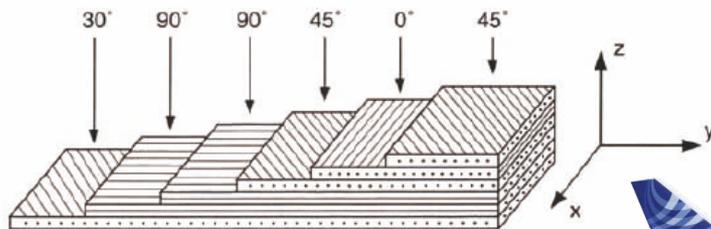
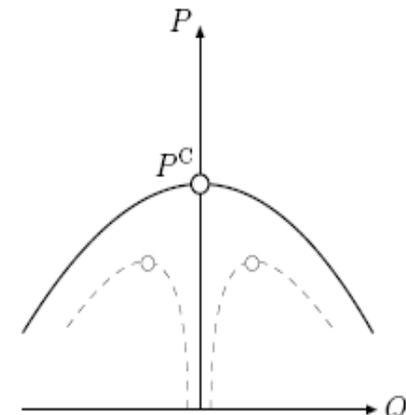


Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung (PJ 0530 L 047)

Verbundwerkstoffe und ihre Versagensmechanismen

laminate:

45°
0°
45°
90°
90°
30°

designation: [30 / 90₂ / 45 / 0 / 45]

Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung (PJ 0530 L 047)

LV 4 – 02.05.2011

1. Kodierung eines Laminataufbaus

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen
 - 2.1. Faserbruch

 - 2.2. Zwischenfaserbruch

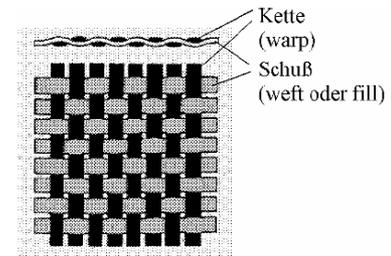
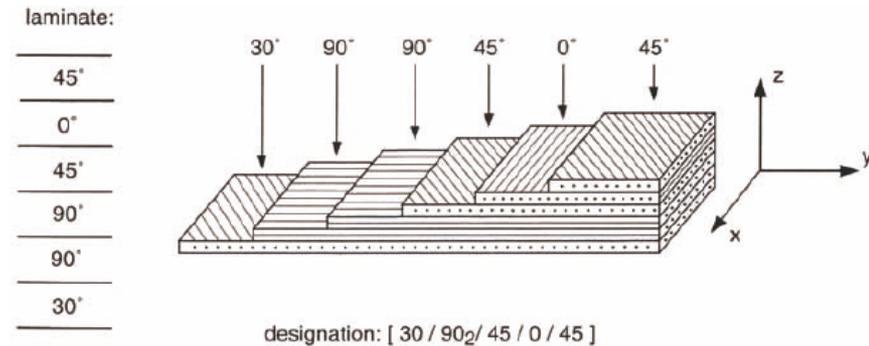
 - 2.3. Delamination

1. Kodierung eines Laminataufbaus I (laminata orientation code)

MSV charakterisiert durch:

❖ Faserorientierung der einzelnen Schichten

- auf x-Achse des Bauteils bezogen
- Mathematisch positive Drehung = positiver Winkel (amerikanische Konvention)
- Winkelangaben einzelner Schichten durch Schrägstrich (/) getrennt
- Bei Geweben ist Winkelangabe auf Kettrichtung (Warp) bezogen



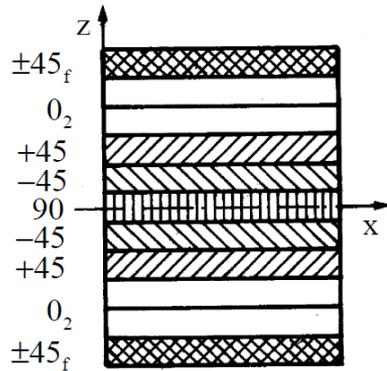
❖ Zählung der Schichtreihenfolge beginnt mit der ersten, eingelegten Schicht

❖ Index = Anz. direkt aufeinander folgender Schichten mit gleicher Faserorientierung, z.B. (45₃) = drei (45)-Schichten

1. Kodierung eines Laminataufbaus II (laminata orientation code)

- ❖ Bei mittensymmetrischer Schichtung des Laminats
 - Abkürzung: Angaben nur für eine Symmetriehälfte -> Index s (symmetrisch)
 - Bei gerader Schichtanzahl, z.B. 10 Schichten $(0_2 / 90 / +45 / -45)_s$
 - Bei ungerader Schichtanzahl, mittlere Schicht per Überstreichung kennzeichnen ($\bar{\quad}$)

- ❖ Index f -> fabric = Gewebeschicht
- ❖ Hoch gestellte Indizes, falls unterschiedliche Fasertypen (A, C, G), z.B. $(0_2^G / 90^C)$
- ❖ Falls unterschiedliche Dicken, diese prozentual zur Gesamtdicke angeben, z.B. $(0 / 90 / +45)_s$ (30% / 30% / 40%)



Symbolhafte Darstellung eines Laminataufbaus mit der Kodierung:

Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung (PJ 0530 L 047)

1. Kodierung eines Laminataufbaus

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen
 - 2.1. Faserbruch

 - 2.2. Zwischenfaserbruch

 - 2.3. Delamination

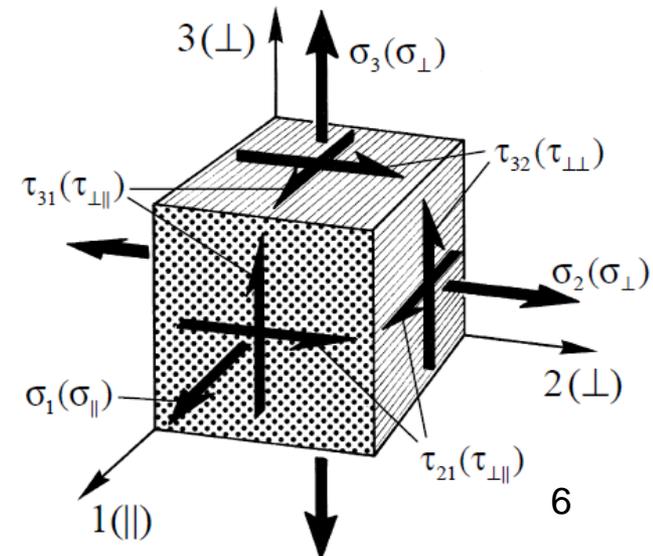
2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

Allgemeines I

- ❖ Hier: Versagen von UD-Schichten (-> Basis aller Berechnungen wenn MSV)
- ❖ Versagen im Sinne von Brüchen und Werkstofftrennung (z.B. Überwindung eines Bruchwiderstandes)
- ❖ Ursache: ausschließlich mechanische Spannungen, nicht Umwelteinflüsse etc.

