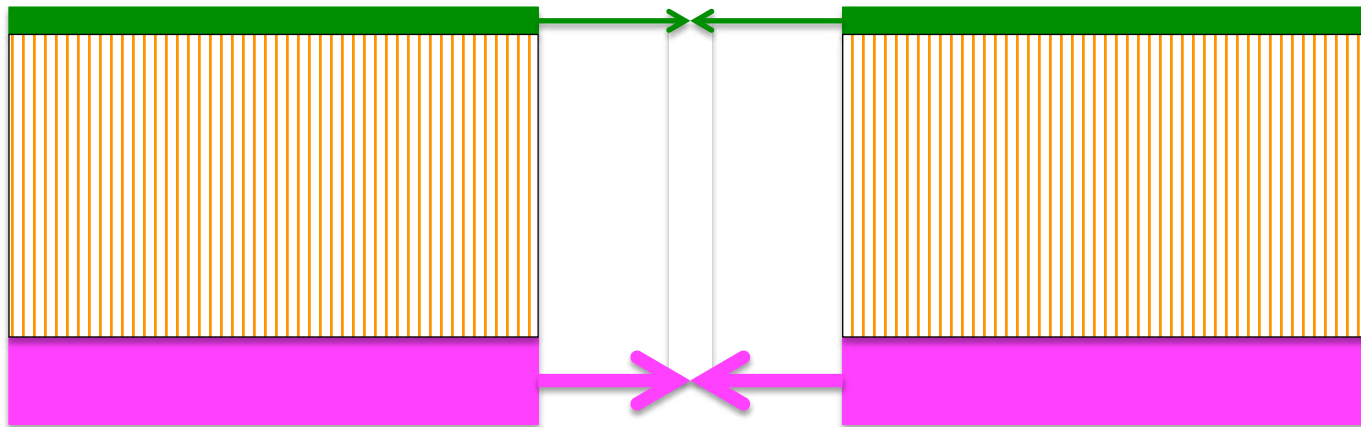


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$

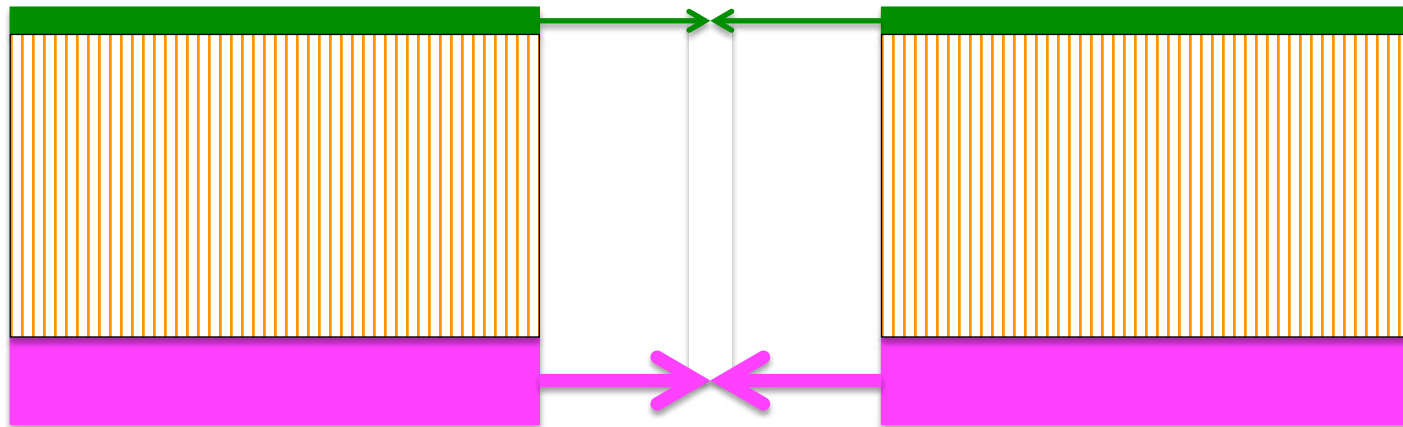


# Asymmetrische Sandwichaufbauten

- Um den asymmetrischen Sandwichaufbau zu analysieren, wird ein entsprechender Aufbau freigeschnitten:
- Dabei soll der Sandwichaufbau eben bleiben.
  - ⇒ Die Dehnungen in beiden Deckschichten müssen gleich bleiben, damit das Sandwich eben bleibt.
  - ⇒ Die Schnittkraft in der dickeren Deckhaut muss größer sein als in der dünnen Deckhaut

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$F = \sigma \cdot A$$



# Asymmetrische Sandwichaufbauten

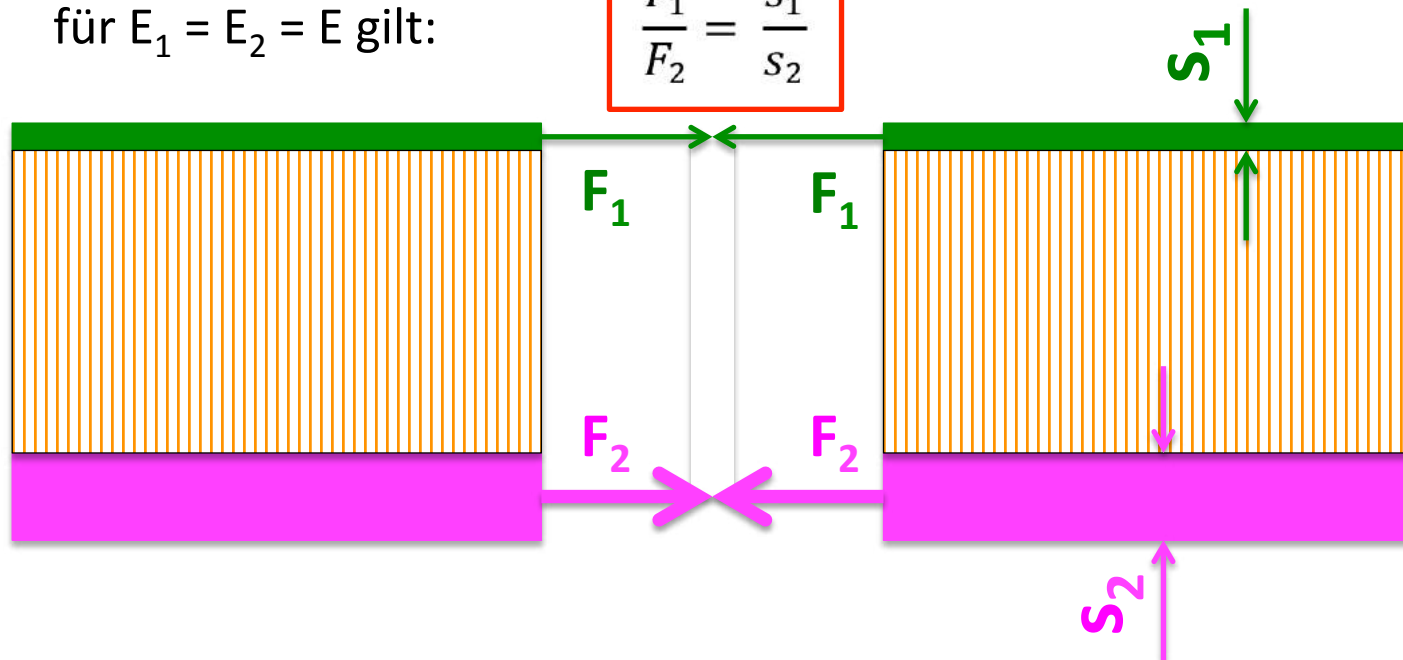
- Der Sandwichaufbau soll eben bleiben!

- Aus  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  und  $F = \sigma \cdot A$  folgt:  $F = E \cdot \varepsilon \cdot A$

$$\Rightarrow F \sim E \cdot A$$

- mit  $b_1 = b_2 = b$  gilt dann:  $F \sim E \cdot s$   $\Rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{E_1 \cdot s_1}{E_2 \cdot s_2}$

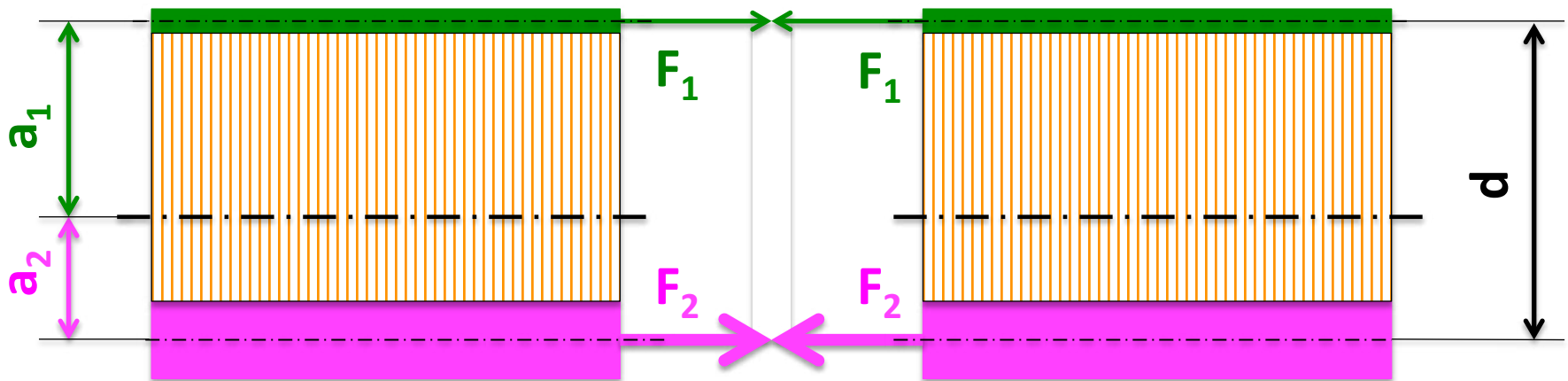
- für  $E_1 = E_2 = E$  gilt:  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{s_1}{s_2}$



## Lage der neutralen Faser im asymmetrischen Sandwichaufbau:

- Der Sandwichaufbau soll eben bleiben!
- ⇒ Das resultierende Biegemoment ist:  $M_B = 0$
- Die einzelne Schnittkraft einer einzelnen Deckhaut erzeugt ein Biegemoment um die neutrale Faser:

$$\Rightarrow \sum M_B = 0 = F_1 \cdot a_1 - F_2 \cdot a_2 \quad \text{mit:} \quad F_i \sim E_i \cdot s_i \quad \Rightarrow \quad \frac{a_1}{a_2} = \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1}$$



⇒ Damit kann die Lage der neutralen Faser bestimmt werden!

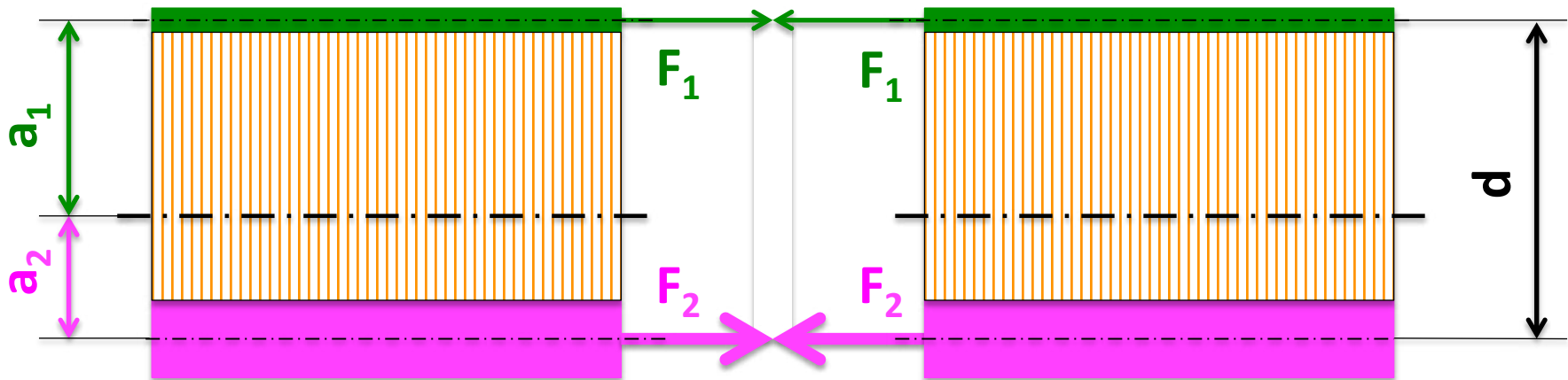
## Lage der neutralen Faser im asymmetrischen Sandwichaufbau:

### Beispielrechnung:

- $h_{\text{Kern}} = 18 \text{ mm}$
- $s_1 = 0,8 \text{ mm}$        $E_1 = 45 \text{ GPa}$
- $s_2 = 1,2 \text{ mm}$        $E_2 = 73 \text{ GPa}$
- Wie kann die Biegesteifigkeit dieses asymmetrischen Sandwichaufbaus berechnet werden?

Berechnen Sie:

- $H_{\text{Sandwich}}$
- $d$
- $a_1$  und  $a_2$



# Lage der neutralen Faser im asymmetrischen Sandwichaufbau:

## Beispielrechnung:

$$H_{Sandwich} = h_{Kern} + s_1 + s_2 = 20 \text{ mm}$$

$$d = h_{Kern} + \frac{s_1}{2} + \frac{s_2}{2} = 19 \text{ mm}$$

mit:

$$a_1 = a_2 \cdot \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1}$$

sowie

$$a_1 + a_2 = d$$

ergibt sich:

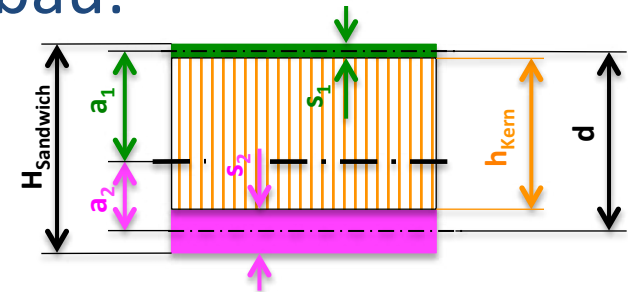
$$a_2 \cdot \left( \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1} + 1 \right) = d$$

⇒

$$a_2 = \frac{d}{\frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1} + 1} = 5,534 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow a_1 = 13,466 \text{ mm} ;$$

$$a_2 = 5,534 \text{ mm}$$



- $h_{Kern} = 18 \text{ mm}$
- $s_1 = 0,8 \text{ mm}$       $E_1 = 45 \text{ GPa}$
- $s_2 = 1,2 \text{ mm}$       $E_2 = 73 \text{ GPa}$

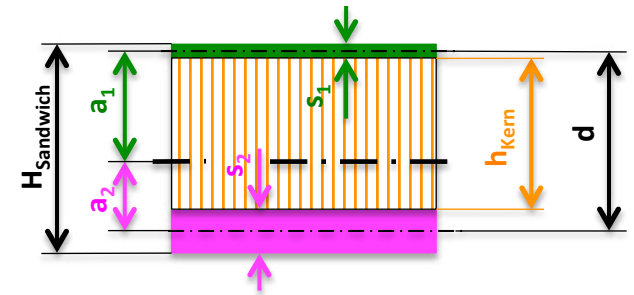
# Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus:

## Beispielrechnung:

- $H_{\text{Sandwich}}$ ,  $d$ , und die **Lage der neutralen Faser** wurden berechnet.

## Es bleibt die Frage:

- Wie kann die Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus berechnet werden?

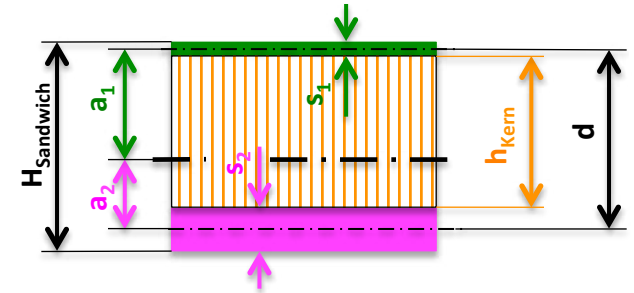




# Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus:

## Beispielrechnung:

- $H_{\text{Sandwich}}$ ,  $d$ , und die **Lage der neutralen Faser** wurden berechnet.

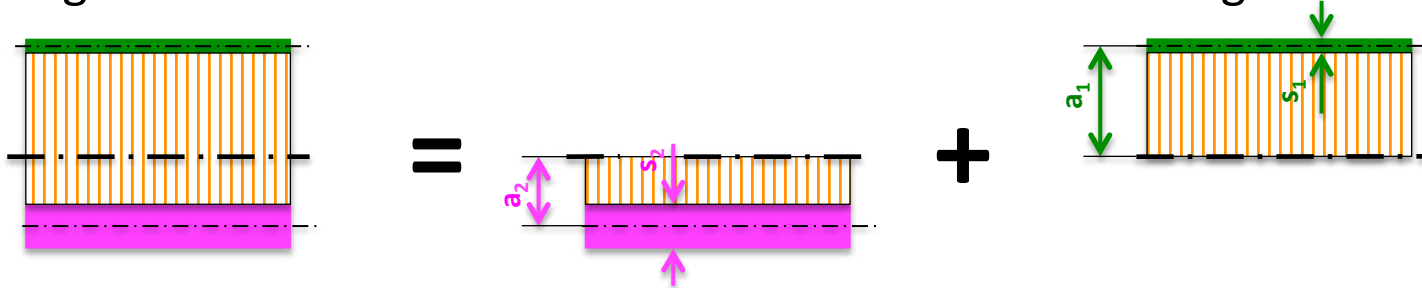


## Es bleibt die Frage:

- Wie kann die Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus berechnet werden?