- ❖ Räumlicher Spannungszustand eines UD-Elements:

- Transversal isotrop (-> später)
- Drei Normalspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$
- Sechs, bzw. drei Schubspannungen $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{31}$

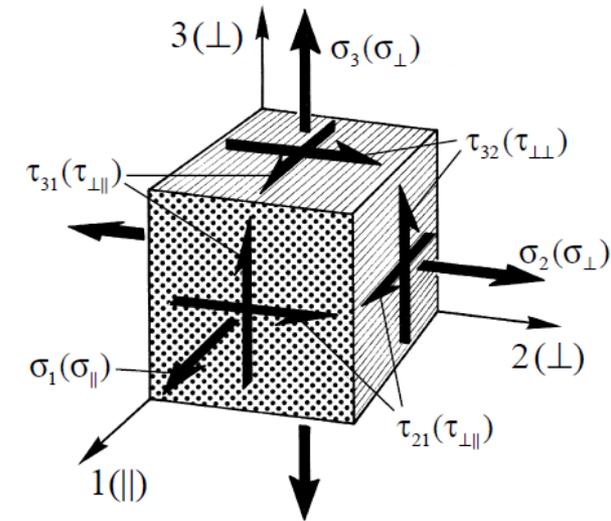


2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

Allgemeines II

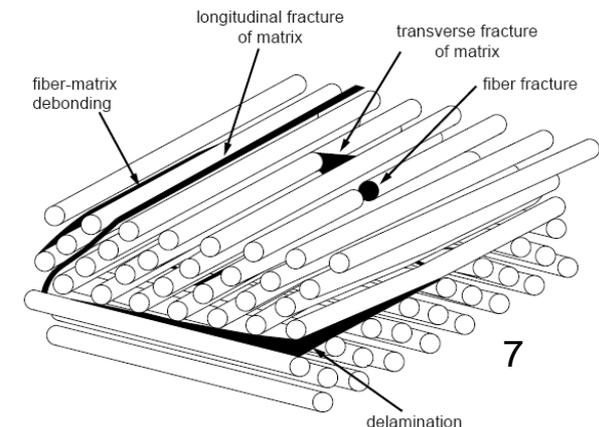
❖ Beanspruchungen: physikalisch indiziert:

- σ_{\parallel} = Längsbeanspruchung
- σ_{\perp} = Querbeanspruchung
- $\tau_{\perp\parallel}$ = Quer-Längs- bzw. Längs-Quer-Schubbeanspruchung
- $\tau_{\perp\perp}$ = Quer-Quer-Schubbeanspruchung
- Bei Normalbeanspruchungen: hochgestellter Index (+) = Zug, (-) = Druck (kein Unterschied bei Schubbeanspruchungen)



❖ Versagensarten:

- Faserbruch (Fb) -> Riss quer zur Faser
- Zwischenfaserbruch (Zfb) -> Riss durch Matrix oder Faser-Matrix-Grenzfläche
- Delamination = Schichtentrennung zwischen Einzelschichten



Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung (PJ 0530 L 047)

1. Kodierung eines Laminataufbaus

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen
 - 2.1. Faserbruch

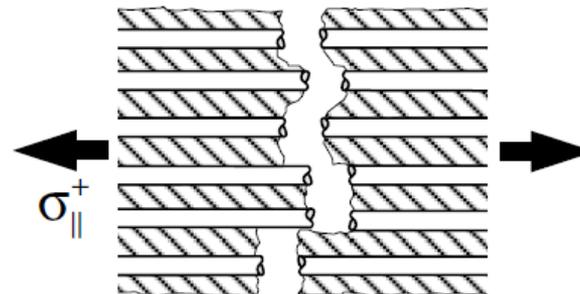
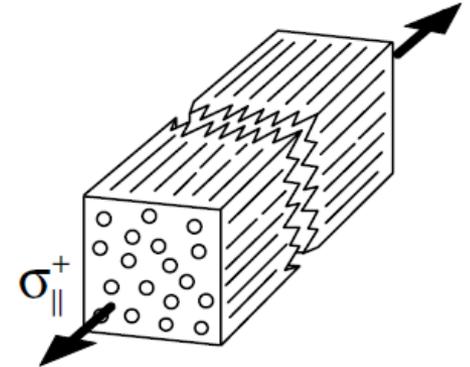
 - 2.2. Zwischenfaserbruch

 - 2.3. Delamination

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.1. Faserbruch (Fb) I (fibre failure, FF)

- ❖ Gleichzeitiges Versagen von Faserbündeln, nicht einzelne Filamente
- ❖ Tritt meist bei sehr hohen Belastungen auf, vorher häufig schon Matrixversagen
- ❖ Daher selten durch Spannungumlagerung kompensierbar
- ❖ i.Allg. nicht tolerierbare Versagensform
- ❖ Praktisch ausschließlich durch faserparallel Belastung: Längszug- oder Druckbelastung

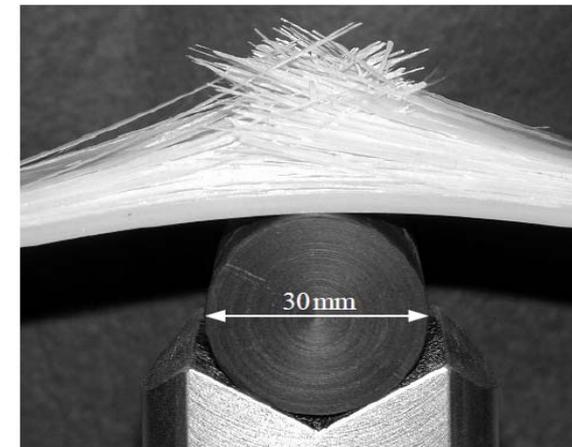
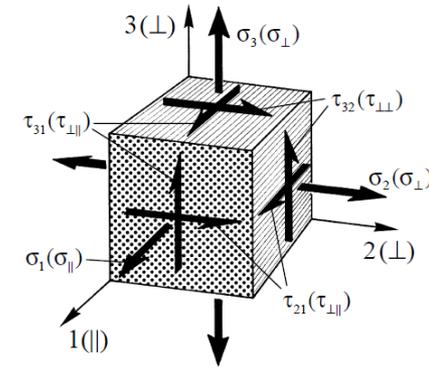


2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.1. Faserbruch (Fb) II (fibre failure, FF)

2.1.1. Faserbruch durch Längszugbeanspruchung $\sigma_{||}^+$

- ❖ Fasern werden zerrissen
- ❖ Unter Ermüdungsbelastung sehr komplex
 - > erst einzelne Filamente, dann ganze Bündel (sukzessiv)
- ❖ Unter Biegung (Spannungsgradienten)
 - > „gutmütig“, quasi- „duktil“
- ❖ Hoher Steifigkeitsverlust
- ❖ Einzelbrüche deutlich zu hören
- ❖ Hohe Energiefreisetzung -> Faser-Matrix-Verbund wird zerstört