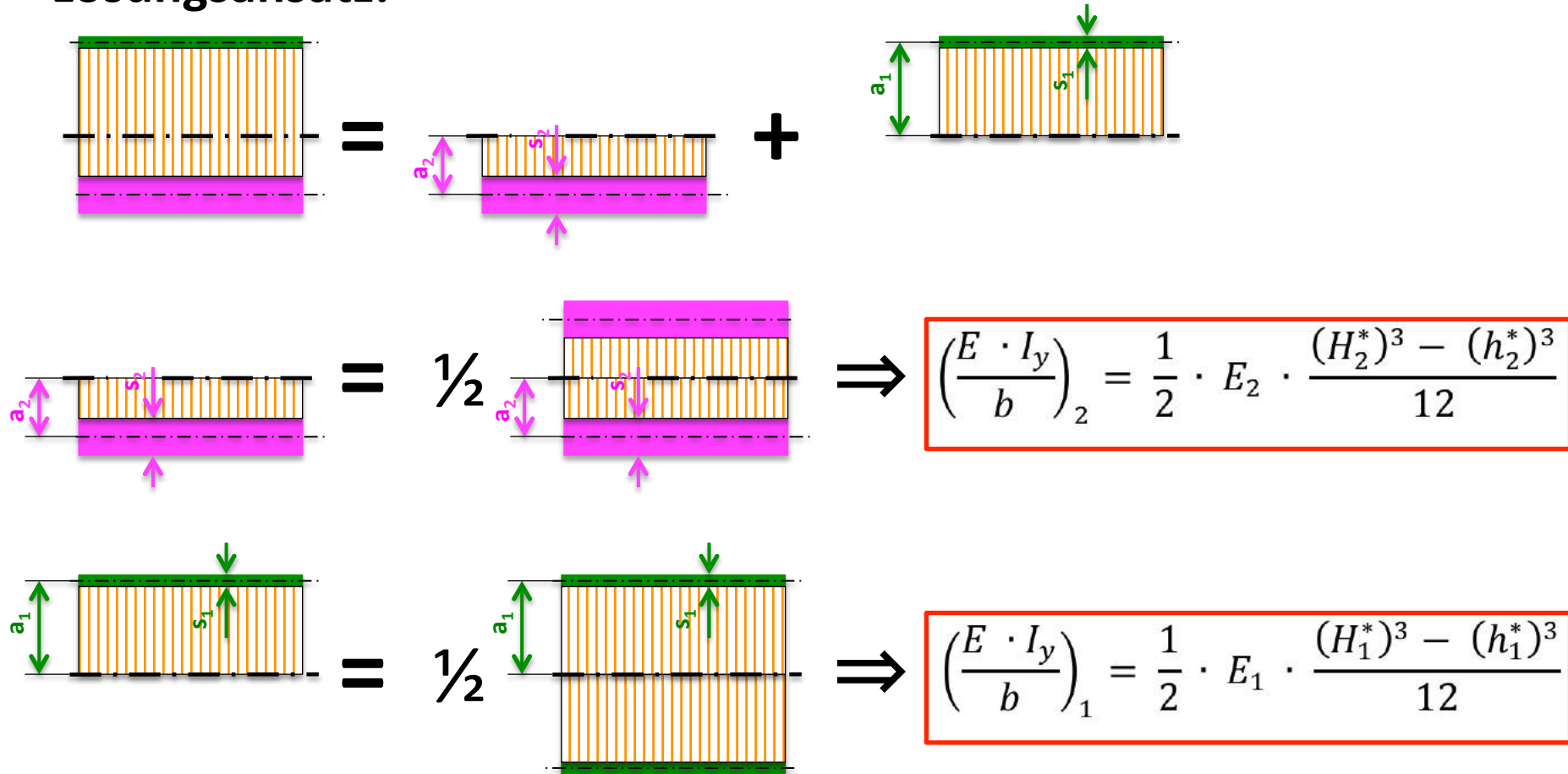
## Lösungsansatz:

Der Sandwichaufbau werde horizontal an der neutralen Faser aufgeschnitten und so in zwei halbe Sandwichaufbauten geteilt:



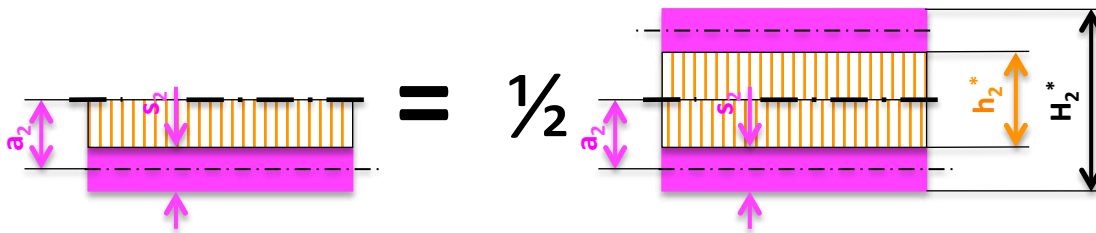
# Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus:

## Lösungsansatz:



## Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus:

Für den halben „Ersatz“-Sandwichaufbau 2 gilt:



$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_2 = \frac{1}{2} \cdot E_2 \cdot \frac{(H_2^*)^3 - (h_2^*)^3}{12}$$

Für  $H_2^*$  und  $h_2^*$  gilt dabei:  $H_2^* = 2 \cdot a_2 + s_2$  ;  $h_2^* = 2 \cdot a_2 - s_2$

Analoges gilt für den halben „Ersatz“-Sandwichaufbau 1 und  $H_1^*$  und  $h_1^*$ .

**Aufgabe:** Berechnen Sie nun die auf die Breite normierte Biegesteifigkeit des zuvor dargestellten asymmetrischen Sandwichaufbaus.

## Biegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus:

Nach vorstehenden Zusammenhängen ergibt sich für den asymmetrischen Sandwichaufbau:

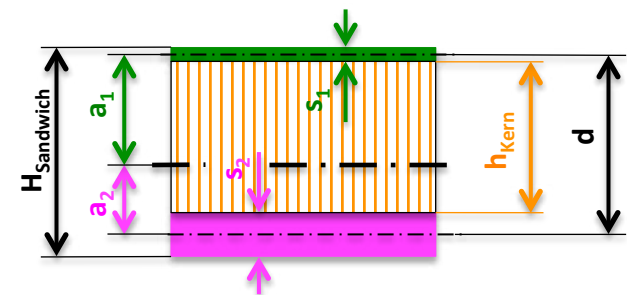
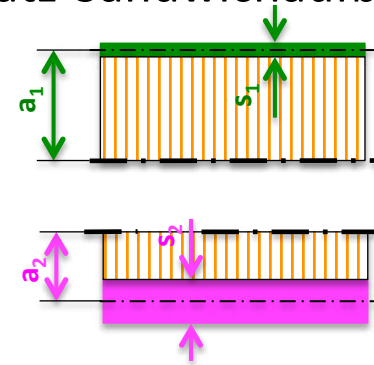
- normierte Biegesteifigkeiten der „halben Ersatz-Sandwichaufbauten“:

$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_1 = 6.529,9 \text{ Nm}$$

$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_2 = 2.693,3 \text{ Nm}$$

- normierte Gesamtbiegesteifigkeit des asymmetrischen Sandwichaufbaus:

$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_{\text{asymm. Sandwich}} = 9.223,2 \text{ Nm}$$



## Alternative Vorgehensweise:

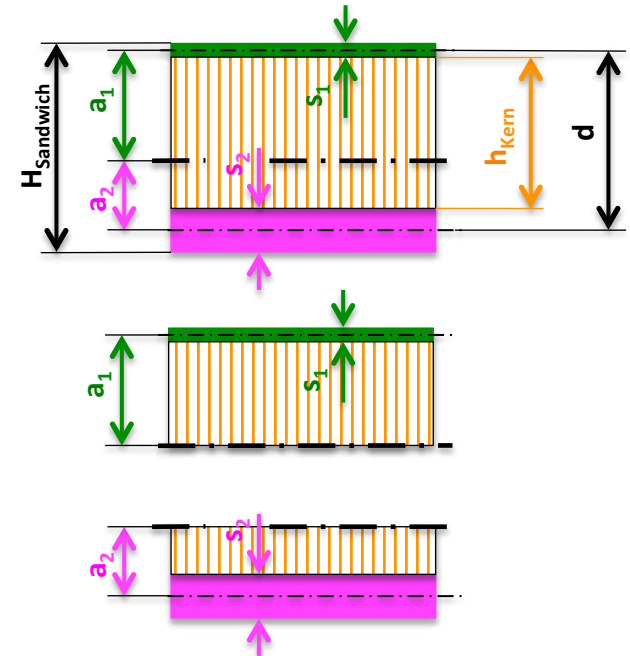
Alternativ können die normierten Biegesteifigkeiten der „halben Ersatz-Sandwichaufbauten“ auch nach dem Satz von Steiner berechnet werden:

- Es werden die normierte Eigenbiegesteifigkeit der einzelnen Deckhaut der auf die Breite normierte Steiner-Anteil berechnet.
- Der Steiner-Anteil ist das Produkt aus normierter Querschnittsfläche und dem Quadrat des Abstandes.
- **Normiert** man die Querschnittsfläche **A** einer Deckhaut **auf** die Breite **b**, so verbleibt als Größe die Deckhautstärke **s**:

$$\frac{A}{b} = \frac{b \cdot s}{b} = s$$

### Vorliegendes Beispiel:

- Im Folgenden wollen wir die Resultate der Methode nach Steiner mit den zuvor ermittelten Ergebnissen vergleichen



## Alternative Vorgehensweise:

### Vorliegendes Beispiel:

- Die normierte Eigenbiegesteifigkeit der Deckhaut 1 ist:

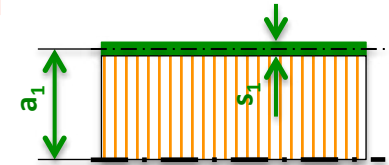
$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_{Haut 1} = E_1 \cdot \frac{s_1^3}{12} = 1,9 Nm$$

- Der auf b bezogene Steiner-Anteil für Deckhaut 1 beträgt:

$$(E \cdot s \cdot a^2)_{Haut 1} = 6.528,0 Nm$$

- Für Deckhaut 1 ergibt sich insgesamt:

$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_1 = 6.529,9 Nm$$



- Die normierte Eigenbiegesteifigkeit der Deckhaut 2 ist:

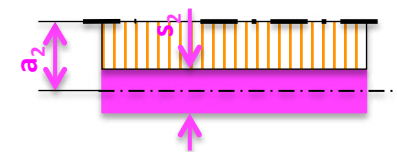
$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_{Haut 2} = E_2 \cdot \frac{s_2^3}{12} = 10,5 Nm$$

- Der auf b bezogene Steiner-Anteil für Deckhaut 2 beträgt:

$$(E \cdot s \cdot a^2)_{Haut 2} = 2.682,7 Nm$$

- Für Deckhaut 2 ergibt sich insgesamt:

$$\left(\frac{E \cdot I_y}{b}\right)_2 = 2.693,3 Nm$$





## Zwischenfazit zur Berechnung der Biegesteifigkeit von asymmetrischen Sandwichaufbauten:

- Auch asymmetrische Sandwichaufbauten sind als biegesteife Flächenstrukturen geeignet.
- ⇒ Die Biegesteifigkeit wird wie folgt ermittelt:
  - Zunächst muss die Lage der neutralen Faser bestimmt werden.
  - Anschließend werden jeweils ein halber Sandwichaufbau mit Bezug zur neutralen Faser berechnet.
  - Dabei ist die neutrale Faser die nicht gedehnte Bezugsebene, um die der halbe Sandwichaufbau gebogen wird.
  - Zwei Rechenwege sind möglich und liefern die gleichen Ergebnisse.
  - Bei dünnwandig behüteten Sandwichaufbauten (dicker Kern, dünne Deckhäute, ca.:  $h_{\text{Kern}} > 10 s$ ) ist die Eigenbiegesteifigkeit der Deckhäute vernachlässigbar klein.
  - Rechnet man nach der Methode nach „Steiner“ so kann man in diesen Fällen die Berechnung vereinfachen, indem man die Eigenbiegesteifigkeit biegeschlaffer Deckhäute vernachlässigt.



## Steifigkeitserhöhungsfaktor von Sandwichaufbauten:

- Eine häufig benutzte Methode, um Sandwichaufbauten zu bewerten ist der Vergleich mit ähnlich aufgebauten gleicher Gesamtdicke und gleichen Gesamtflächengewichtes.
- Dazu wird ein Sandwichaufbau (dicker, leichter Kern, dünne, feste Deckhäute) mit einem massiven Aufbau verglichen, der bei gleichem Flächengewicht und gleicher Gesamtwandstärke das Material gleichmäßig über die Wandstärke verteilt.  
*Anmerkung: Solche Materialaufbauten sind beispielsweise mit geschäumten Materialien möglich (z.B. **Aluminiumschaum**)*
- Hertel zeigt, dass ein Sandwichaufbau bis zu 3 mal biegesteifer sein kann, als ein entsprechender homogener Leichtgewichtsaufbau.
- Diesen Faktor, um den der Sandwichaufbau leichter ist, nennt er **Steifigkeitserhöhungsfaktor  $\mathbf{K}$**  [kappa].
- Im Folgenden wird der Steifigkeitserhöhungsfaktor  **$\mathbf{K}$**  hergeleitet:



## Steifigkeitserhöhungsfaktor von Sandwichaufbauten:

- Bei der Herleitung des Steifigkeitserhöhungsfaktor  $\mathbf{K}$  wird von biegeschlaffen Deckhäuten ausgegangen, deren Deckhautstärke sehr viel kleiner als die Dicke des Kerns ist ( $s \ll h_{\text{Kern}}$ ).
- Beim entsprechenden symmetrischen Sandwichaufbau kann hier der Unterschied zwischen der Gesamtstärke  $\mathbf{H}_{\text{Sandwich}}$  und  $\mathbf{d}$  vernachlässigt werden.
- Für einen solchen Sandwichaufbau kann die das Flächenträgheitsmoment  $\mathbf{I}_{y,\text{Sandwich}}$  allein durch den Steiner-Anteil der Deckhäute formuliert werden. Dabei ist der Abstand der Deckhäute von der Sandwichmitte näherungsweise  $\mathbf{H}_{\text{Sandwich}}/2$ .

$$I_{y,\text{Sandwich}} = 2 \cdot b \cdot s \cdot \left( \frac{H_{\text{Sandwich}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot s \cdot H_{\text{Sandwich}}^2$$

- Hierzu vergleicht man dazu den gleichdicken ( $H = H_{\text{Sandwich}}$ ) homogenisierten Aufbau. Bei diesem sei das Material, das beim Sandwichaufbau in den Deckhäuten konzentriert ist, gleichmäßig auf die Gesamtwandstärke verteilt:

$$I_{y,\text{homog.Aufbau}} = b \cdot \frac{H^3}{12} \cdot \frac{2 \cdot s}{H} = \frac{1}{6} \cdot b \cdot s \cdot H^2$$

## Steifigkeitserhöhungsfaktor von Sandwichaufbauten:

- Bei der Herleitung des Steifigkeitserhöhungsfaktor  $\mathbf{K}$  wird von biegeschlaffen Deckhäuten ausgegangen, deren Deckhautstärke sehr viel kleiner als die Dicke des Kerns ist ( $s \ll h_{\text{Kern}}$ ).
- Beim entsprechenden symmetrischen Sandwichaufbau kann hier der Unterschied zwischen der Gesamtstärke  $\mathbf{H}_{\text{Sandwich}}$  und  $\mathbf{d}$  vernachlässigt werden.
- Für einen solchen Sandwichaufbau kann die das Flächenträgheitsmoment  $\mathbf{I}_{y,\text{Sandwich}}$  allein durch den Steiner-Anteil der Deckhäute formuliert werden. Dabei ist der Abstand der Deckhäute von der Sandwichmitte näherungsweise  $\mathbf{H}_{\text{Sandwich}}/2$ .

$$I_{y,\text{Sandwich}} = 2 \cdot b \cdot s \cdot \left( \frac{H_{\text{Sandwich}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot b \cdot s \cdot H_{\text{Sandwich}}^2$$

- Hierzu vergleicht man dazu den gleichdicken ( $H = H_{\text{Sandwich}}$ ) Bei diesem sei das Material, das beim Sandwichaufbau in  $d$  konzentriert ist, gleichmäßig auf die Gesamtwandstärke  $H$  verteilt.

$$I_{y,\text{homog.Aufbau}} = b \cdot \frac{H^3}{12} \cdot \frac{2 \cdot s}{H} \leftarrow \frac{1}{6} \cdot b \cdot s \cdot H^2$$

Dieser Faktor verteilt das Material, das beim Sandwich in 2 Deckhäuten  $2 \cdot s$  steckt auf die Wandstärke  $H$ .

## Steifigkeitserhöhungsfaktor von Sandwichaufbauten:

- Der Vergleich zeigt:

$$\frac{I_{y,Sandwich}}{I_{y,homog.Aufbau}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot b \cdot s \cdot H^2}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot s \cdot H^2} = 3 = \kappa$$

- Damit hat der symmetrische Sandwichaufbau gegenüber dem homogenisierten Aufbau ein um den Faktor  $\mathbf{\kappa} = 3$  höheres Flächenträgheitsmoment.
- Für asymmetrische Sandwichaufbauten mit gleichem E-Modul der Deckhäute berechnet Hertel den Steifigkeitserhöhungsfaktor  $\kappa$  nach neben stehender Formel:
- Für Sandwichaufbauten mit unterschiedlichem Deckhautmaterial ( $E_1 \neq E_2$ ) kann man diese Formel wie folgt erweitern:

$$\kappa = 3 \cdot \frac{4 \cdot \frac{s_2}{s_1}}{\left(1 + \frac{s_2}{s_1}\right)^2}$$

$$\kappa = 3 \cdot \frac{4 \cdot \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1}}{\left(1 + \frac{E_2 \cdot s_2}{E_1 \cdot s_1}\right)^2}$$

⇒ **Aufgabe:** Berechnen Sie den Steifigkeitserhöhungsfaktor  $\mathbf{\kappa}$  für das zuvor genannte Beispiel.

## Steifigkeitserhöhungsfaktor von Sandwichaufbauten:

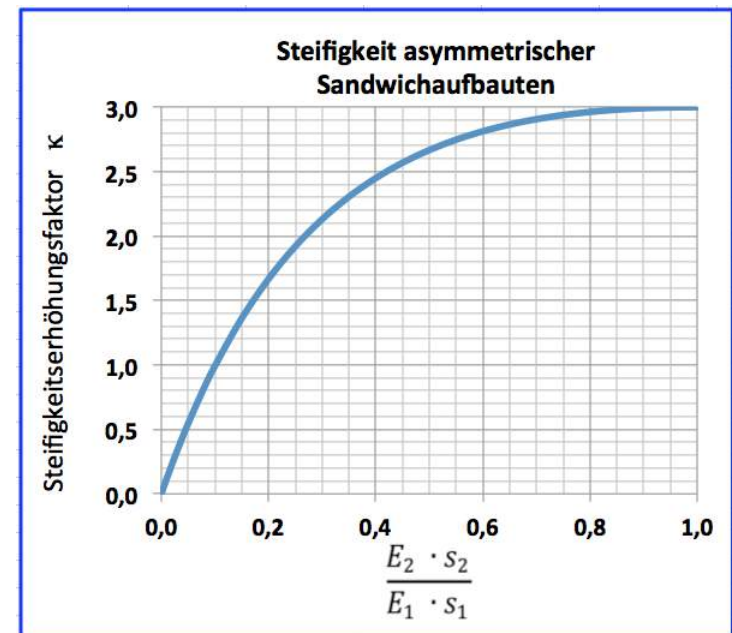
- Für den zuvor genannten Sandwichaufbau gilt:

$$\kappa = 3 \cdot \frac{4 \cdot \frac{45 \cdot 0,8}{73 \cdot 1,2}}{\left(1 + \frac{45 \cdot 0,8}{73 \cdot 1,2}\right)^2} = 2,477$$

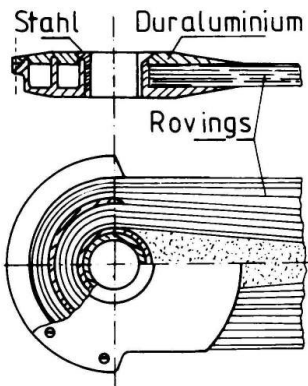
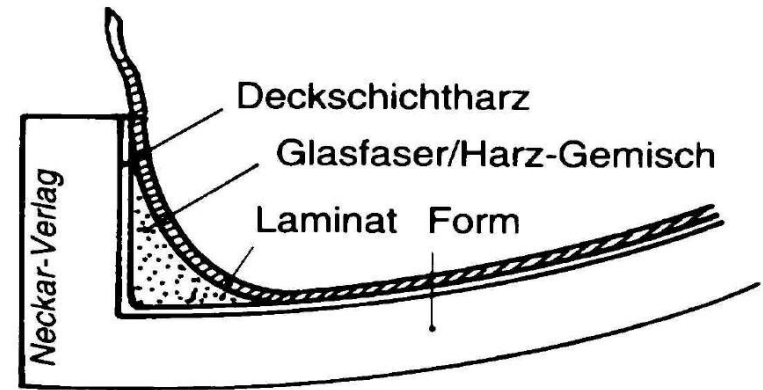
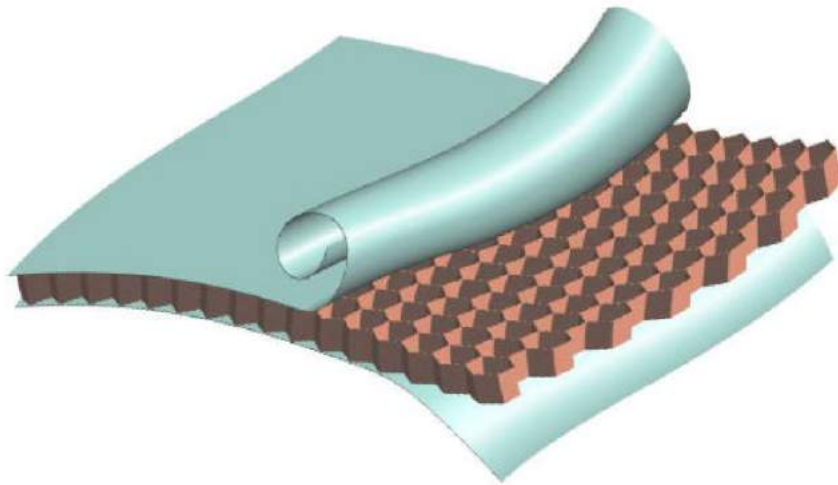
⇒ Trotz deutlicher Asymmetrie erreicht der vorliegende Sandwichaufbau immer noch einen relativ hohen Steifigkeitserhöhungsfaktor.