„besenförmiges“
Abspleißen
gebrochener
Einzelfasern 10

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.1. Faserbruch (Fb) III (fibre failure, FF)

- ❖ Für Vorauslegungen (mit E_{\parallel} (Verbund) aus Mischungsregel):

$$\sigma_f = E_{f\parallel} \cdot \varepsilon_f \quad \text{eingesetzt in} \quad \varepsilon_f \stackrel{\leftarrow}{=} \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{\parallel}}$$

Kompatibilitätsregel:
Dehnung Fasern = Dehnung Verbund

- Faserspannung:

$$\sigma_f = \frac{E_{f\parallel}}{E_{\parallel}} \cdot \sigma_1 \xrightarrow{\text{Mit Mischungsregel und Vernachlässigung des Traganteils der Matrix}} \sigma_f \approx \frac{\sigma_1}{\varphi}$$

Elastizitätsgesetz

- ❖ Mikromechanische Faserspannung ist sehr viel höher als die an UD-Schicht anliegende makromechanische Spannung!

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.1. Faserbruch (Fb) IV (fibre failure, FF)

Verbesserungsmaßnahmen:

- ❖ Faservolumenanteil erhöhen
 - sinnvolle technologische Obergrenze ca. 65%
 - bei schwingender Belastung ca. 50% (verlangsamer Rissfortschritt, da Abstand zwischen Fasern erhöht und somit Kerbwirkung von eines Faserbruchs auf seine Nachbarfasern)

- ❖ Matrixbruchdehnung mind. doppelt so hoch wie Faserbruchdehnung

- ❖ Kombination unterschiedlicher Fasertypen -> Reservelastpfade

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.1. Faserbruch (Fb) V (fibre failure, FF)

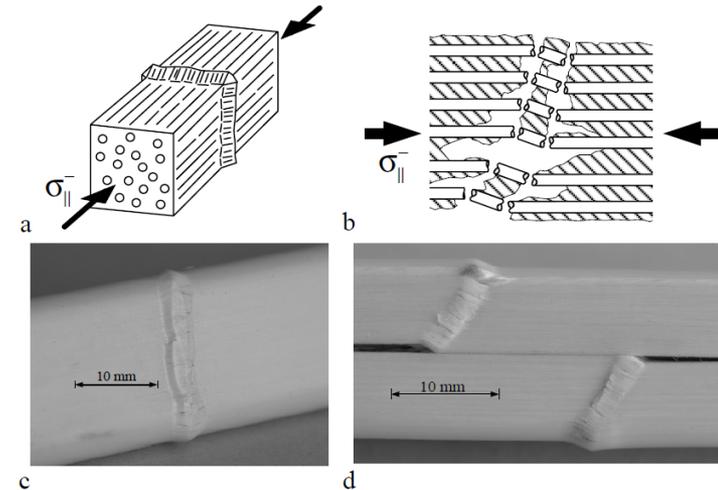
2.1.2. Faserbruch durch Längsdruckbeanspruchung $\sigma_{||}$

❖ Stabilitätsnachweise auf Mikro-/Mesoebene

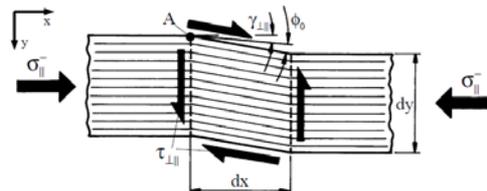
- Knicken als Stab
- Beulen als Platte

❖ Hier: nicht Eulerknicken sondern Schubknicken

❖ Vorher eher Auftreten von globalem Gesamtversagen der Struktur oder Zwischenfaserbruch als Schubknicken



Versagen bei Längsdruck in Form von Schubknicken:
 mikromechanische Darstellung des Schubknickens (a) in der Ebenen und (b) aus der Ebene;
 (c) Schubknicken in der Ebene
 (d) Schubknicken aus der Ebene heraus

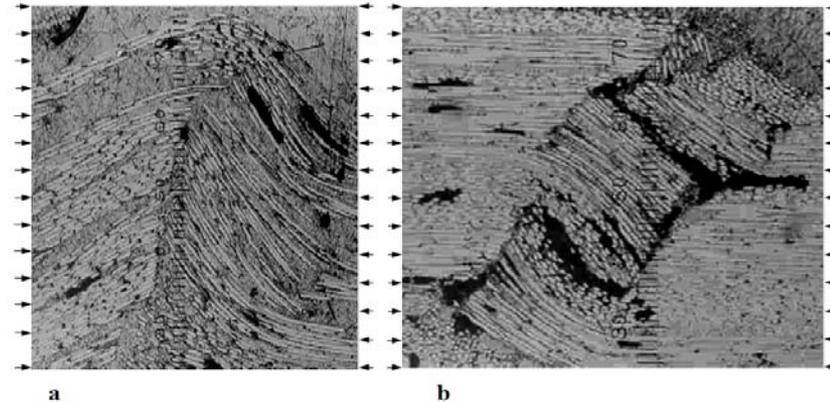


2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.1. Faserbruch (Fb) VI (fibre failure, FF)

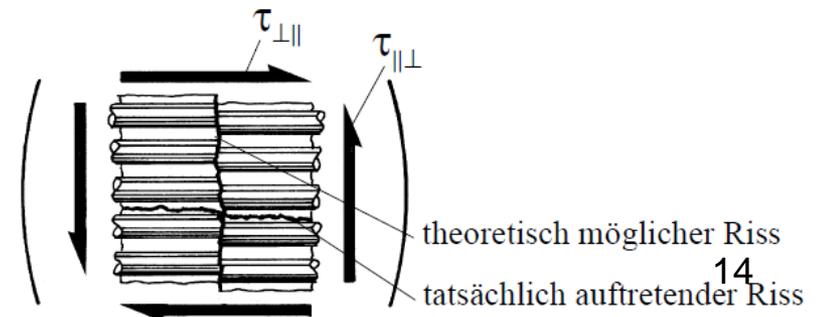
- ❖ Im 3. Teil der LV -> Kink-Band Modell

Mikroskopaufnahmen von Bereichen, die auf Längs-Druckbeanspruchung durch Schubknicken versagt haben
 (a) Schubknicken in der Ebene
 (b) Schubknicken aus der Ebene heraus



2.1.3. Faserbruch durch Schubbeanspruchung $\tau_{\perp\parallel}$

- ❖ Theoretisch ist Faserbruch durch eine Schubbeanspruchung (Abscheren) möglich
- ❖ Tatsächlich verläuft bei den derzeitigen FKV der Riss faserparallel in der Matrix und/oder in der Grenzfläche Faser-Matrix, d.h. in der Wirkebene der Scherbeanspruchung



Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung (PJ 0530 L 047)

1. Kodierung eines Laminataufbaus
2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen
 - 2.1. Faserbruch
 - 2.2. Zwischenfaserbruch
 - 2.3. Delamination

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) I

- ❖ Wirkebene (action plane): Ebene, in der eine einzeln wirkende Beanspruchung in einem Werkstoffelement maximal wird
- ❖ Bruchebene (fracture plane): Ebene, in der der Bruch erfolgt
- ❖ Puck:

Der Bruchwiderstand einer Wirkebene ist derjenige Widerstand, den eine Schnittebene ihrem Bruch infolge einer einzelnen in ihr wirkenden Beanspruchung (bei Zfb: σ_{\perp}^+ oder $\tau_{\perp\perp}$ oder $\tau_{\perp\parallel}$) entgegensetzt.

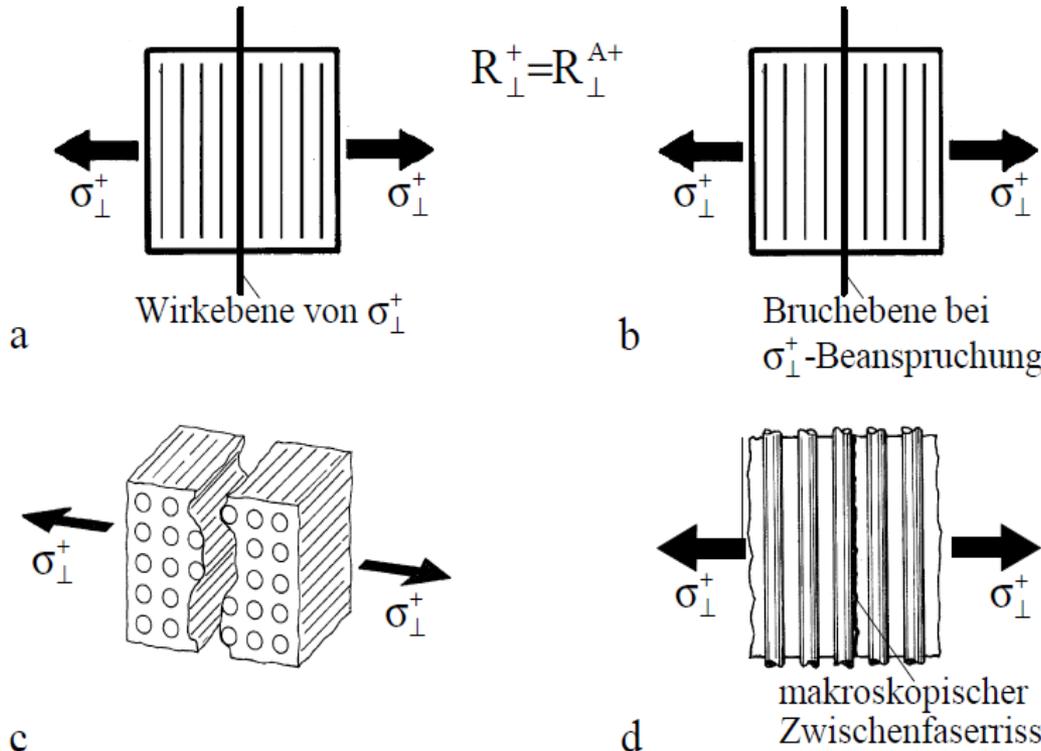
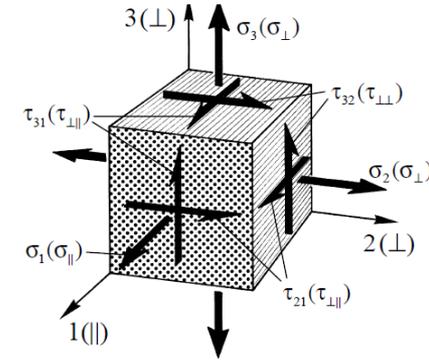
- ❖ Bruch erfolgt spröde
- ❖ R^A = Bruchwiderstand der Wirkebene A

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) II

2.2.1. Beanspruchung durch Querzug σ_{\perp}^+

❖ Wirkebene = Bruchebene (Basis-Festigkeit = Bruchwiderstand der Wirkebene)



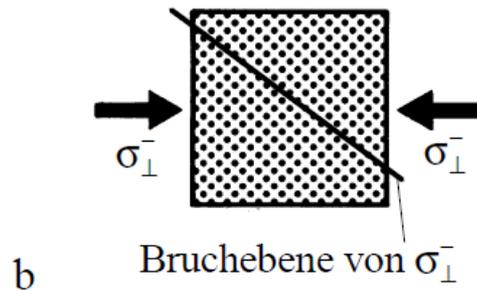
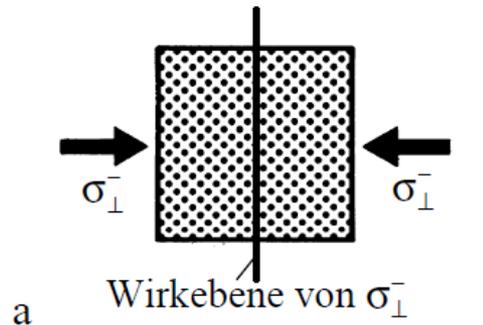
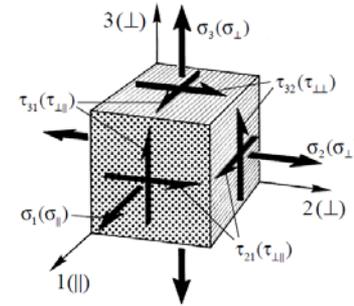
- a Wirkebene der Beanspruchung
- b Bruchebene; sie ist bei Querzug-Beanspruchung mit der Wirkebene der angelegten Beanspruchung identisch
- c realer Bruch
- d Rissverlauf als Zfb parallel zu den Fasern

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) III

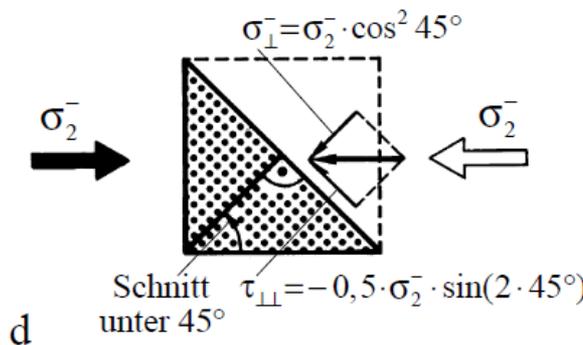
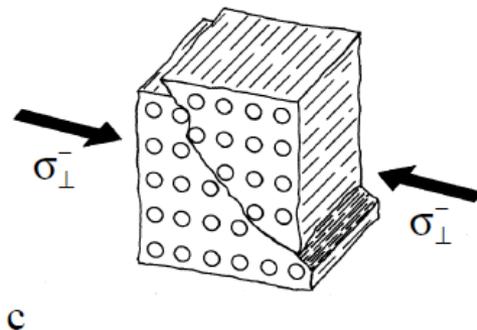
2.2.2. Beanspruchung durch Querdruck σ_{\perp}^{-}