- Nebenstehende Darstellung zeigt, dass asymmetrische Sandwichaufbauten selbst, wenn die dünnere Deckschicht nur 1/10 der Steifigkeit der Dicken Deckschicht aufweist, immer noch einen  $\kappa$ -Faktor um 1 aufweist.

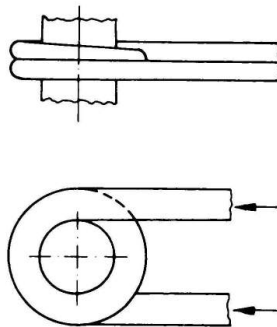
⇒ Somit wird verdeutlicht, dass auch asymmetrische Sandwichaufbauten sinnvoll einsetzbar sind.



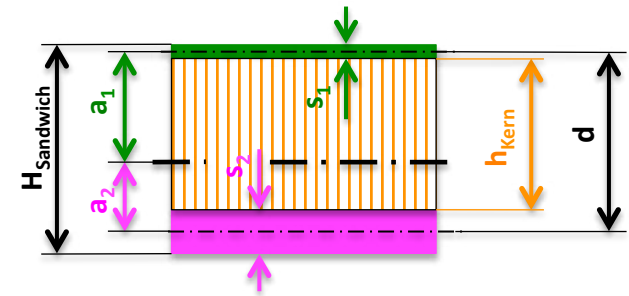
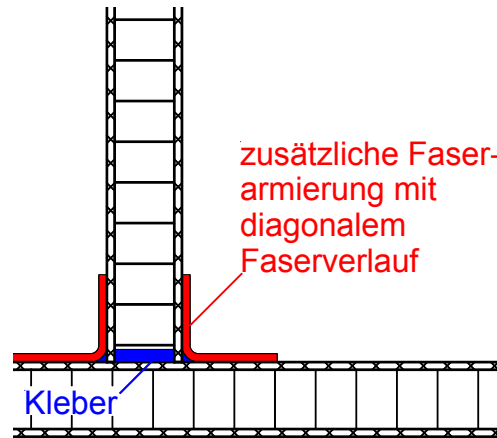
# Gestaltung von Faserverstärkten Kunststoffen



Zug-Druckschleife  
im 2 Kanal-Gesenk



"Sicherheitsnadel"



Prof. Dr.-Ing. Herbert Funke



# Gestaltung von Faserverstärkten Kunststoffen

**Die Gestaltung faserverstärkter Kunststoffteile erfordert umfangreiches fachspezifisches Know-How.**

## **Wichtigste Grundregel:**

Die Gestaltung von FVK-Bauteilen sollte insbesondere fasergerecht sein!

## **Eine fasergerechte Gestaltung bedeutet:**

- **Kraftflussgerechte Bauteilgestaltung:**

Die Faser können in der Struktur so angeordnet werden, dass der Fasererlauf in der Struktur dem Kraftflussverlauf im Bauteil entspricht.

- **Fertigungsgerechte Bauteilgestaltung:**

Die Bauteilkontur muss so gestaltet sein, dass in dem vorgesehenen Fertigungsverfahren eine einfache Ablage der Fasern und auch eine einfache Tränkung der Fasern mit Matrixwerkstoff möglich ist.

# Gestaltung von Faserverstärkten Kunststoffen

## Eine fasergerechte Gestaltung erfordert:

- **Fertigungs-Know-How:**

Der Konstrukteur muss neben der Bauteilkontur und dem Laminataufbau auch die einzelnen Schritte des Fertigungsverfahrens festlegen

⇒ **Das erfordert:**

Umfangreiche Kenntnisse zu den verfügbaren Fertigungsverfahren

- **Mechanisches Know-How:**

Der Konstrukteur muss die Fasern im Bauteil entsprechend dem Kraftfluss im Bauteil anordnen

⇒ **Das erfordert:**

Ein gutes mechanisches Grundverständnis und Konstruktionserfahrung

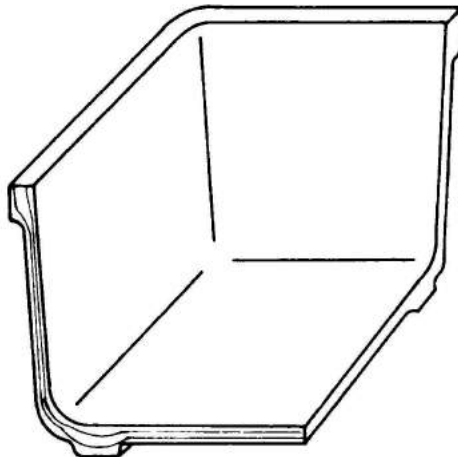
⇒ Allgemeine Gestaltungsregeln können helfen, ein entsprechendes Grundverständnis zu entwickeln

⇒ Jede neue Konstruktion muss individuell analysiert werden

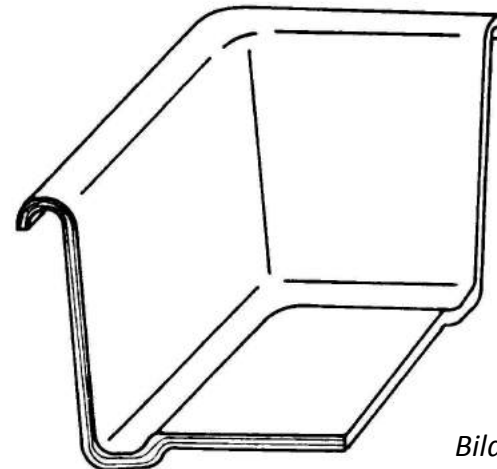
# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Wandstärken :

- Laminat sollten möglichst dünnwandig mit gleichmäßiger Wandstärke aufgebaut werden.
- Insbesondere sind starke Wanddickensprünge zu vermeiden
- Lokale Aufdickungen (z.B. für Krafteinleitungen) sollten in kleinen Wanddickensprüngen erfolgen
- Sind größere Wandstärken strukturell erforderlich, kann dieses durch Sandwichbauweise (ggf. auch partiell) realisiert werden.



Ungünstig !



Günstig !

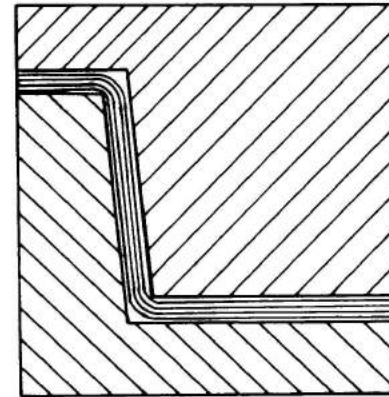
Bildquelle [R&G 99]



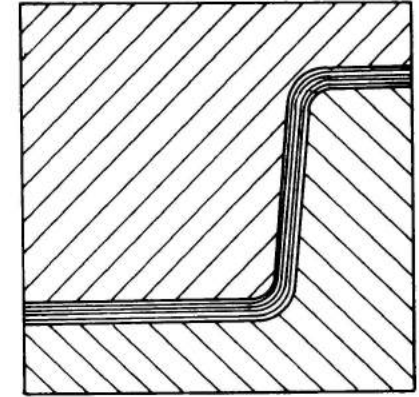
# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Gestalten von Ecken und Kanten :

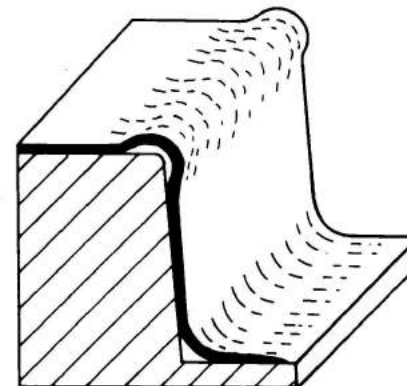
- Ecken und Kanten – wenn möglich – vermeiden!
- Radien so groß wie möglich!



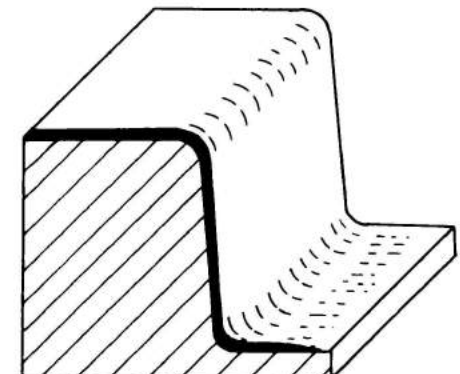
Ungünstig ! Zu kleine Radien



Besser : Ausreichende Radien



Ungünstig ! Zu kleine Radien



Besser : Ausreichende Radien

*Bildquelle [R&G 99]*

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

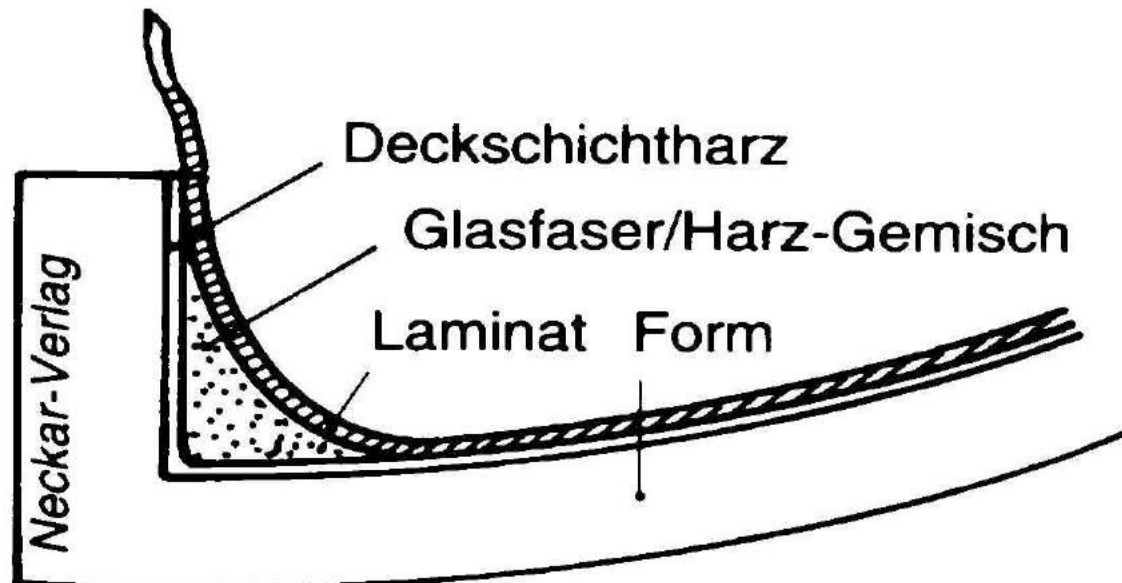
## Gestalten von Ecken und Kanten :

- Ecken und Kanten sind ungünstig, da die Fasern eine Umlenkung erfahren
- Faserumlenkungen sind ungünstig für den Kraftfluss
- Beim Laminieren in Ecken oder Kanten gedrückte Fasern können sich im Laufe der Aushärtung verschieben. Dadurch entstehen Lunker und Fehlstellen
- Falls Ecken oder Kanten unvermeidbar sind, muss das Laminat während der Aushärtung dort besonders gut verpresst werden (z.B. im Vakuumsackverfahren)
- Radien sollten so groß wie möglich ausgeführt werden, da dadurch die Faserumlenkung verringert und die Ablage des Fasermaterials vereinfacht wird.

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Gestalten von Ecken und Kanten :

- Ggf. können Kanten mit Füllstoffen gefüllt werden, um Gewebe dann im großen Radius durch die Kante laminieren zu können.  
(Diese Methode wird insbesondere im Handlaminierverfahren häufig angewendet)

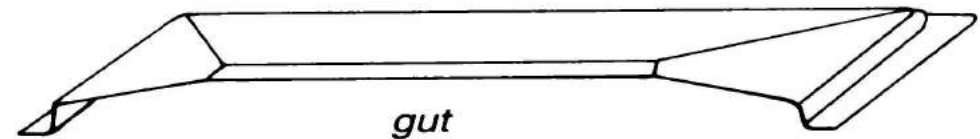


Bildquelle [R&G 99]

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Räumliche Gestaltung und Versteifungen:

- Großflächige Schalenstrukturen benötigen eine räumliche Versteifung, damit sie nicht beulen:
- Räumliche Konturierungen sind deutlich beulsteifer gegenüber ebenen Flächen
- Für fasergerechte Schalenstrukturen sind räumlich Konturen mit weichen Radien zu bevorzugen!

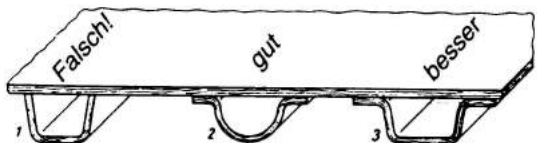
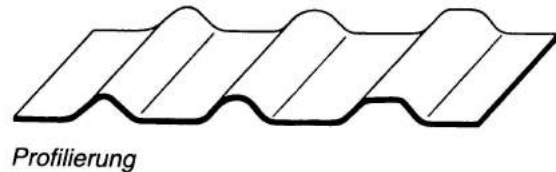
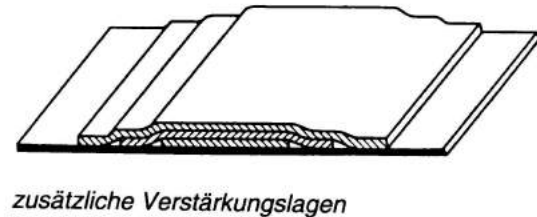
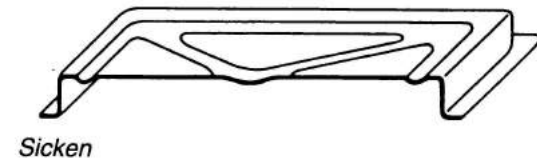


Bildquelle [R&G 99]

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Weitere Räumliche Versteifungsmöglichkeiten durch Sicken oder auflaminierte Profile:

- Nebenstehende Möglichkeiten werden gelegentlich praktiziert, sind aber mit Vorsicht zu genießen!
- Harzanhäufungen führen oft zu Schwindungsmarkierungen und damit zur Beeinträchtigung der Oberflächenqualität!



### aufgeklebte Profile

- 1) Falsch! Zu kleine Klebefläche, schlechte Verbindung
- 2) gute Verklebung
- 3) besser, größeres Widerstandsmoment



### auflaminierte Profile und verschiedene Werkstoffe als Kerne

- 1) Aluminium
- 2) Hartschaum oder Holz
- 3) Pappe oder halbiertes Kunststoffschlauch

Bildquelle [R&G 99]

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Versteifungen von Bauteilkanten:

- Am günstigsten für die Versteifung einer Bauteilkante ist es, die Kante im großen Radius „Aufzurollen“.



Glatte Abschlußkanten sind ungünstig,  
Wandungen neigen zum Durchbiegen



gut



gut



sehr gut

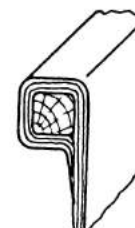


sehr gut



Vollkante, vorzugsweise für Preßmassen,  
Mattenlamine bzw. Rovings geeignet

Einbettungen zur Versteifung von Abschlußkanten.

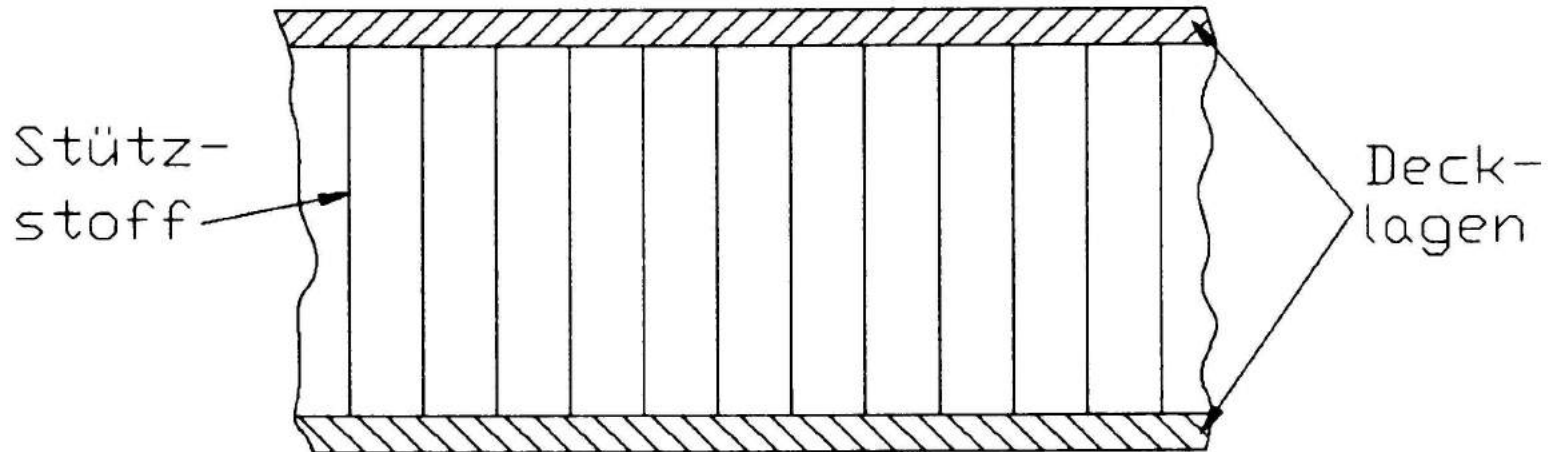


Bildquelle [R&G 99]

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Räumliche Versteifung durch Sandwichbauweise:

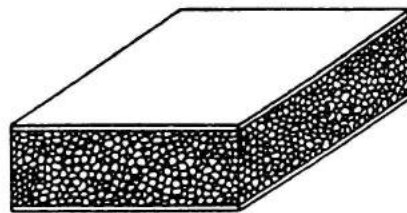
- Die beste und fasergerechteste räumliche Versteifung großer Schalenstrukturen erfolgt in Sandwichbauweise:



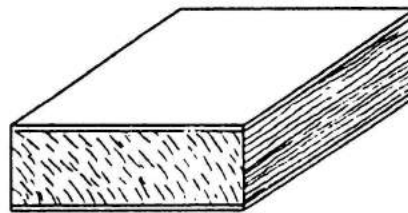
# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Räumliche Versteifung durch Sandwichbauweise:

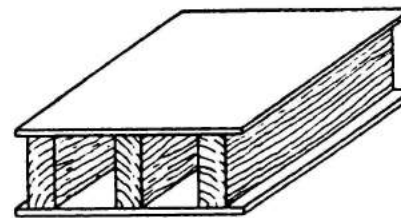
- Die Sandwichbauweise ist einer der effektivsten Bauweisen zur räumlichen Versteifung großflächiger FVK-Schalenstrukturen.
- Je nach Anforderungen und Kostenrahmen sind unterschiedliche Kernwerkstoffe verfügbar:



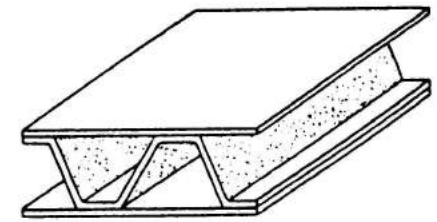
Schaumstoff



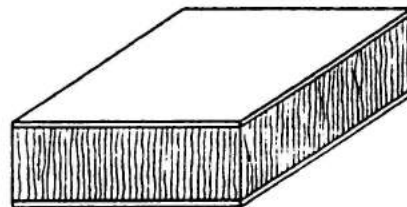
Balsa - Längsholz



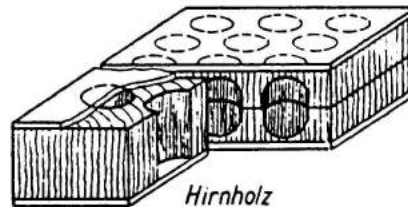
Balsa - Stege



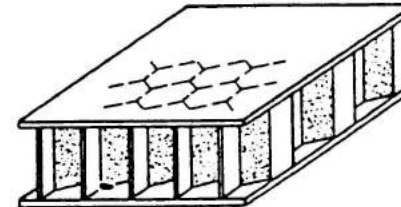
Wellblech



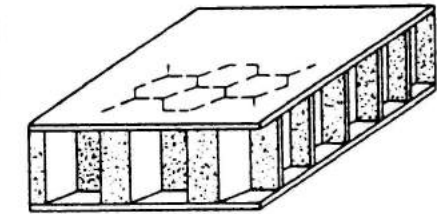
Balsa - Hirnholz



Hirnholz  
mit Erleichterungslöchern



Wabenkern - längs



Wabenkern - quer

Bildquelle: [Her 80]





# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Krafteinleitungen:

- Krafteinleitungen sind für Faserverbundstrukturen besonders kritisch:
- Der unmittelbare Kontakt zu krafteinleitenden Anschlusselementen erfolgt zumeist über die Matrix. Die Matrix hat aber nur eine geringe Festigkeit und Steifigkeit.
- Damit die Matrix nicht überlastet wird, sollten Krafteinleitungen möglichst großflächig erfolgen.