- ❖ Wirkebene \neq Bruchebene; Versagen in einem schrägen Schnitt \rightarrow Schubversagen
- ❖ Beanspruchung kann in ihrer Wirkebene keinen Bruch erzeugen



a Wirkebene bei ausschließlichem Querdruck

b Bruchebene; sie ist bei Querdruck-Beanspruchung mit der Wirkebene der aufgetragenen Beanspruchung nicht identisch und verläuft unter einem Winkel von etwa 53° zur Belastungsrichtung



c realer Bruch

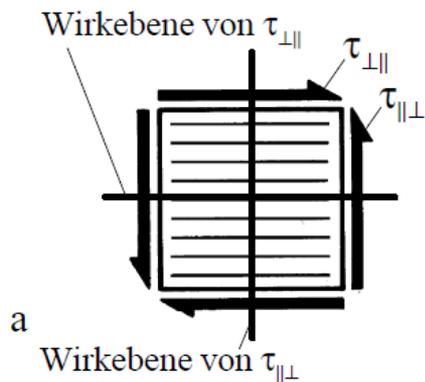
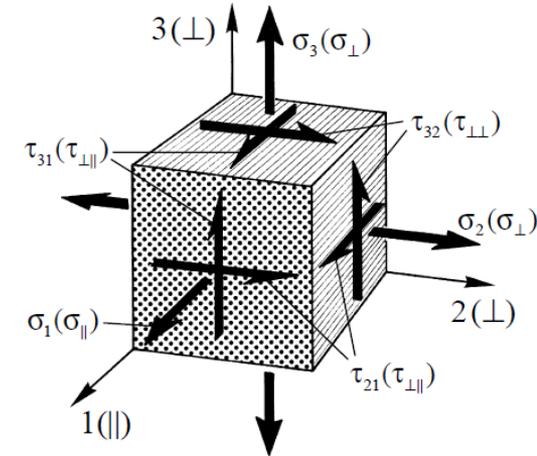
d auf der Schnittebene unter 45° wird die Scherspannung maximal

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) IV

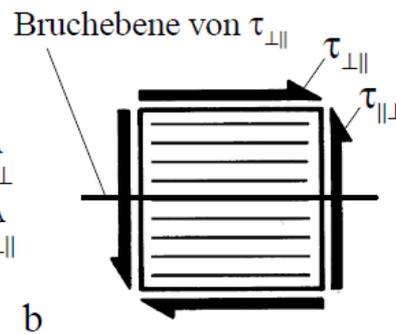
2.2.3. Beanspruchung durch Quer-Längs-Schub $\tau_{\perp\parallel}$ bzw. $\tau_{\parallel\perp}$

❖ Wirkebene = Bruchebene, aber nur faserparallele

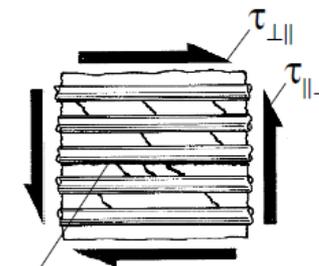
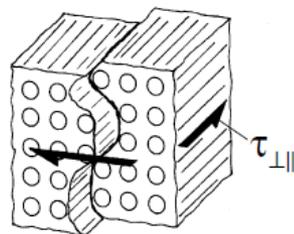


$$R_{\perp\parallel}^A < R_{\parallel\perp}^A$$

$$R_{\perp\parallel} = R_{\perp\parallel}^A$$



- a Es existiert je eine Wirkebene
- b Es existiert nur eine, die faserparallele Bruchebene. Sie ist bei Quer-Längs-Schubbeanspruchung mit der Wirkebene identisch
- c realer Bruch
- d Mikroskopische Matrixrisse unter 45° und resultierender makroskopischer Zwischenfaserriss



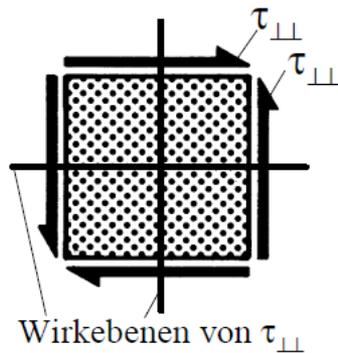
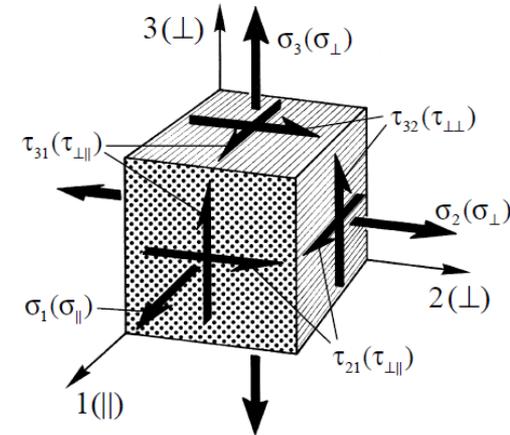
45°-Hauptspannungsrisse vereinigen sich zu einem makroskopischen Zfb-Riss

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

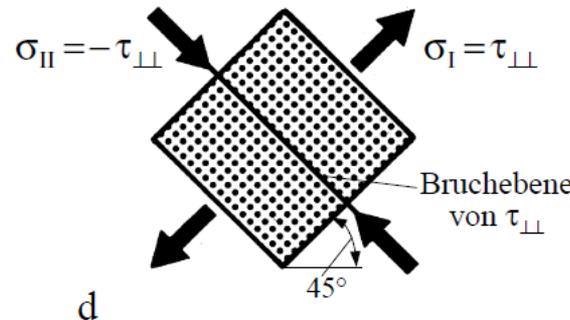
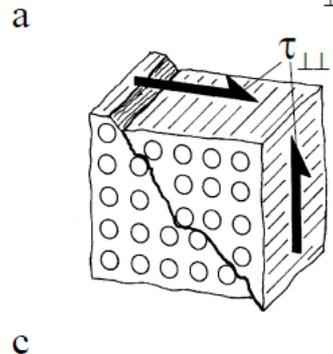
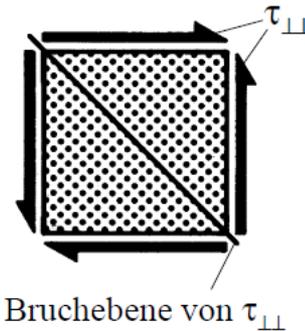
2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) V

2.2.4. Beanspruchung durch Quer-Quer-Schub $\tau_{\perp\perp}$

❖ Wirkebene \neq Bruchebene



$$R_{\perp\perp} \neq R_{\perp\perp}^A$$



a Es existieren zwei dem Schub unmittelbar zugeordnete Wirkebenen

b Es tritt jedoch eine Bruchebene auf, die mit keiner der Wirkebenen der äußeren Beanspruchung identisch ist

c realer Bruch

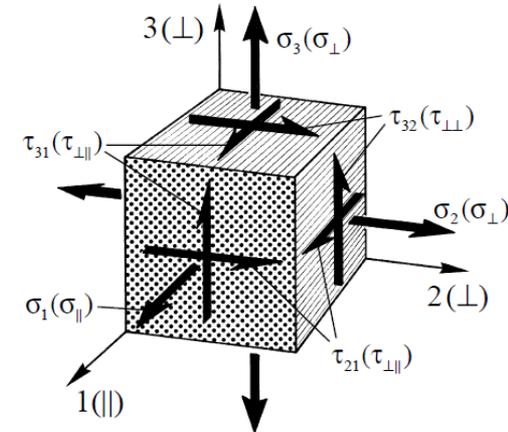
d Der Bruch entsteht in einer um 45° geneigten Wirkebene infolge der dort wirkenden Zug-Hauptspannung, einer Querkzug-Beanspruchung (Mohrscher Spannungskreis)

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) VI

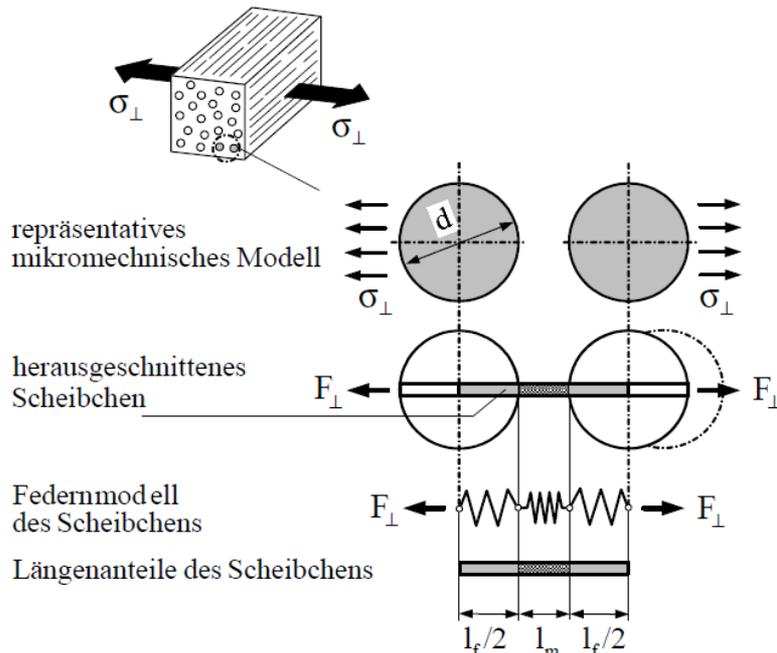
2.2.5. Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung σ_{\perp}^+

- ❖ Am häufigsten auftretend
- ❖ Rissbildung geht von unvermeidlichen Fehlstellen aus
- ❖ Erst feine Risse -> faserparallele Ausbreitung



- ❖ Keine Fasern in Krafrichtung

- ❖ Faser und Matrix als hintereinandergeschaltete Federn betrachtet



Mikromechanisches „Scheibchenmodell“ (Puck) zur Modellierung einer UD-Schicht bei einer Querbeanspruchung σ_{\perp} . Man erkennt die Belastung des mittleren Scheibchens, sowie das zugehörige Federmodell der Reihenschaltung

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) VIII

Pucksches Scheibchenmodell I

❖ Elasto-statische Beziehungen an einer infinitesimal dünnen, quer zur Faser herausgeschnittenen Scheibe

1. Kräftegleichgewicht

$$F_{\perp} = F_f = F_m \quad \text{oder, da gleiche Querschnitte} \quad \sigma_{\perp} = \sigma_f = \sigma_m$$

2. Verträglichkeitsbeziehung

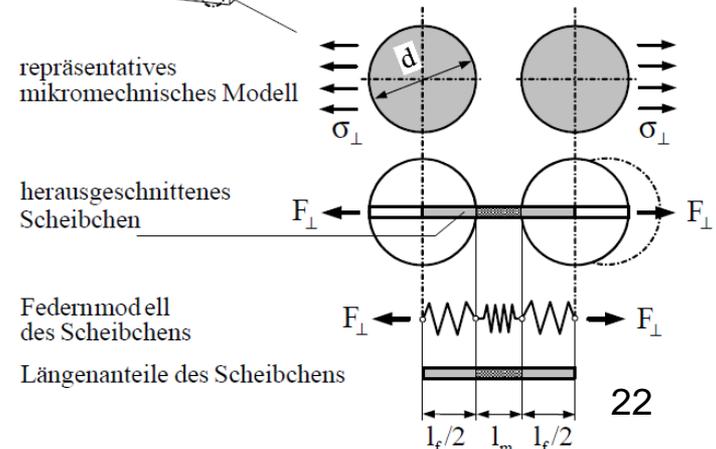
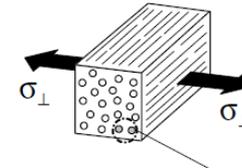
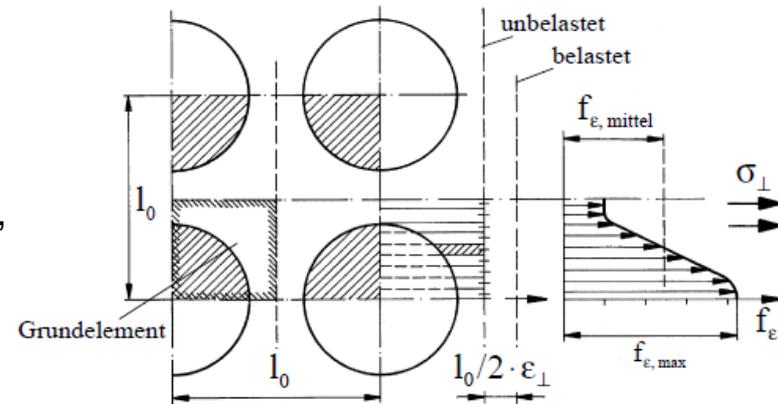
$$\Delta l_{\text{Verbund}} = \Delta l_m + \Delta l_f$$

Mit $\frac{\Delta l_m}{l_m} = \varepsilon_m$ und $\frac{\Delta l_f}{l_f} = \varepsilon_f$ wird

$$\underbrace{\varepsilon_{\perp} \cdot l_0}_{\text{Verbund}} = \underbrace{\varepsilon_m \cdot l_m + \varepsilon_f \cdot l_f}_{\text{Komponenten}}$$