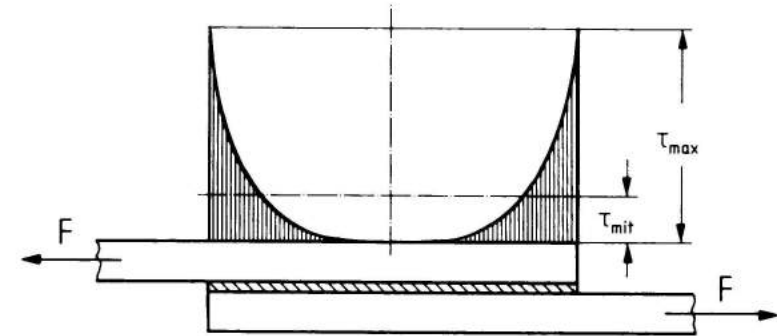
## Prinzipielle Möglichkeiten der Krafteinleitung sind:

- **Stoffschluss** (Kleben),  
⇒ für FVK günstig, erfordert aber große Querschnitte
- **Kraftschluss** (Schraubverbindung)  
⇒ Für FVK ungeeignet, da die Schraubenvorspannung quer zur Faser auf die weiche Matrix wirkt; Schraubenvorspannung geht rasch verloren
- **Formschluss** (Bolzenverbindung, Schlaufenanschluss).  
⇒ Besonders für hochbelastete Krafteinleitungen zu empfehlen, wenn es gelingt, das krafteinleitende Element mit Fasern zu „umwickeln“.

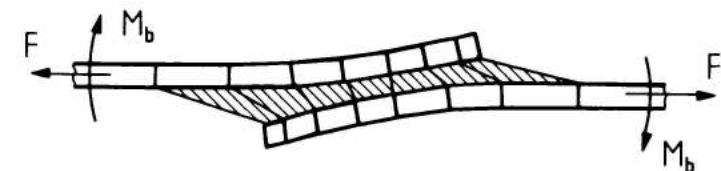
# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Kleben von FVK-Verbindungen (Stoffschluss):

- Die Kraftübertragung erfolgt über die relativ dünne aber möglichst großflächige Klebeschicht von einem Bauteil auf das andere.
- Die dünne Klebeschicht muss evtl. vorhandene unterschiedliche Dehnungen der beiden verklebten Bauteilhälften durch Schubverformung ausgleichen. (Klebeschicht sollte möglichst zäh sein!)
- Im Bereich der Klebeschicht ist (bei ungeschäfteter Verbindung) das Bauteil doppelt so dick (und damit doppelt so steif) ⇒ Steifigkeitssprung am Kleberand
- Damit die Matrix nicht überlastet wird, sollten Krafteinleitungen möglichst großflächig erfolgen.



a) unter reiner Schubbeanspruchung



b) mit zusätzlicher überlagerter Biegebelastung

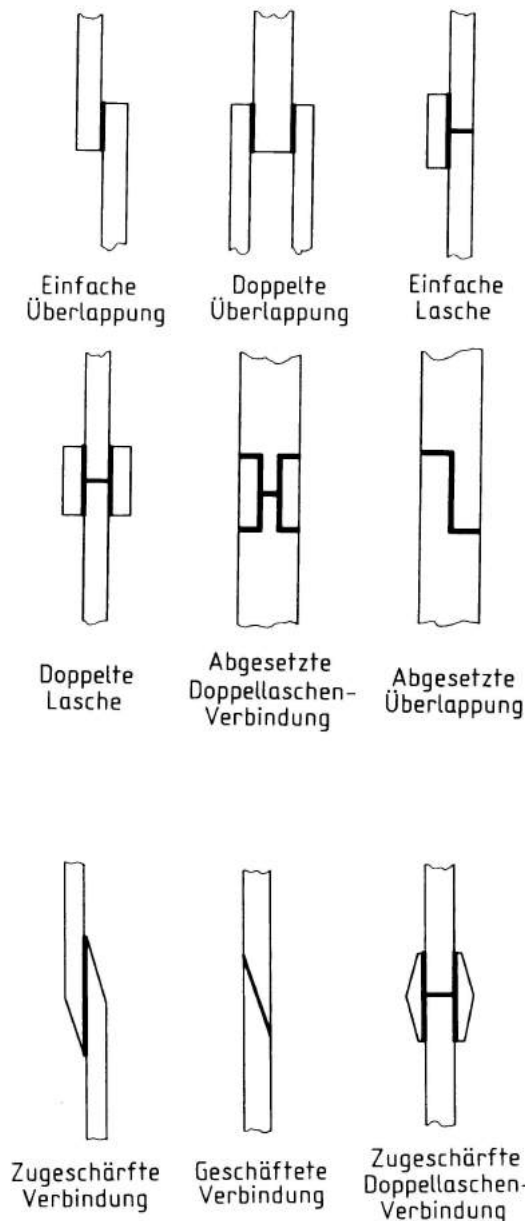
Bildquelle: [Mic 89]

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Kleben von FVK-Verbindungen (Stoffschluss):

- Doppelte Überlappungen übertragen den Kraftfluss symmetrisch
- Durch Schäftung (Konische Zuspitzung der Bauteile zum Kleberand hin) erfolgt eine allmähliche Kraftübertragung von einem Bauteil auf das andere.
- Spannungüberhöhungen am Rand der Klebefuge können minimiert werden

Bildquelle: [Mic 89]





# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

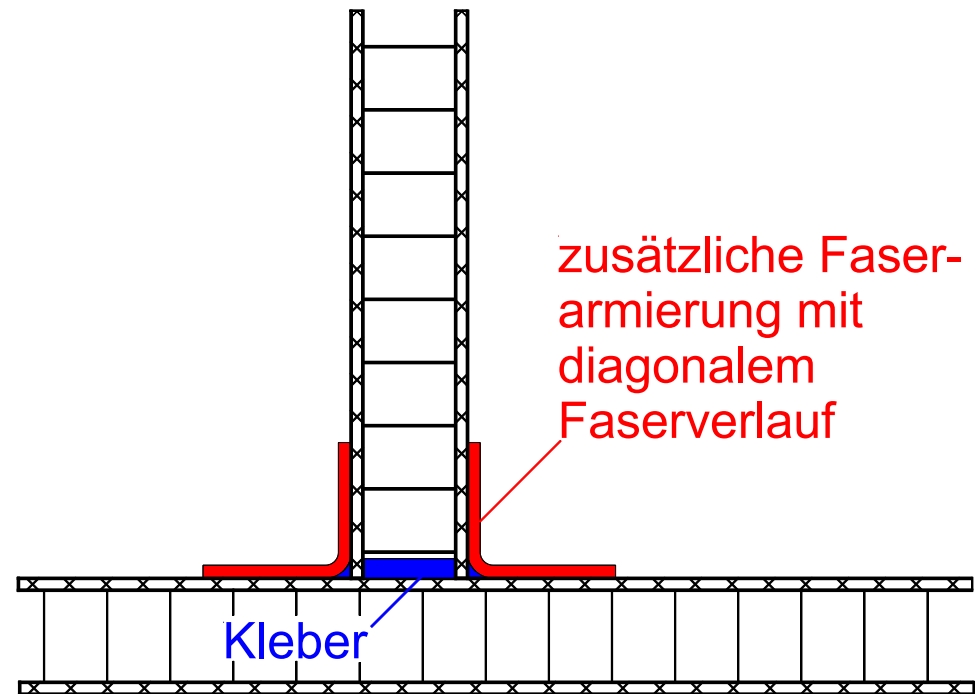
## Hinweise zu Verklebungen von FVK:

- Die meisten Laminierharze (Epoxidharze) sind hervorragende Klebstoffe.
- Laminierharze können mit Füllstoffen angedickt werden, wenn Spaltverklebungen erreicht werden sollen.
- Füllstoffe mit Faserstruktur wie Kurzglasfasern oder Baumwollflocken können die Zugfestigkeit des Klebstoffes deutlich erhöhen.
- Für Klebeverbindungen zu metallischen Werkstoffen gibt es spezielle Haftvermittler, die dem Klebeharz beigemischt werden.
- Lamine mit Epoxidharzen sind sehr glatt. Daher lassen sich auf ausgehärteten Epoxidharzen nur sehr schlechte Klebeverbindungen erzielen. Deshalb müssen Lamine mit Epoxidharzen vor dem Verkleben mit grobem Korn bis auf die Fasern angeschliffen werden. Bei der Dimensionierung ist hier zu berücksichtigen, dass einzelne Laminatschichten durch das Anschleifen geschwächt werden.
- Vor dem Verkleben müssen die Oberflächen gründlich entfettet und von Staub gereinigt werden!

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Hinweise zu Verklebungen von FVK:

- Mit Abreißgeweben kann auch bei Epoxidharzlaminate eine raue Oberfläche geschaffen werden, die unmittelbar nach dem Entfernen des Abreißgewebes verklebt werden kann.
- Hochbelastbare Verklebungen können durch eine nachträgliche Armierung mit einem zusätzlichen Faserlaminat erzielt werden.
- Bei Sandwichkonstruktionen verläuft der Kraftfluß immer über die Deckschichten.



*Armierung hochbelastbarer Verklebungen  
durch zusätzliche Faserlaminat*



# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Kraftschlüssige Verbindungen:

- Kraftschlüssige Verbindungen sind für Faserverbundkunststoffe weniger geeignet, da der Kraftschluss immer quer zur Faser und damit über die Matrix erfolgt.
- Der geringe E-Modul der Matrix und insbesondere die Kriechneigung des Kunststoffes gestatten es nicht, eine hohe Vorspannung über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten.
- Kraftschlüssige Verbindungen von Faserverbundbauteilen werden daher allenfalls bei gering belasteten Fügeverbindungen und dort gewählt, wo keine Sicherheitsanforderungen an das zu befestigende Bauteil gestellt werden (z.B.: Verkleidungsteile).
- Für Schraubverbindungen an FVK-Bauteilen gibt es z.B. spezielle Unterlegscheiben mit großer Auflagefläche, die eine großflächige Krafteinleitung ermöglichen.



# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Formschlüssige Verbindungen:

- Ermöglichen bei richtiger Gestaltung eine direkte Einleitung der Kräfte von den Anschlusselementen in die Fasern
- Sind für hochbelastete Verbindungen zu bevorzugen

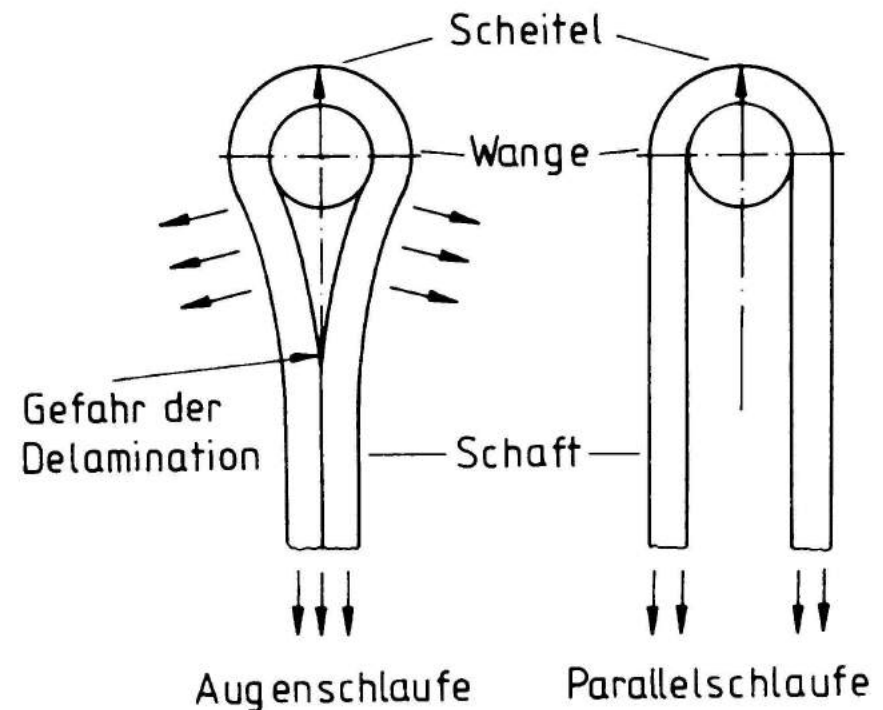
## Mögliche Ausführungsformen:

- Schlaufenanschluss
- Bolzen- oder Nietverbindungen

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Schlaufenanschluss ( Formschluss):

- Schlaufenverbindungen sind besonders fasergerecht, da ein Kraftübertragungselement (Bolzen, Kausche o.ä.) unmittelbar von den Fasern umwickelt wird.
- Parallelschlaufen können höhere Kräfte übertragen als Augenschlaufen, da bei diesen durch eine Schälbeanspruchung die Gefahr der Delamination provoziert wird.
- Augenschlaufen können, wenn sie durch eine zusätzliche Quenumwicklung gegen Aufspleißen gesichert werden, besser Druckkräfte aufnehmen.



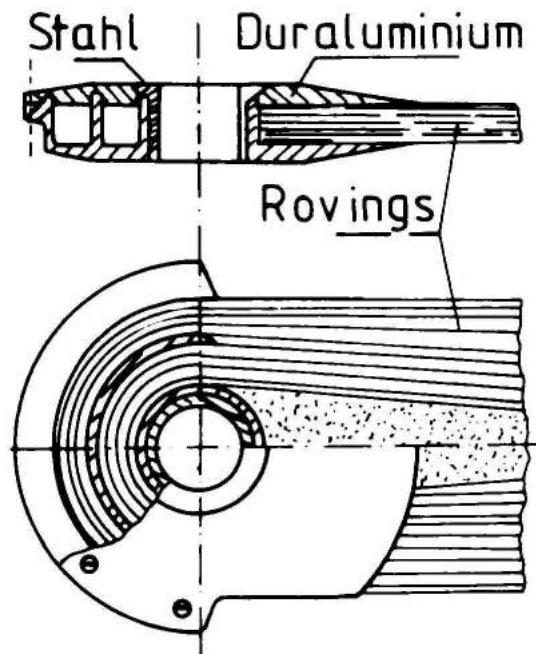


# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

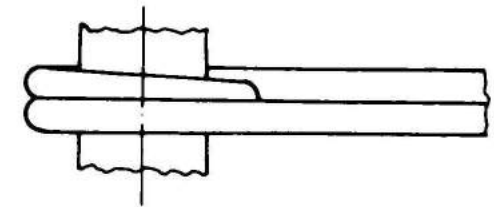
## Schlaufenanschluss (Formschluss):

### Besondere Schlaufenformen:

- Sehr hoch belastbar
- Für Zug- und Druckbeanspruchung geeignet
- Aufwändig in der Herstellung



Zug-Druckschleife  
im 2 Kanal-Gesenk



„Sicherheitsnadel“

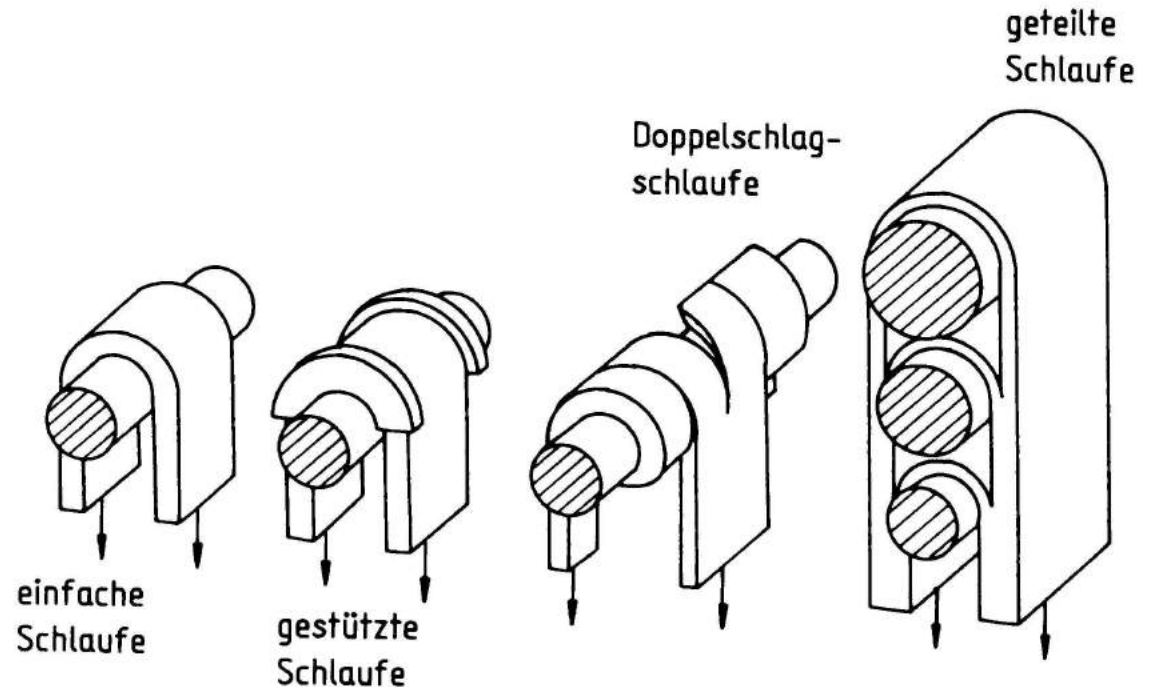
Bildquelle: [Mic 89]

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Schlaufenanschluss ( Formschluss):

### Besondere Schlaufenformen:

- Sehr hoch belastbar
- Für Zug- und Druckbeanspruchung geeignet
- Aufwändig in der Herstellung



Bildquelle: [Mic 89]



# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

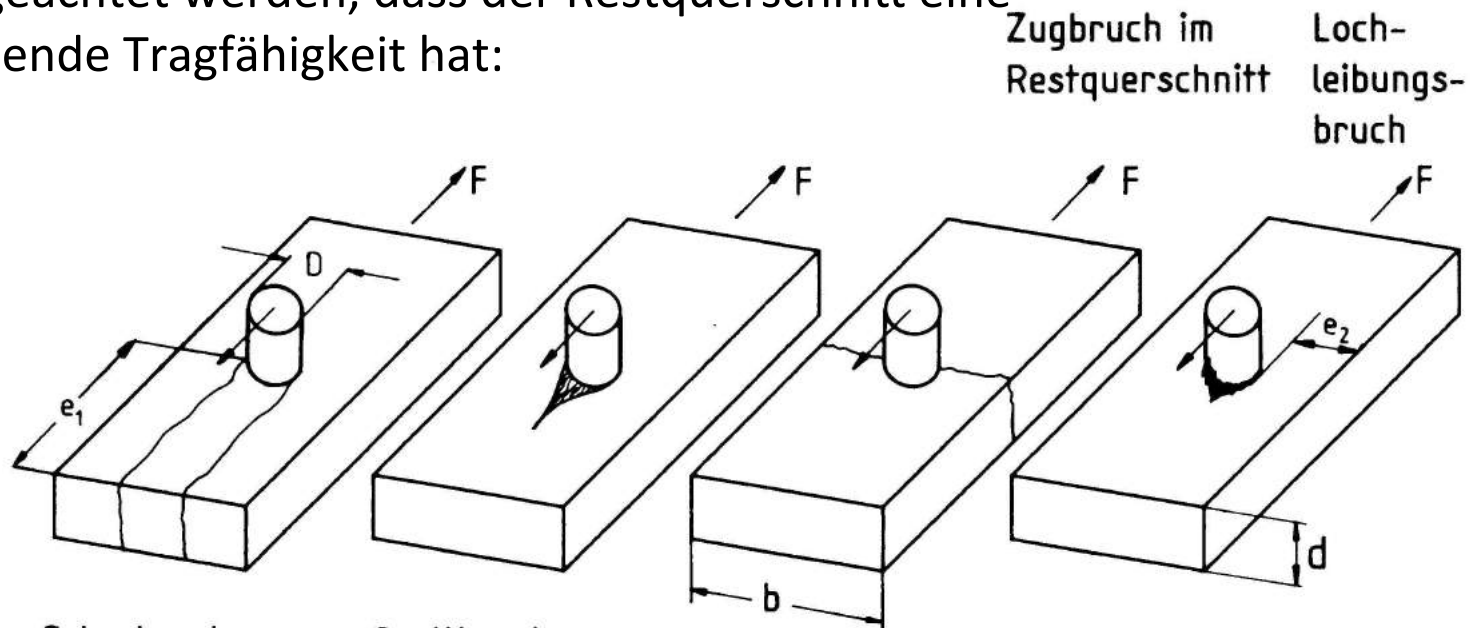
## Bolzen- und Nietverbindungen ( Formschluss):

- Die Krafteinleitung erfolgt durch Pressung des Bolzen oder Nietes auf die Faser.
- Nur die in Belastungsrichtung laufenden Fasern können hier Belastungen in nennenswertem Maße aufnehmen.
- Lamine für Bolzen- oder Nietverbindungen sollten möglichst quasiisotrop aufgebaut sein.
- Besondere Aufmerksamkeit ist dem Bohren der Lamine zu widmen: Eine Vorschädigung durch Delamination im Randbereich der Bohrung ist häufig Ausgangspunkt einer späteren Versagensstelle.
- Eine Schädigung des Laminates ist zudem durch Feuchtigkeit möglich, die durch die offene Stirnfläche des angebohrten Laminates eindringen kann.
- Für höher belastete Bolzenverbindungen sollten die Bohrungen „ausgebücht“ werden.

# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Bolzen- und Nietverbindungen (Formschluss):

Bei der Laminatdimensionierung muss insbesondere darauf geachtet werden, dass der Restquerschnitt eine hinreichende Tragfähigkeit hat:



Scherbruch  
Abhilfen:  
 $e/D > 2 \dots 3$

Spaltbruch  
 $D$  größer

$(b-D)$  größer

$D$  größer

Bildquelle: [Mic 89]

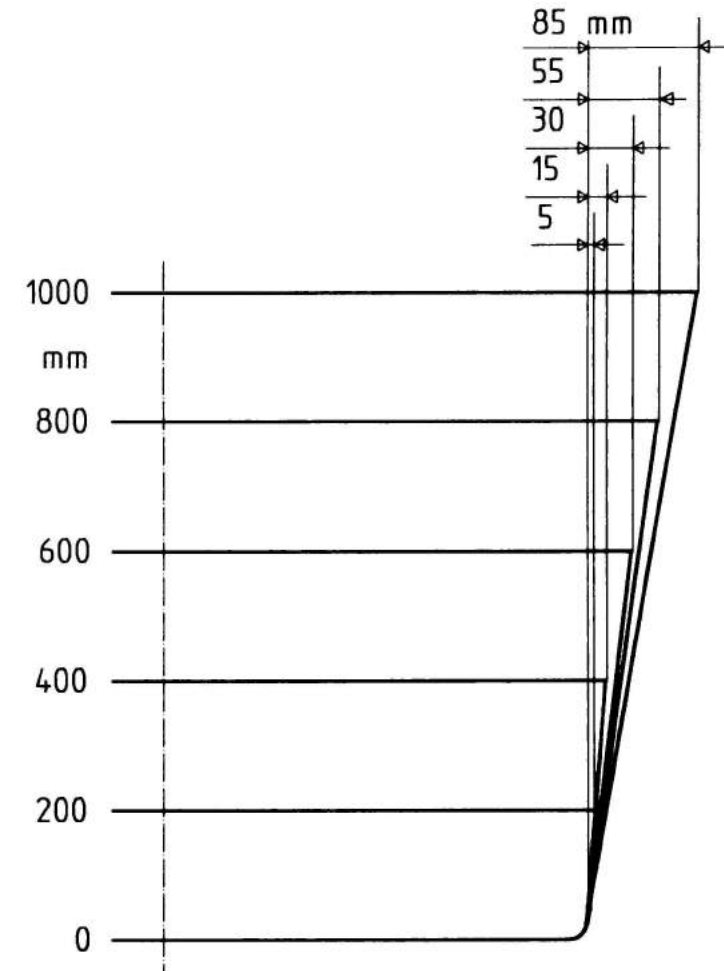
# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Entformbarkeit:

Faserverbundbauteile werden in Formen hergestellt

Nach Verfestigung der Matrix müssen die Bauteile entformt werden können. Dazu sind folgende besonderen Regeln zu beachten:

- Formen müssen über hinreichend Formschräge verfügen
- Hinterschnitte sind zu vermeiden
- Ggf. können zusätzliche Formteilungen Konturen mit Hinterschnitt ermöglichen
- Bei elastischen Formmaterialien (z.B. Silikon) sind auch Bauteile mit Hinterschnitt realisierbar



Bildquelle: [R&G 99]

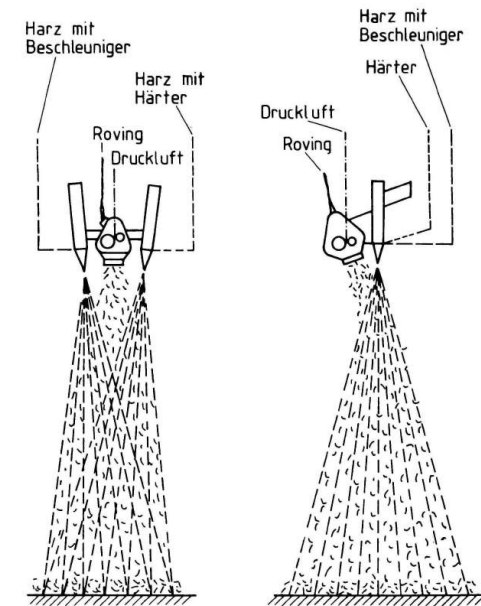
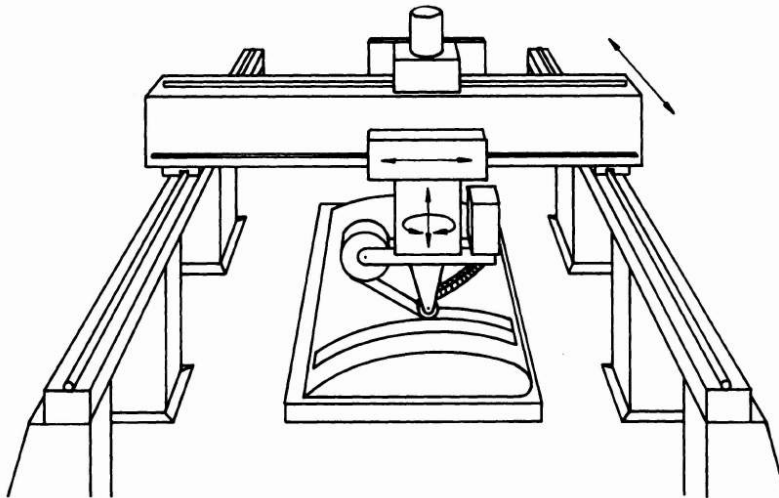
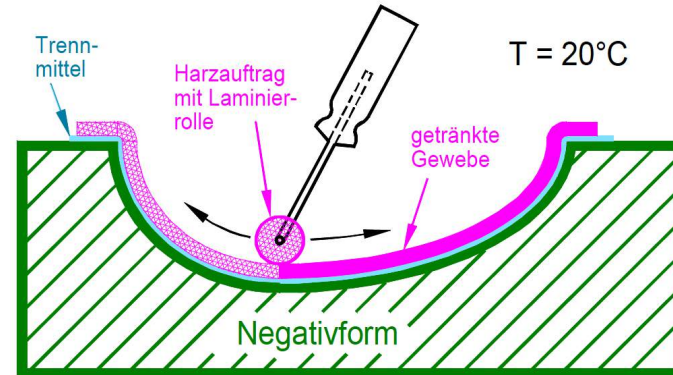
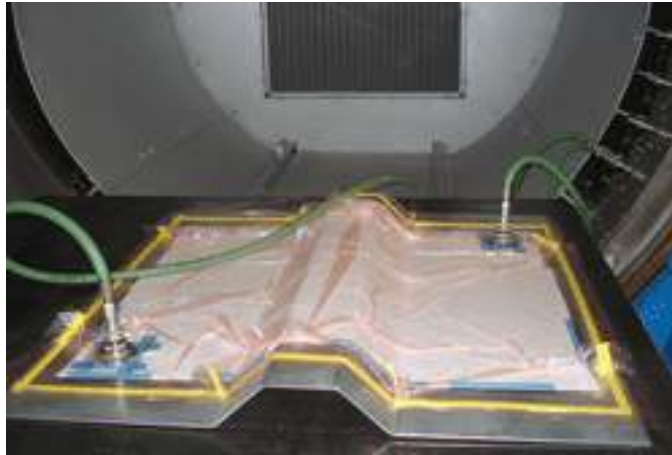


# Allgemeine Gestaltungsregeln für FVK

## Zusammenfassung:

- Die korrekte Gestaltung von Faserverbundbauteilen erfordert umfassendes Know-How und Erfahrung
- **Hauptkriterium ist eine fasergerechte Bauteilgestaltung**
- Zusätzlich muss die **Bauteilgestaltung auf das vorgesehene Herstellverfahren abgestimmt** werden.
- Besonderes Augenmerk ist auf die **kraftflussgerechte Bauteilgestaltung** und die Krafteinleitungen zu legen
- **Krafteinleitungen** sind die **kritischen Punkte** der meisten FVK-Bauteile

# Herstellung von Bauteilen aus FaserVerstärkten Kunststoffen





# Herstellverfahren

## von Bauteilen aus FaserVerstärkten Kunststoffen

- sind Formgebungsverfahren
- Sie beinhalten stets mindestens folgende Verfahrensschritte:
  - Ablage der Fasern,
  - Benetzung der Fasern mit Matrixwerkstoff,
  - Formgebung des Werkstoffverbundes,
  - Verfestigung der Matrix  
(Aushärtung bei duroplastischer, Abkühlung bei thermoplastischer Matrix).
- Die Fertigungsverfahren beeinflussen entscheidend die Werkstoffeigenschaften des Werkstoffverbundes.
- Entscheidende Kriterien bei der Herstellung sind dabei:
  - Einzelkennwerte von Faser und Matrix,
  - Faserorientierung im Bauteil,
  - Faservolumengehalt ( $\varphi_{\text{Faser}}$ ),
  - Porigkeit des Verbundwerkstoffes,





# Herstellverfahren von Bauteilen aus FaserVerstärkten Kunststoffen

Unterscheidungskriterien der verschiedenen Herstellverfahren:

- **Offene Verfahren:**
  - Als offene Verfahren bezeichnet man die Herstellverfahren, bei denen die Umgebung (und damit auch die Verarbeiter) mit dem Harzsystem des Verbundwerkstoffes direkten Kontakt haben oder einer Lösemittel bzw. Geruchsbelastung unmittelbar ausgesetzt sind.
  - Offene Verfahren sind aus arbeitsschutzrechtlichen Gründen besonders kritisch und erfordern besondere Schutzmaßnahmen.
  - Besondere Auflagen der Berufsgenossenschaften sind zu berücksichtigen.
- **Geschlossene Verfahren**
  - Bei den geschlossenen Verfahren kommen Verarbeiter nicht unmittelbar mit der flüssigen Kunststoffmatrix in Kontakt. Die entsprechenden Lösungsmittel und Geruchsbelästigungen sind um ein Vielfaches geringer als bei den offenen Verfahren.
  - Werden in einem kunststoffverarbeitenden Betrieb ausschließlich geschlossene Verfahren eingesetzt, so sind unter Umständen wesentlich geringere Auflagen hinsichtlich Arbeitsschutz und Umwelt zu erfüllen.
  - In manchen EU-Ländern sind für bestimmte Industriebereiche nur noch geschlossene Verarbeitungsverfahren zugelassen.



# Herstellverfahren von Bauteilen aus FaserVerstärkten Kunststoffen

## Beispiele für **Offene Verfahren**:

Offene Verfahren mit besonders hoher Lösungsmittel- bzw. Geruchsbelastung sind:

- Handlaminierverfahren
  - Beim Handlaminierverfahren werden Fasermaterialien von Hand in die Form gelegt und manuell mit Laminierwerkzeugen (Rolle, Pinsel) mit Harz getränkt.
- Faserspritzverfahren
  - Beim Faserspritzverfahren werden Fasern in einem Hächselwerk auf eine kurze Länge (wenige mm bis ca. 5 cm) geschnitten und gemeinsam mit dem Harz in einer Spritzpistole ähnlich einem Lackierprozess in die Form gespritzt.

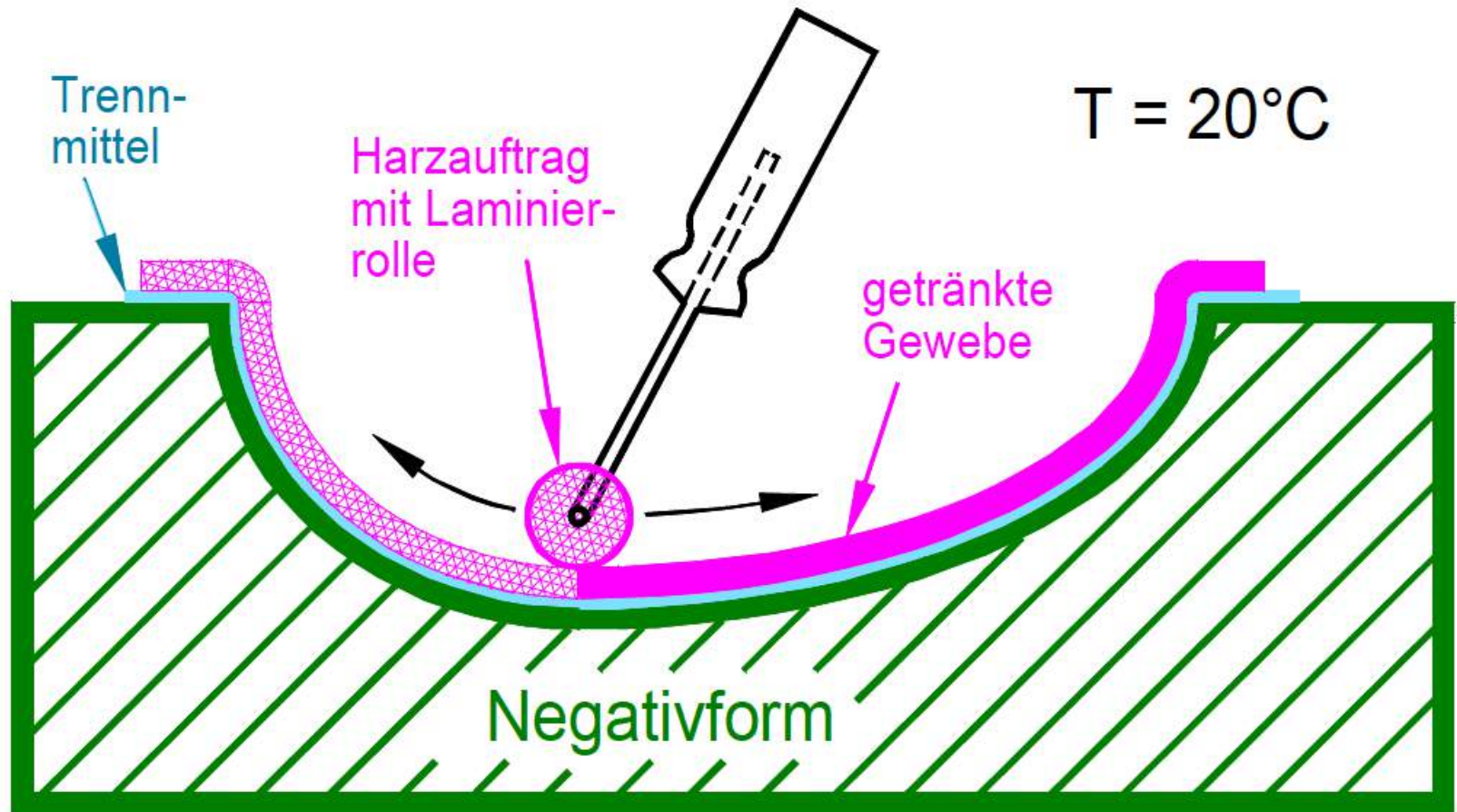


# Herstellverfahren von Bauteilen aus FaserVerstärkten Kunststoffen

## Beispiele für **Geschlossene Verfahren**:

- Pressverfahren in geschlossenen Formen (Form und Gegenform)
  - Bei Pressverfahren bildet der Hohlraum zwischen Werkzeug und Gegenform die Kavität, deren Volumen komplett mit Werkstoff zu füllen ist.
  - Bei hohen Drücken werden die Lamine dabei verpresst.
- Vakuumgestützte Infusionsverfahren
  - Beim Vakuumgestützten Infusionsverfahren werden die Faserhalbzeuge für den vollständigen Laminataufbau „trocken“ (ohne Harzzugabe) in die Form gebracht.
  - Ein Vakuumaufbau vervollständigt den Aufbau.
  - Das niedrig viskose Harz wird vom Unterdruck in den Laminataufbau gesogen und tränkt auf diese Weise den Laminataufbau.