Die Länge des Faserscheibchens lässt sich ersetzen. Mit $l_f = l_0 - l_m$ folgt:

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_m \cdot \frac{l_m}{l_0} + \varepsilon_f \cdot \left(1 - \frac{l_m}{l_0}\right)$$



2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) IX

Pucksches Scheibchenmodell II

3. Elastizitätsgesetze

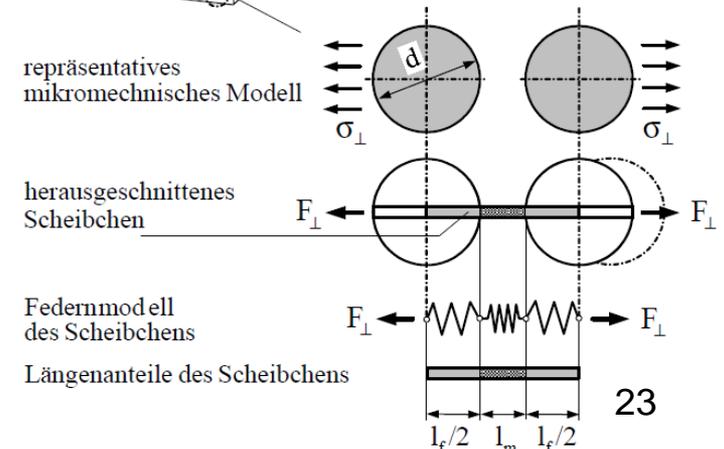
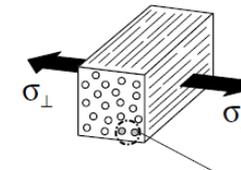
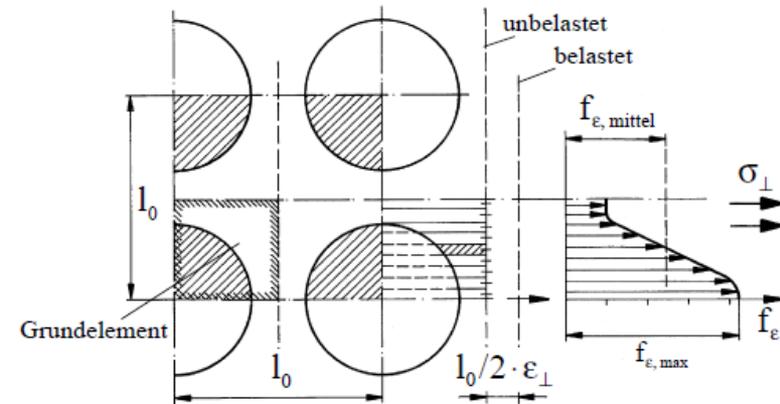
$$\epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_{f\perp}} ; \quad \epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m}$$

$E_{f\perp}$ = Elastizitätsmodul der Faser in Querrichtung

Infolge Reihenschaltung lassen sich die Spannungen der Elastizitätsgesetze eliminieren -> Beziehung zw. äußeren, makroskopischen Querdehnung und der inneren, mikroskopischen Dehnung:

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_m \cdot \left[\frac{l_m}{l_0} + \frac{E_m}{E_{f\perp}} \left(1 - \frac{l_m}{l_0} \right) \right]$$

Ausdruck in eckiger Klammer < 1, da Matrixdehnung > Gesamtdehnung:
Maß wird beschrieben durch Dehnungsvergrößerungsfaktor



2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) X

Pucksches Scheibchenmodell III

3. Elastizitätsgesetze

Dehnungsvergrößerungsfaktor f_ϵ (strain magnification factor):

$$f_\epsilon = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_\perp} = \frac{1}{\frac{l_m}{l_0} + \frac{E_m}{E_{f\perp}} \left(1 - \frac{l_m}{l_0}\right)} > 1$$

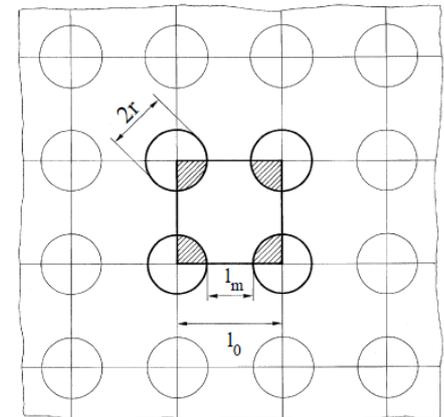
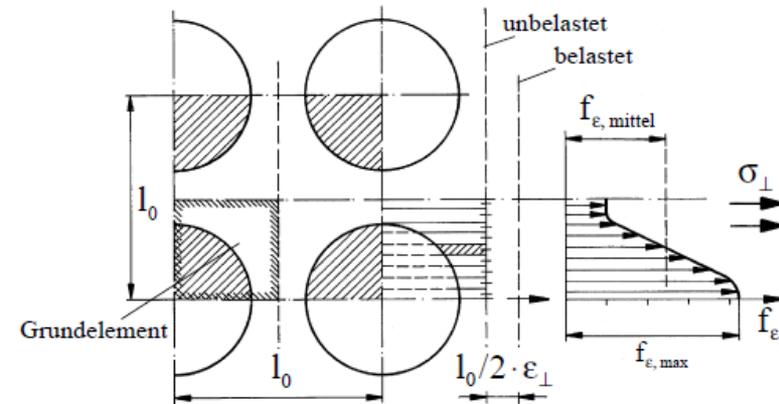
Für quadratische Packung: $l_m = l_0 - 2r$

Länge l_0 nicht direkt angebar, daher durch Faservolumenanteil ersetzt: $\varphi = \pi \cdot r^2 / l_0^2$

Max. Dehnungsvergrößerung einer quadratischen Packung:

$$f_{\epsilon, \text{quadr. max.}} = \frac{1}{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\varphi} \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{f\perp}}\right)}$$

Setzt man Werte für GFK ein, so wird mit einem technisch üblichen Faservolumenanteil $\varphi=0,6$ und dem Verhältnis $E_{f\perp}/E_m=73000/3400$ der Dehnungsvergrößerungsfaktor am mittig herausgeschnittenen „Scheibchen“ zu $f_\epsilon \approx 6$!



Unterschied: makroskopischer und mikroskopische Betrachtungsweise!!