## Herstellverfahren für FVK-Bauteile



### Handlaminierverfahren

## Handlaminierverfahren

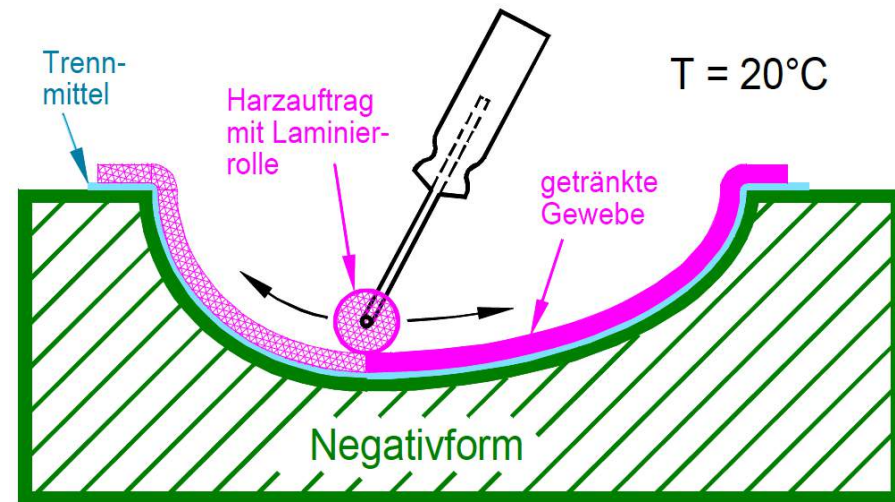
- Fasermaterialien werden von Hand in die Formen gelegt und mit Handwerkzeugen (Laminierrolle oder Pinsel) mit Kunstharz getränkt.
- Vorzugsweise werden Polyester- oder Epoxidharze verwendet

### Vorteile:

- Einfach und universell einsetzbar
- Erfordert nur geringe Investitionen
- Komplexe Geometrien sind herstellbar

### Nachteile:

- Geringe Produktivität (hoher Arbeitsaufwand pro Stück)
  - Manuelle Handarbeit bedingt zudem hohe Qualitätsschwankungen
- ⇒ Für Großserien ungeeignet



# Handlaminierverfahren

## Faserhalbzeuge im Handlaminierverfahren:

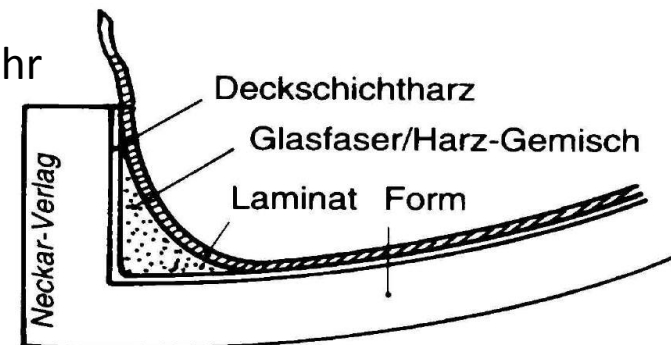
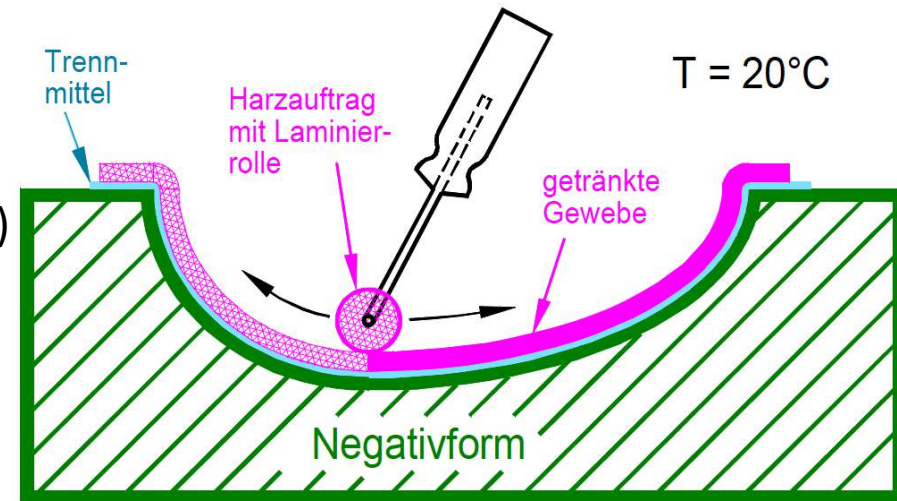
- Matten, Vliese (in Verbindung mit Polyesterharzen)
- Gewebe, Gelege
- Rovings (vereinzelt, zur Kantenverstärkung)

## Harzsysteme im Handlaminierverfahren:

- Polyesterharze (UP-Harze)
- Vinylesterharze
- Epoxidharze

## Zusätzliche Hilfsstoffe im Handlaminierverfahren:

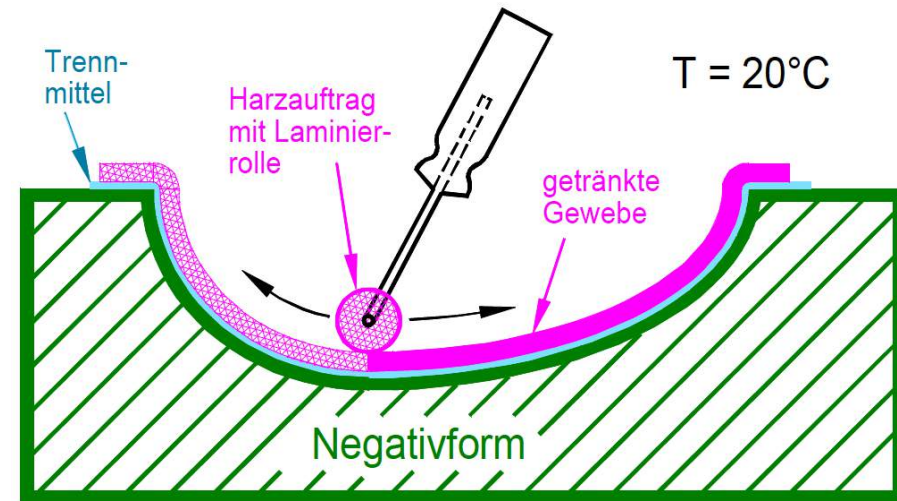
- Harzsysteme für das Handlaminierverfahren müssen sehr dünnflüssig sein, damit die Fasermaterialien gut durchtränkt werden können.
- Zusätzliche Füllstoffen können den Harzen zugesetzt werden, um z.B. im Kantenbereich dickflüssige Pasten oder Kleber herzustellen



# Handlaminierverfahren

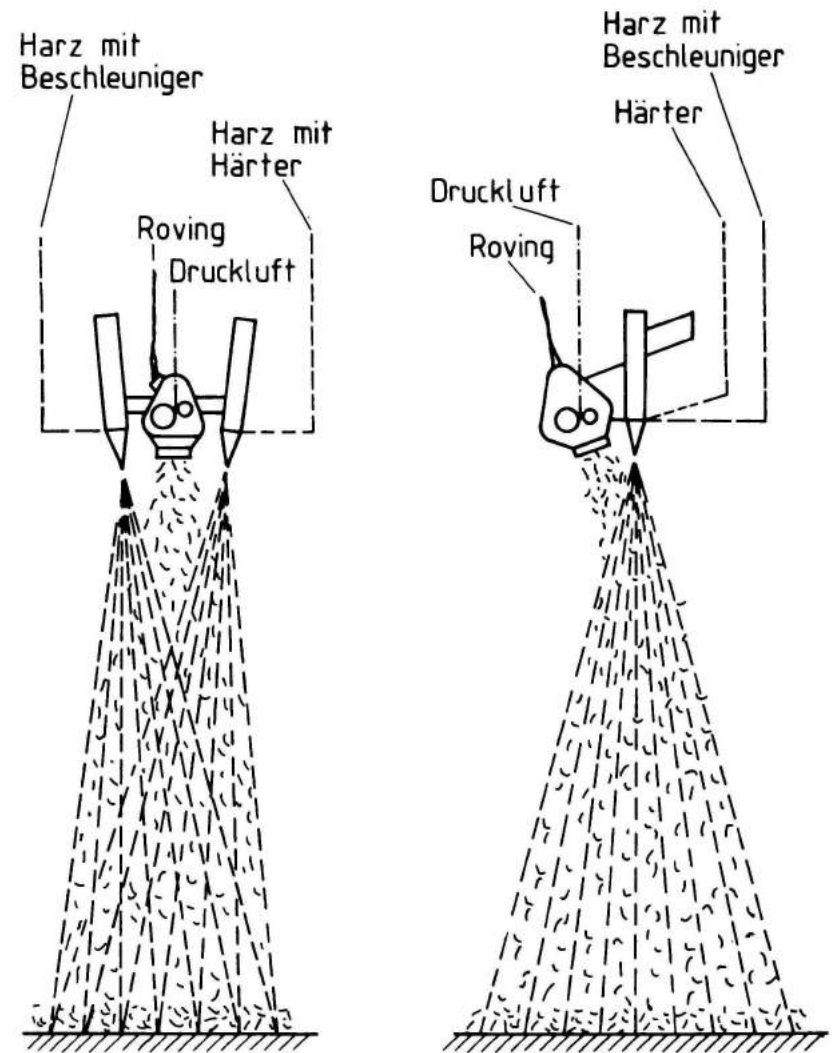
## Investitionsbedarf beim Handlaminierverfahren:

- Negativform
  - Harz / Härter
  - Faserhalbzeuge
  - Handlaminierwerkzeuge:
    - Pinsel
    - Laminierrollen
    - Mischbecher, Rührstäbe
    - Waage zum Auswiegen der Harz-Härter-Komponenten
  - Die wesentliche Investition beim Handlaminierverfahren ist die Negativform.
  - Die weiteren Investitionen betreffen Arbeitsschutzmaßnahmen (z.B. Luftabsaugung) sowie Verbrauchsmaterialien, die allerdings z.T. nur einmalig benutzt werden können und somit den Stückkosten zugerechnet werden müssen.
- ⇒ Das Handlaminierverfahren ist für Einzelstücke und Prototypen ideal, für größere Stückzahlen aber unwirtschaftlich.



## Faserspritzen

- Beim Faserspritzen werden kurzgeschnittene Fasern zusammen mit dem Laminierharz in die Form gespritzt.
- Es werden fast ausschließlich Polyesterharze als Matrix eingesetzt.
- Es ergeben sich relativ harzreiche, kurzfaserverstärkte Lamine mit einem Faservolumenanteil zwischen 25% und 30% (ähnlich zu Mattenlaminaten mit Polyesterharz).
- Der Prozess kann mit entsprechenden Robotern (ähnlich zu Lackierrobotern) teilautomatisiert werden.
- Haupteinsatzbereiche sind sanitäre Einrichtungen sowie Innenverkleidungen und Sekundärstrukturen im Fahrzeugbau.



Bildquelle: Michaeli-Wegener





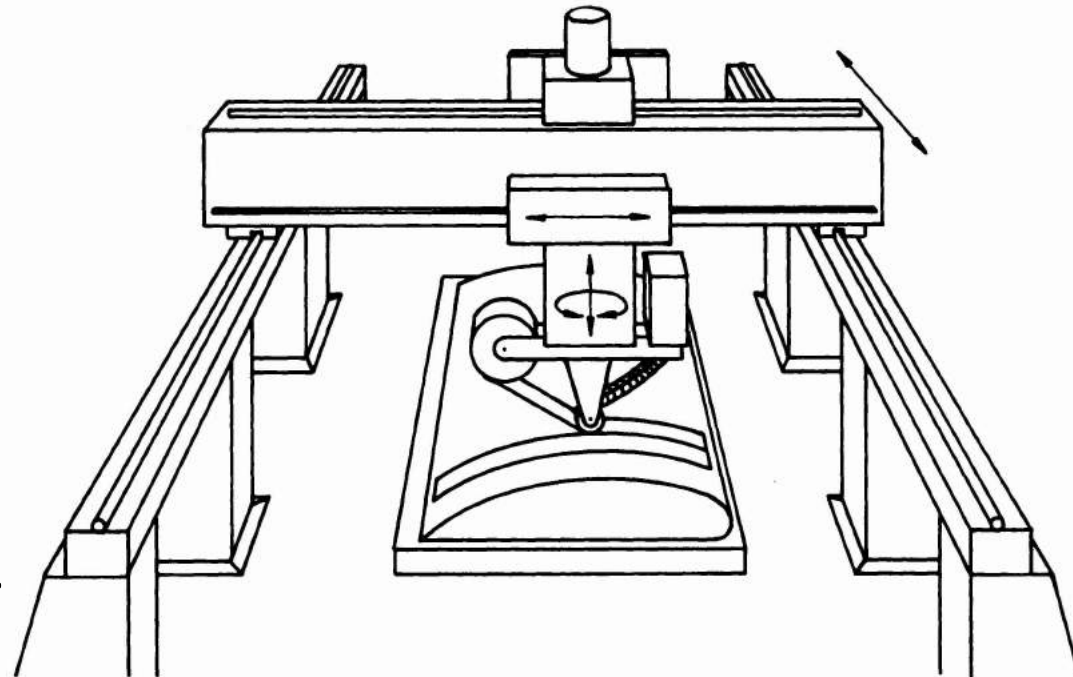
## Prepreg-Verarbeitung

- Prepregs (**preimpregnated** = vorgetränkt) sind maschinell vorgetränkte Faserhalbzeuge
- Durch die maschinelle Vortränkung wird die Produktivität gesteigert und die Qualität (Gleichmäßigkeit der Tränkung) verbessert.
- Als Prepreg-Matrixsysteme werden bevorzugt speziell eingestellte Epoxidharzsysteme verwendet.
- Das Harzsystem ist bereits vor der Tränkung zu einer reaktionsfähigen Harz-Härtermischung vermischt worden.
- Unmittelbar nach der maschinellen Tränkung der Faserhalbzeuge wird die Vernetzung (Härtung) des Matrixsystem so weit fortgesetzt, dass das Harz nicht mehr aus dem Faserhalbzeug heraustropfen kann.
- Anschließend muss die Härtung durch Reduzierung der Temperatur soweit gestoppt werden, dass die Prepregs bei entsprechend kühler Lagerung über mehrere Monate haltbar sind.
- Prepregs werden als Rollenware geliefert. Während des Transports und bei der Lagerung muss eine hinreichende Kühlung gewährleistet sein.

## Prepreg-Tapelegen mit Portalroboter

### Automatisierung bei der Prepregverarbeitung:

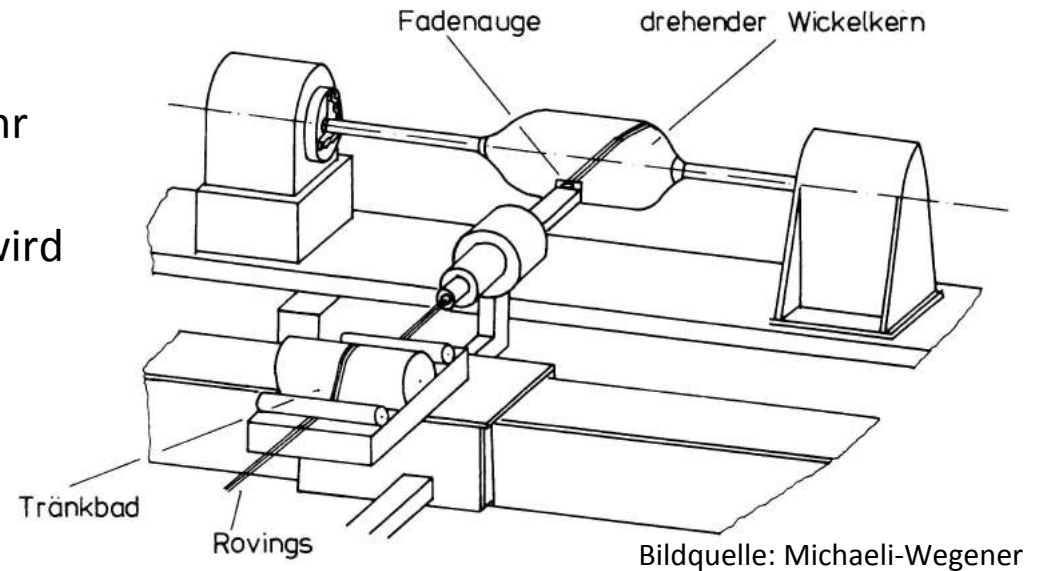
- Bei mäßiger Komplexität der Bauteilgeometrie können Prepregs als Bänder mit einem Portalroboter abgelegt werden.
- Dieses ermöglicht eine Teilautomatisierung des Produktionsprozesses.
- Hauptvorteil ist neben der Rationalisierung die Verbesserung der Qualitätssicherung.
- Das Prepreg-Tapelegen mit Portalrobotern wird hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt zur Herstellung großflächiger Schalenstrukturen eingesetzt.



Bildquelle: Michaeli-Wegener

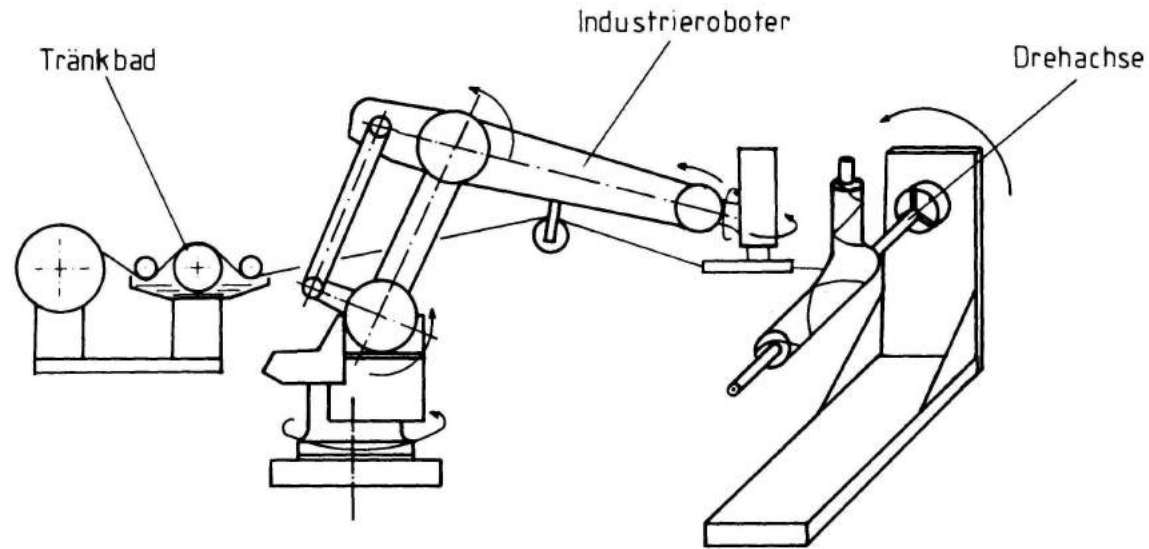
## Wickelverfahren

- Im Wickelverfahren können rotationssymmetrische Bauteile sehr effizient hergestellt werden.
- Beim „Drehbankwickelverfahren“ wird der Kern aufgespannt und rotiert.
- Fäden werden in einem Tränkungsbad mit Matrixwerkstoff getränkt und über das CNC-gesteuerte Fadenauge auf dem rotierenden Kern abgelegt.
- Damit der Faden nicht seitlich abrutscht, darf die Fadenablage nur um kleine Winkel von der geodätischen Linie abweichen.
- Durch die Art der Fadenablage kann bei der Herstellung eine gleichmäßige Fadenvorspannung erzielt werden, was eine hohe Faserauslastung im Bauteil ermöglicht.
- Wickelverfahren werden vorzugsweise im Behälterbau eingesetzt. (z.B. Druckluftspeicherbehälter von Druckluftbremsanlagen)



## Robotergestützte Wickelfverfahren

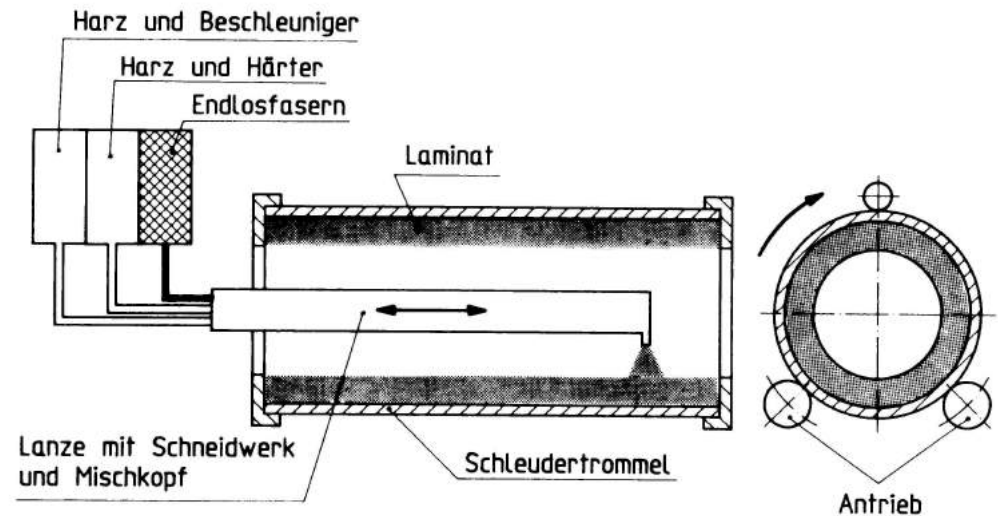
- Eine höhere Bauteilkomplexität als beim Drehbankwickelverfahren kann erreicht werden, wenn das Fadenauge über Industrieroboter geführt wird.
- Es werden entweder dünnwandige Kerne eingesetzt, die als „Inliner“ im Bauteil verbleiben oder auswaschbare bzw. auflösbare Kerne, die nach dem Aushärten der Matrix entfernt werden können.
- Ein Nachteil von allen Wickelverfahren ist die raue Außenseite (ähnlich Laminatrückseite).
- Gewickelte Bauteile sind hochbelastbare Bauteile, die nur bei bestimmten Bauteilgeometrien hergestellt werden können und aufgrund Ihrer rauhen Oberflächenqualität nur als „Nicht-Sichtbauteile“ einsetzbar sind.



Bildquelle: Michaeli-Wegener

## Schleuderverfahren

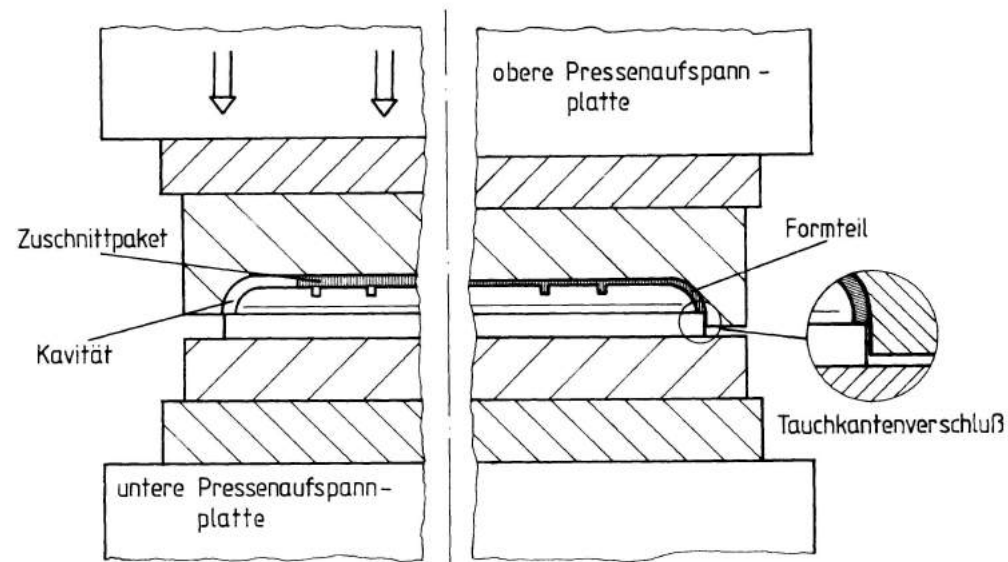
- Im Schleuderverfahren können rotationssymmetrische Bauteile mit formglatter Oberfläche hergestellt werden.
- Wie beim Faserspritzverfahren können kurzgeschnittene Faser während des Laminierprozesses zugeführt werden.
- Zusätzlich können zu Prozessbeginn Langfaserverstärkungen (Gewebe, Gelege, etc.) eingelegt werden.
- Während des Laminierprozesses werden Fasern und Matrixwerkstoff durch die Fliehkräfte an der Wandung der rotierenden Trommel verdichtet.
- Die Trommeldrehzahlen dürfen nicht zu hoch sein, da sonst die Fasern wegen Ihrer höheren Dichte in zu starker Konzentration außen abgelegt werden, was im Extremfall zu einer „Entmischung“ des Laminates führen kann.
- Es kommen hier hauptsächlich Polyesterharze zum Einsatz



Bildquelle: Michaeli-Wegener

## Pressverfahrenverfahren

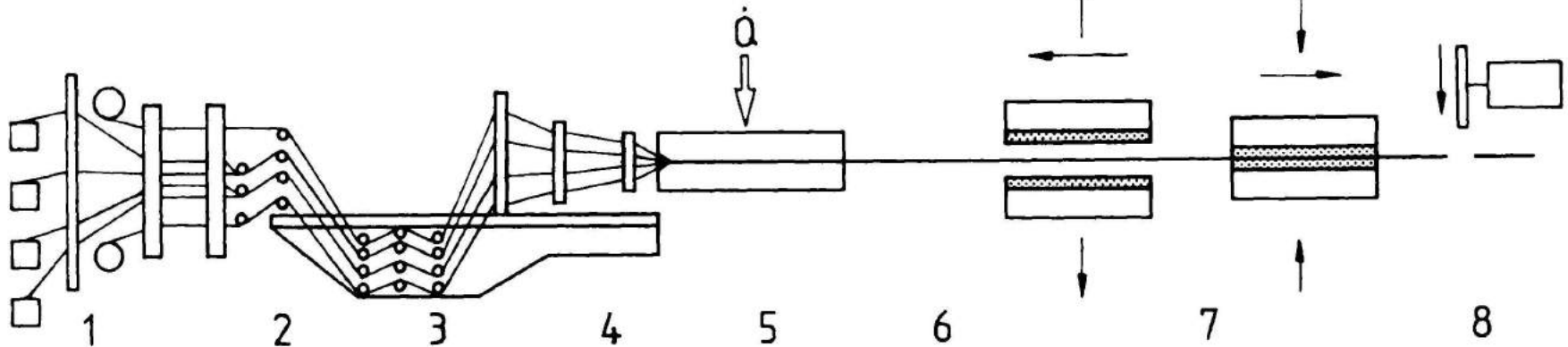
- Bei Pressverfahren wird eine Form mit entsprechender Gegenform (Matrize) benötigt.
- Der Hohlraum zwischen Form und Matrize bildet die Kavität, die mit Bauteilwerkstoff befüllt wird.
- Fasermaterial wird trocken in die Form gelegt. (vorgeformt als „Preform“)
- Harz wird mit hohem Druck in die Form hinengepresst.
- Je nach Verfahren können hohe Formeninnendrucke entstehen, die entsprechend stabile Formenwerkzeuge mit hohen Zuhaltekräfte erfordern.
- Die Produktivität im Pressverfahren ist sehr hoch.
- Es können hohe Bauteilqualitäten erzeugt werden.
- Verschiedene Varianten des Pressverfahrens können z.T. automatisiert werden.
- Der Investitionsaufwand in die Formwerkzeuge ist bei Pressverfahren sehr hoch.



Bildquelle: Michaeli-Wegener

# Pultrusion (Strangziehverfahren)

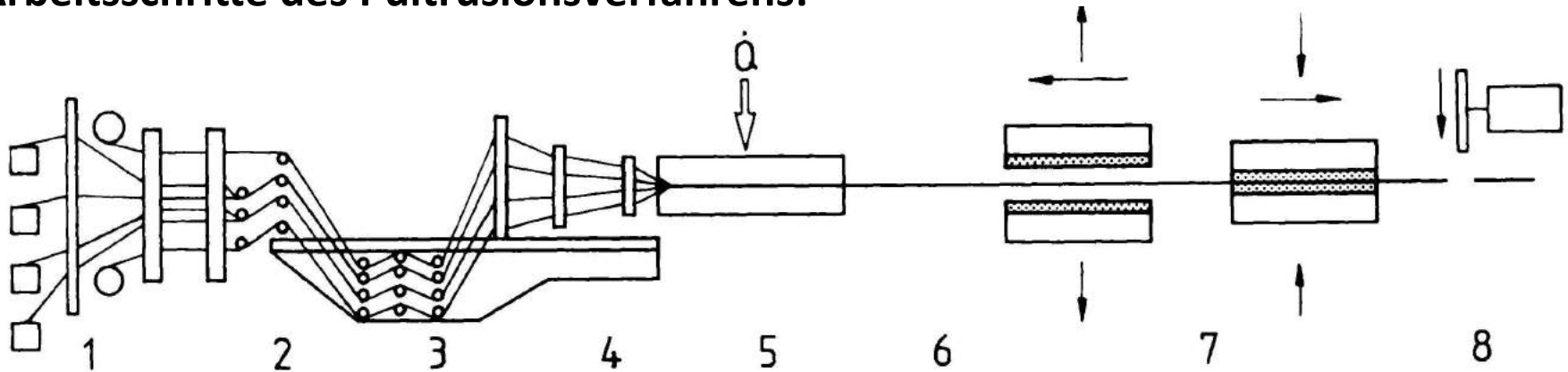
## Herstellung von längsverstärkten Profilen



- Im Pultrusionsverfahren werden Endlosprofile hergestellt.
- Die Profile sind hauptsächlich längsfaserverstärkt.
- Beim „Konsolidieren“ (Formgebung des Körpers) wird das Profil durch ein gehärtetes, beheizbares Stahlwerkzeug gezogen. Am Ende der Fertigungsstrecke wird das Profil auf Länge zugeschnitten.
- Um die Spleißneigung zu reduzieren, können zusätzlich zu den längsverstärkenden Rovings (Fadenbündeln) Flechtschläuche zugeführt werden, die durch entsprechende Quer- oder Diagonalfasern eine Quer- und Torsionsverstärkung bewirken.

# Pultrusion (Strangziehverfahren)

## Arbeitsschritte des Pultrusionsverfahrens:

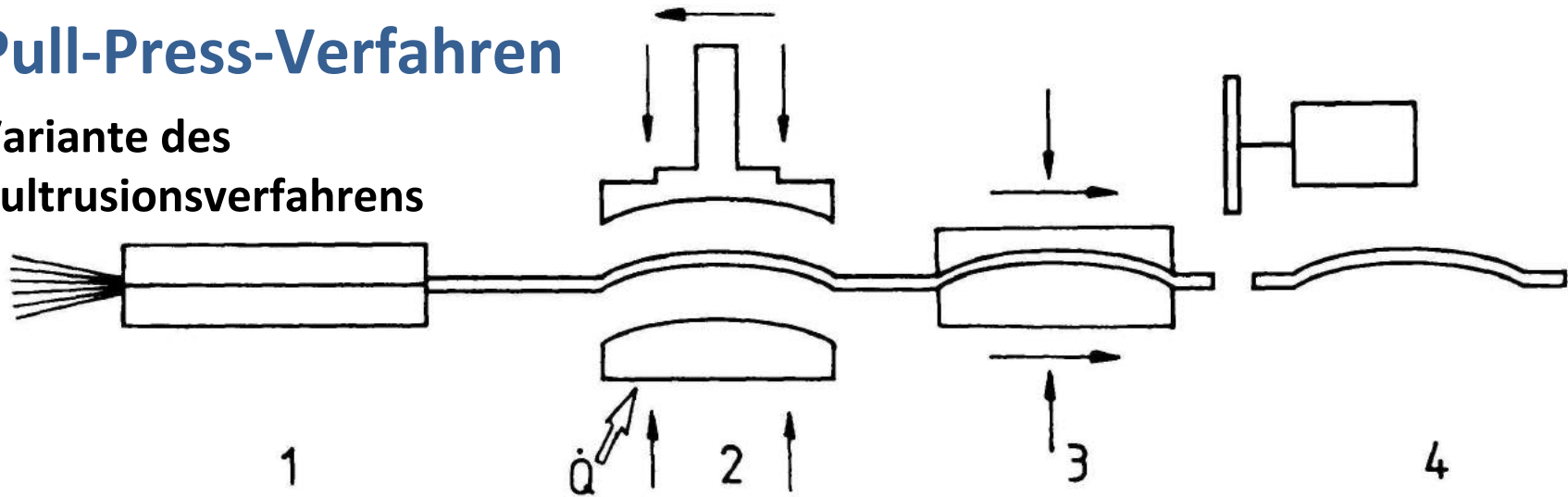


1. Zusammenführen des Verstärkungsmaterials
2. Aufbrechen der Rovings
3. Imprägnieren des Verstärkungsmaterials mit Matrixwerkstoff
4. Vorformen des Stranges
5. Formgebung, Aushärtung und Kalibrierung im Werkzeug
6. Kühlen
7. Ziehen
8. Trennen



## Pull-Press-Verfahren

### Variante des Pultrusionsverfahrens



- Kombination aus Pultrusions- und Pressverfahren
- Das pultrudierte Profil wird zunächst nur vorgeformt und vorgehärtet, so dass es im anschließenden Pressverfahren noch verformt werden kann.
- Beim Pressen kann nur noch die Querschnittform, aber nicht die Querschnittsfläche in Bauteillängsrichtung verändert werden.

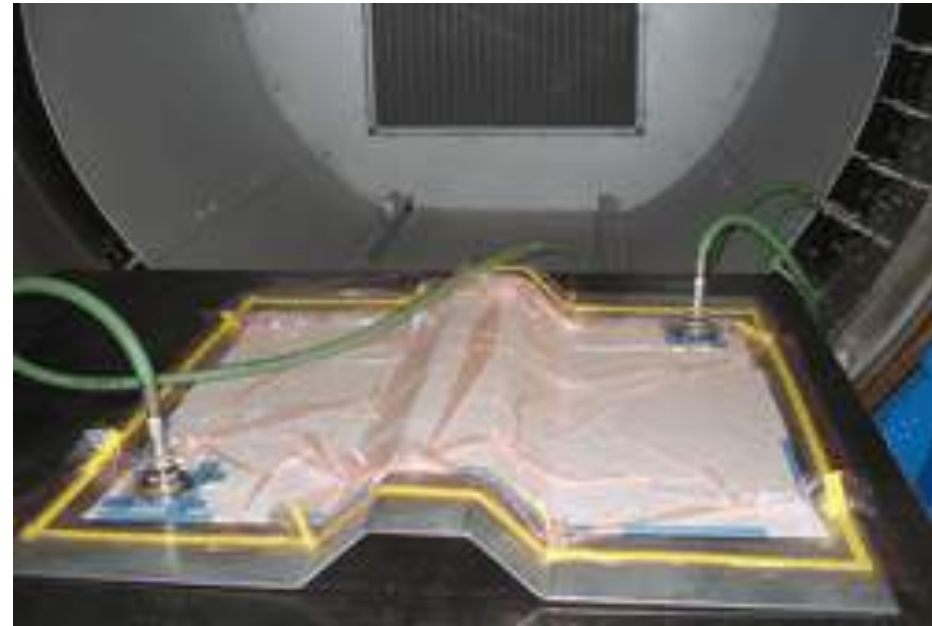
### Arbeitsschritte beim Pull-Press-Verfahren:

1. Vorformen und Erwärmen des Laminatstranges
2. Formgebung (Pressen) und Aushärtung
3. Ziehen
4. Trennen

## Vakuumtechnik

### Die Vakuumtechnik unterstützt viele Herstellverfahren:

- Laminate werden mit einer Folie abgedeckt
- Die Folie wird am Formenrand luftdicht abgedichtet
- Die Druckdifferenz zwischen Umgebungsdruck und Vakuumdruck verpresst die Laminate.
- Harzüberschüsse werden aus dem Laminat herausgepresst. Gleichzeitig werden die Laminate verdichtet.
- Die Gleichmäßigkeit der Matrixverteilung wird verbessert.
- Poren im Laminat werden reduziert.
- Beim Handlaminierverfahren wird durch Vakuumunterstützung während der Aushärtung die Laminatqualität deutlich gesteigert.
- Bei Sandwichaufbauten werden mit der Vakuumtechnik Kern und Deckhäute miteinander verpresst.



Bildquelle: Airtech

# Vakuumtechnik

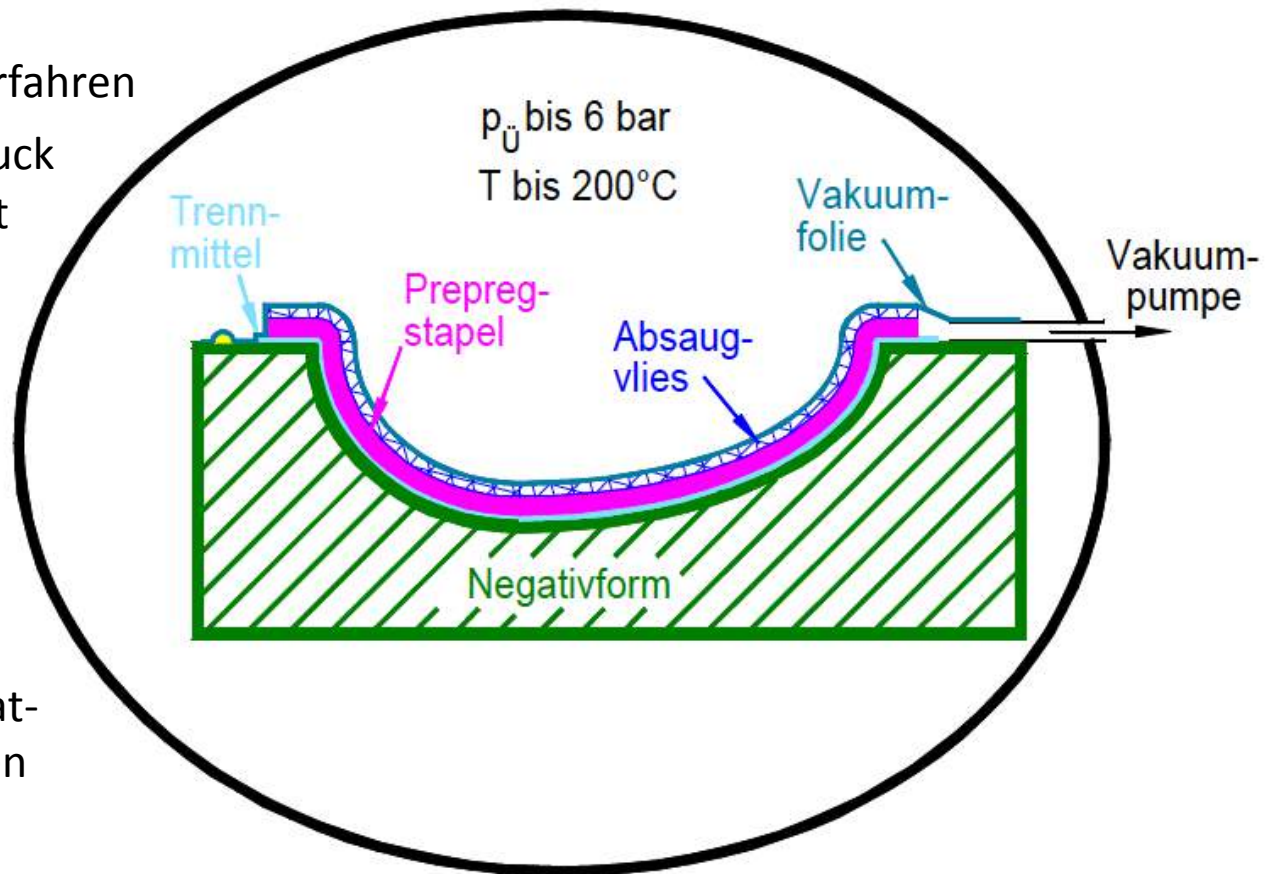
Die Vakuumtechnik unterstützt viele Herstellverfahren:



# Autoklavverfahren

## Verpressung der Lamine im beheizten „Druckofen“

- Basis ist das Vakuumverfahren
- Der höhere Autoklavdruck bis 10 bar gewährleistet eine optimale Verdichtung der Lamine.
- Die Lamine werden dabei fast ausschließlich mit Prepregs hergestellt.
- Im Autoklavverfahren werden höchste Laminatqualitäten zu sehr hohen Kosten hergestellt.
- Einsatz hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt und auch im Motorsport





## Infusionsverfahren

- Beim vakuumgestützten Infusionsverfahren werden die Faserhalbzeuge für den vollständigen Laminataufbau „trocken“ (ohne Harzzugabe) in die Form gebracht.
  - Ein Vakuumaufbau vervollständigt den Aufbau.
  - Das niedrig viskose Harz wird vom Unterdruck in den Laminataufbau gesogen und tränkt auf diese Weise den Laminataufbau.
  - Voraussetzung für das Infusionsverfahren ist eine hohe Vakuumdichtheit des Vakuumaufbaus.
- ⇒ Wenn die Vakuumfolie auf dem Formenrand abgedichtet werden soll, dann muss die Negativform selbst absolut dicht sein!
- ⇒ Leckagen im Vakuumaufbau lassen während der Infusion Luft in das Laminat strömen, die dann Poren im Laminat bewirken.
- Sinnvollerweise macht man vor der Infusion einen „Droptest“:
  - Der Aufbau wird mit der Vakuumpumpe bis auf wenige mbar Restdruck evakuiert.
  - Auf der Injektionsseite wird mit einem Vakuummeßgerät der Unterdruck kontrolliert.
  - Anschließend wird die Saugleitung abgesperrt. Wenn innerhalb von 10 min keine meßbarer Druckanstieg im System zu verzeichnen ist, kann der Vakuumaufbau als hinreichend dicht angesehen werden.



# Infusionsverfahren

## Vorgehensweise beim Infusionsverfahren:

- Laminataufbau nach Laminatplan (ply-book)  
Schichtweise werden die Verstärkungslagen (zumeist als Gewebe und Gelege) trocken aufgelegt. Aus handhabungstechnischen Gründen ist es oft sinnvoll, die abgelegten Faserhalbzeuge zu fixieren.
- Wenn die Fixierung mit Sprühkleber erfolgt, dürfen nur feinste Mengen Sprühklebernebel verwendet werden. Keinesfalls darf eine Vortränkung einzelner Faser durch den Sprühkleber erfolgen.
- Der Lagenaufbau schließt in der Regel mit einem Abreißgewebe ab.
- Anschließend wird eine Lochfolie aufgelegt, die den Laminataufbau von der Infusionshilfe trennt.
- Eine abschließende Fließhilfe (grobmaschiges Netz) ermöglicht den Harzfluss über den Laminataufbau.
- Für den Harzzufluss und die Absaugung werden entsprechende Schläuche an gegenüberliegenden Stellen des Bauteils angeordnet.
- Der Fließweg sollte möglichst kurz sein.
- Sinnvollerweise macht man vor der Infusion einen „Droptest“:

[http://www.youtube.com/watch?v=G0ksrKw\\_H8I](http://www.youtube.com/watch?v=G0ksrKw_H8I)

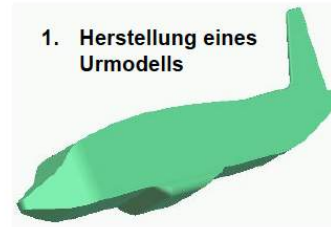
# Formenbau für Faserverbundwerkstoffe



## Werkzeugbau zur Herstellung von FVK-Bauteilen



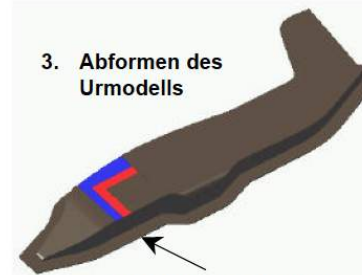
1. Herstellung eines  
Urmodells



2. Festlegung der  
Trennebene



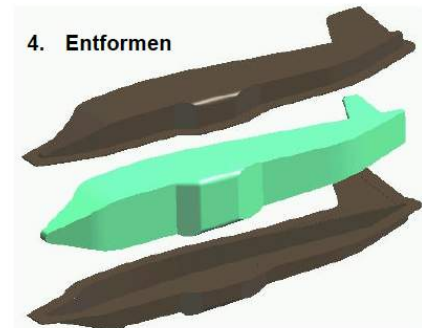
3. Abformen des  
Urmodells



Schichtweiser Aufbau:

- Deckschicht
- Feingewebe
- Grobgewebe
- Feingewebe
- Deckschicht

4. Entformen





## Formen zur Herstellung von Faserverbundbauteilen

- sind Werkzeuge (Produktionsmittel),
- bilden die (form-) gestaltgebende Ablagefläche für das Faserverbundlaminat,
- bestimmen entscheidend die Qualität der herzustellenden Bauteile,
- werden häufig selbst auch aus Faserverbundwerkstoffen im Abformverfahren hergestellt.

### Man beachte:

- Formenwerkzeuge sind i.A. Prototypen
- Die Qualität und Formgestaltung der Formenwerkzeuge beeinflusst in entscheidendem Maße die Wirtschaftlichkeit der Bauteilherstellung
- Bei kleinen und mittleren Serienstückzahlen entfallen auf die Formenwerkzeuge die wesentlichen Investitionskosten der Bauteilherstellung



## Begriffsdefinition „Formenwerkzeug“

- Eine Form zur Herstellung von Faserverbundbauteilen ist mindestens ein Oberflächenabdruck der Bauteilgeometrie
- Ein Formenwerkzeug verfügt darüber hinaus noch über weitere Merkmale, die den Herstellprozess unterstützen

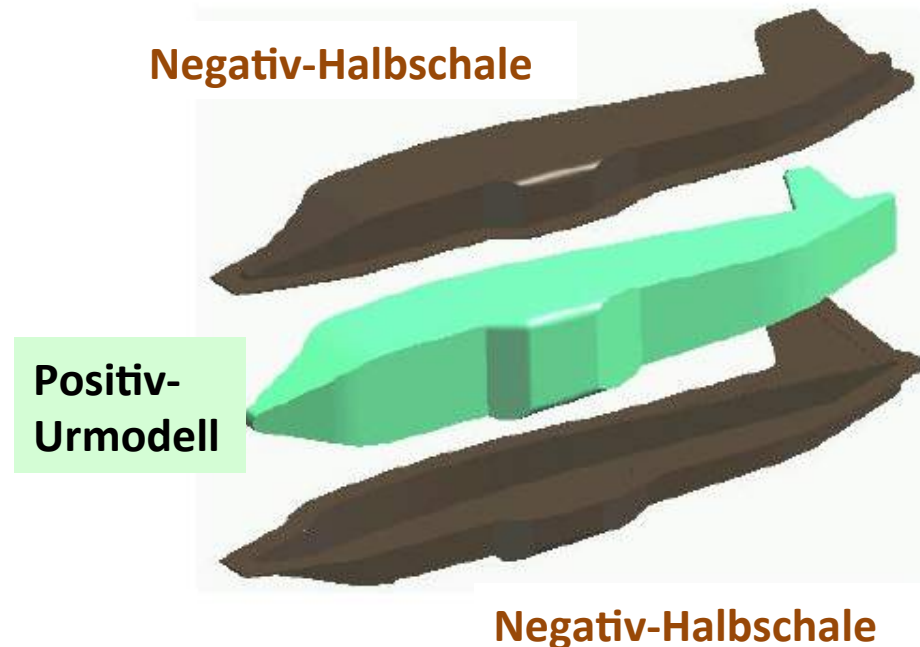
### **Entscheidende Merkmale eines hochwertigen Formenwerkzeuges sind:**

- Formenmaterial, insbesondere Material der Formenoberfläche
- Oberflächenqualität
- Formenrandgestaltung mit Zusatzfunktionen
- Zentrierungen, Ausrichtung und Fixierung mehrteiliger Formenteile zueinander
- Temperaturbeständigkeit, Wärmedehnung
- Verzugsanfälligkeit (insbesondere unter Temperatureinfluss)

# Positivform $\Leftrightarrow$ Negativform

## Ein Negativ wird vom Positiv abgeformt

- Als „Positivform“ wird i.A. eine Formengeometrie bezeichnet, deren Geometrie nach außen gewölbt ist.
  - Die **Positivform** ist von **außen glatt**
- Formt man eine Positivform ab (z.B. im Handlaminierverfahren) so erhält man Geometrie, die nach innen gewölbt ist. Diese nach innen gewölbte Form wird auch als Negativform bezeichnet
- Die **Negativform** ist von der **Innenseite glatt**, an der **Außenseite rauh**.





# Formenmaterial

## Formen können je nach Anforderung aus verschiedenen Materialien bestehen:

- Metallformen:
  - Werkzeugstahl
    - bei sehr hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächengüte
    - nur bei sehr hohen Stückzahlen ( > 10.000 Stck. p.a.) wirtschaftlich
  - Aluminium
    - bei hohen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Oberflächengüte
    - bei mittleren Stückzahlen ( ca. 5.000 Stck. p.a.) wirtschaftlich
- Kunststoffformen:
  - Kunststoffblockmaterial (z.B.: PU-Schäume, PU-Vergussmassen)
    - Formen können in einem Arbeitsgang (z.B. Fräsen) mit nur einem Formgebungsvorgang hergestellt werden
  - GFK, CFK
    - GFK- und CFK-Formen entstehen durch Abformung einer zuvor erstellten Geometrie (Mastermodell, Urmodell)
    - Die Formen sind selbst Faserverbundbauteile
    - Es ist i.A. für Formgebungsprozesse günstig, wenn Form und Bauteil aus gleichem oder ähnlichem Material bestehen
    - GFK-Formen sind die am häufigsten verwendeten Formen zur Herstellung von FVK-Bauteilen



# Formenmaterial

## Weitere Formenmaterialien:

- Elastomerformen
  - Silikonformen
    - sind sehr flexibel (Dehnung über 100% möglich) und ermöglichen so auch ein Entformen komplexer Geometrien mit Hinterschnitt
    - geben winzigste Oberflächendetails sehr genau wieder
    - weisen eine schlechte Maßhaltigkeit auf (ohne Stützform)
- Holzformen:
  - lackierte Holzurmodelle
    - Lackierte Holzformen werden häufig als Urmodelle genutzt
  - Beschichtete Holzplatten
    - als Unterlage (Form) für ebene Lamine
- Gipsformen:
  - Gipsformen (z.T. auch als „Laminierkeramik“ bezeichnet)
    - Gipsformen sind einfach und schnell herzustellen
    - Gipsformen eignen sich für kleine Bauteilstückzahlen
  - Keramische Vergussmassen
    - Keramische Gussmassen werden vereinzelt als „auswaschbare Kerne“ eingesetzt

## Beispiel: Herstellung einer zweiteiligen Motorhaubenform im Handlaminierverfahren

- Ein Urmodell mit glatter, lackierter Oberfläche ist vorhanden
- Zunächst wird ein Brett als ebene Trennfläche eingebaut
- Urmodell und Trennbrett werden mit Trennmittel behandelt
- Die zwei Negativhalbschalen der Negativform werden im Handlaminierverfahren abgeformt
- Zentrierschraubungen am Formenrand ermöglichen es, die später zunächst einzeln laminierten Bauteilhalbschalen genau zueinander positioniert zu verkleben

⇒ Film von R&G





## Formgebung: „Modellierung des Urmodells“

- Für die erste Erstellung der Geometrie muss ein Urmodell geformt werden.
  - Man unterscheidet:
    - **Handwerkliche Verfahren** (handwerklicher Modellbau)
    - maschinell gestützte Verfahren (**CAD-CAM-Technologie**)
- ⇒ Während handwerkliche Verfahren für einfache Geometrien weiterhin sinnvoll sind, dominieren bei komplexen Geometrien CAD-CAM-Verfahren
- Für die Herstellung von Urmodellen für FVK-Bauteile kommt hauptsächlich die Frästechnologie zum Einsatz
  - Mit der Frästechnologie können Negativformen auch direkt hergestellt werden
  - Wenn zunächst ein Urmodell (Mastermodell) hergestellt wird, können davon mehrere Negativformen abgeformt werden.
  - Wenn im ersten Schritt eine Negativform gefräst wird, kann direkt mit der Bauteilproduktion begonnen werden.



# CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

- Negativformen aus Werkzeugstahl, Aluminium oder PU-Blockmaterial können direkt gefräst werden.
- Insbesondere bei sehr großen Formen werden zunächst Urmodelle aus leichtem (leicht zerspanbarem, kostengünstigen) PU-Blockmaterial oder PU-Schäumen gefräst
  - ⇒ bei mehrteiligen Formwerkzeugen kann der Formenrand direkt mit gefräst werden
- Qualitätsanforderungen und Wirtschaftlichkeit entscheiden bei der Auswahl der richtigen Formenbaustrategie:
  - ⇒ Hochwertige, feste Werkstoffe sind relativ teuer und haben bei großen Zerspanungsvolumen eine lange Bearbeitungszeit beim Fräsprozess, ergeben aber eine feste glatte Formenoberfläche
  - ⇒ Preiswerte, leicht zerspanbare Formwerkstoffe haben eine sehr viel kürzere Bearbeitungszeit, ergeben aber z.T. schlechte Oberflächen, die ggf. dann noch nachgearbeitet werden müssen (z.B. Lackieren)



## CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

### Vorgehensweise:

- Zunächst wird die auf der Fräse zu bearbeitende Geometrie als 3D-Geometrie konstruiert
  - ⇒ Neben der reinen Bauteilkontur müssen auch Produktionsdetails wie Formenränder, Zentrierungen etc. mit bedacht werden
  - ⇒ Werden diese Produktionsdetails gleich mit konstruiert, so können aufwändige Nachbearbeitungsschritte im späteren Werkzeugbau z.T. entfallen
- Die komplette Geometrie wird dann als Geometrie-Datensatz (z.B. im stl-Format) exportiert.
- Der Geometrie-Datensatz wird im NC-Programm (z.B.: Desk-Proto) eingelesen
  - ⇒ Im NC-Programm werden Bearbeitungsparameter (Fräswerkzeuge etc.) eingestellt und am Ende Werkzeugwege generiert.
  - ⇒ Die Werkzeugwege werden als MaschinenCode auf den Steuerungsrechner der CNC-Werkzeugmaschine übertragen



## CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

### Vorgehensweise:

- Konstruktion der 3D-Geometrie



**Geometrie-Export**  
z.B.: stl-Format

- Definition der Fräsparameter und Berechnung der Werkzeugwege im NC-Programm



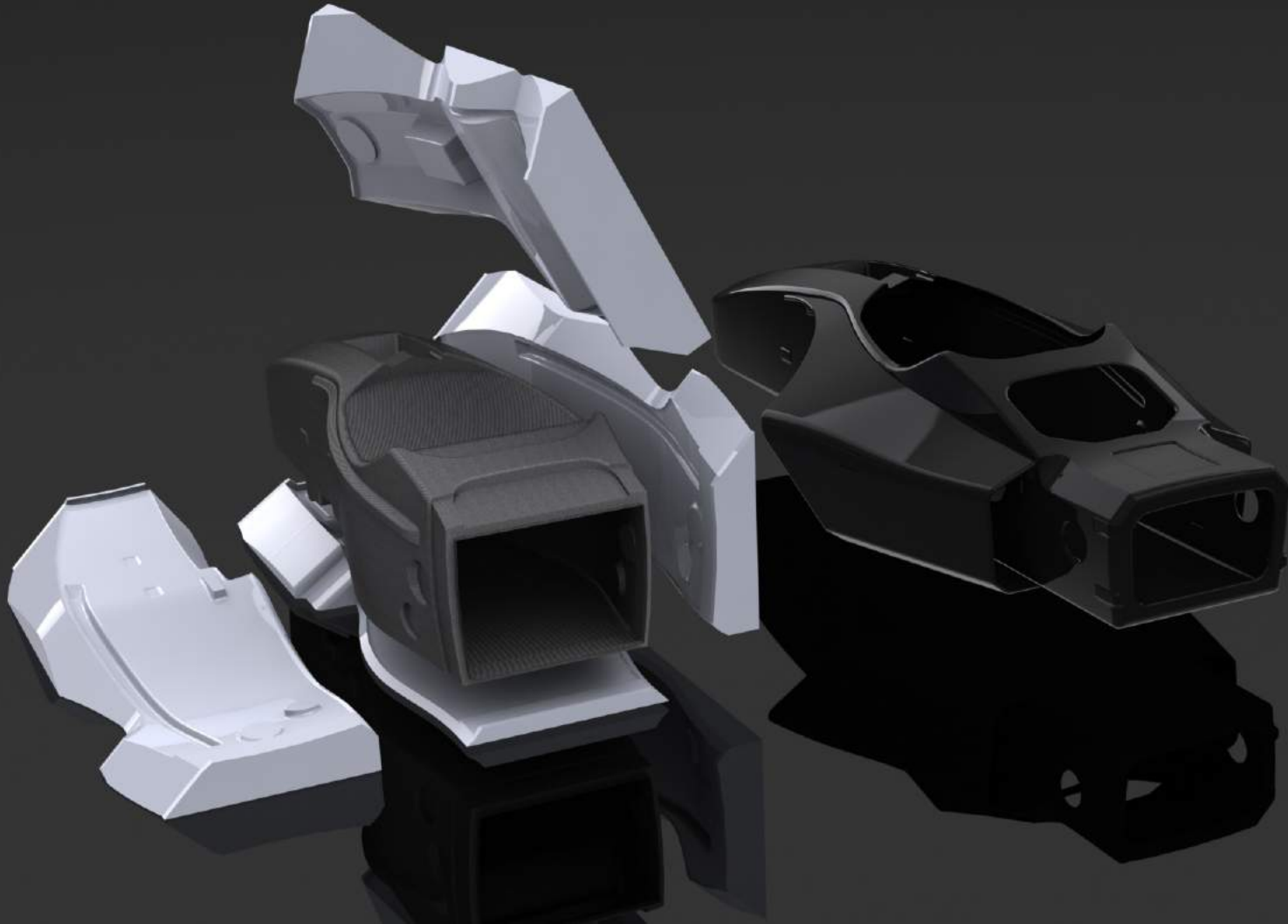
**Export der Werkzeugwege**  
(Koordinatenabfolge und Maschinenbefehle)

- Bearbeitung des Formenmaterials durch Abfahren der Fräswege auf der Fräsmaschine

# CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

## Beispiel: Formula-Student-Rennfahrzeug

Bildquelle: Heiner Füllberg





# CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

## Beispiel: Formula-Student-Rennfahrzeug

Film: Fräsvorgang im Zeitraffer

# CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

## Beispiel: eBugster





## CAD-CAM-Technologie im Formenbau für FVK-Bauteile

### Fräsdatenaufbereitung am Beispiel eines Fahrzeugmodells:

- Datenaufbereitung mit DeskProto 6.0
  - Sie können eine kostenlose Demoversion der Software DeskProto herunterladen unter:
  - <http://www.filou.de>
- ⇒ ***Sie müssen sich zunächst registrieren und können dann die Vollversion herunterladen, die aber nur 30 Tage lang als Testversion läuft.***