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.2. Zwischenfaserbruch (Zfb) XI

2.2.6. Druckbeanspruchung quer zur Faserrichtung σ_{\perp}

❖ Wirkebene \neq Bruchebene

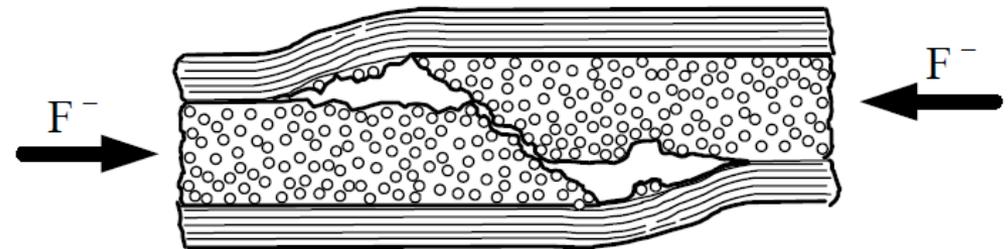
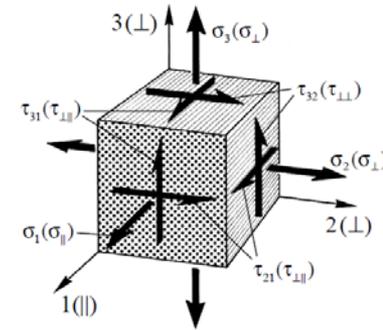
❖ Abscheren unter ca. 53° -> Keilbruch

❖ Wird Druck weiter erhöht, wird MSC aufgesprengt -> Totalversagen des Laminats

❖ Derzeit noch keine Analysemethode zur Berechnung des Keilbruches

❖ Konstruktive Prävention:

- Dickere Schichten vermeiden -> feinschichtig laminieren



Projekt Verbundwerkstoffe und daraus gefertigte Strukturen: Theorie und Anwendung (PJ 0530 L 047)

1. Kodierung eines Laminataufbaus

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen
 - 2.1. Faserbruch

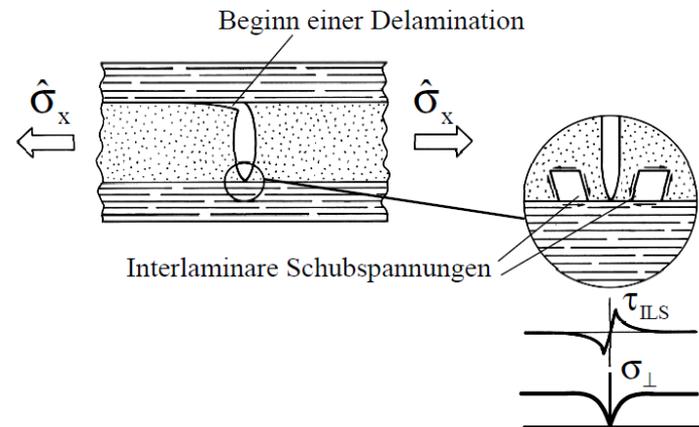
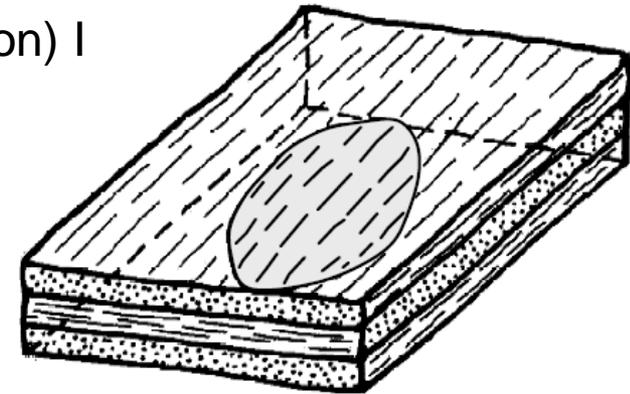
 - 2.2. Zwischenfaserbruch

 - 2.3. Delamination

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.3. Delamination oder Schichtentrennung (delamination) I

- ❖ Aufgrund interlaminarer (= zwischen den Schichten) Spannungen
- ❖ Interlaminare Spannungen:
 - Senkrecht zur Laminebene wirkende Normalspannungen
 - Schubspannungen zwischen den Schichten (interlaminar shear stress = ILS)
- ❖ Ähnlich Zfb aber nicht in UD-Schicht sondern flächige Ausbildung
- ❖ Gravierende Auswirkungen auf Laminat -> Stabilitätsverlust, Verminderung der Reststeifigkeit
- ❖ Zerstörungsfreie Prüfmethode notwendig (Ultraschall, Thermographie)
- ❖ Häufig hervorgerufen durch zunächst durch Zfb

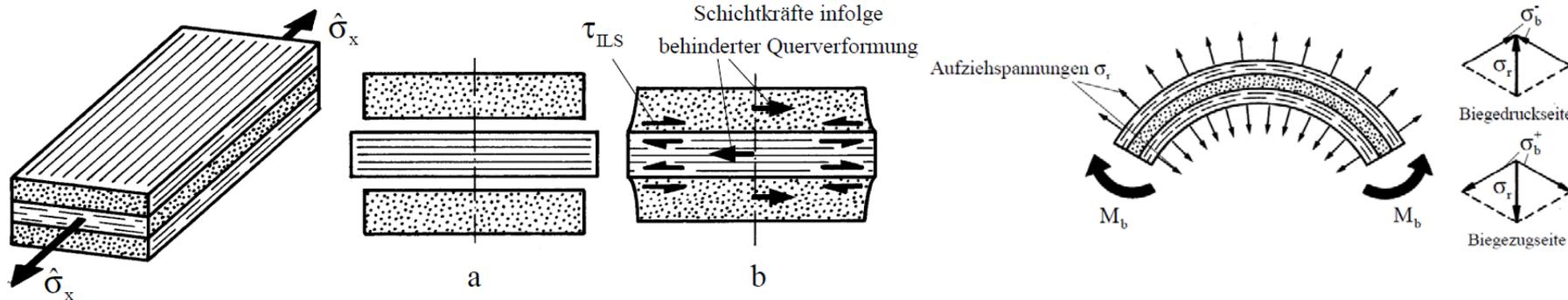
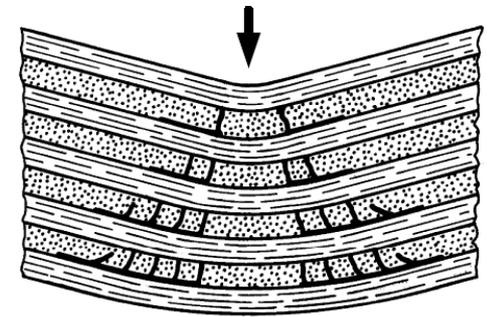


2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.3. Delamination oder Schichtentrennung (delamination) II

Auftreten von Delaminationen:

- ❖ Schlagbeanspruchung (impact): Werkzeug, Vogelschlag, ...
- ❖ An freien Rändern
- ❖ Unter Versteifungselementen
- ❖ Durch radiale Komponente von Aufziehspannungen



Zur Entstehung von interlaminaren Randspannungen, hier am Beispiel eines Kreuzverbunds. Dargestellt sind nur die Rand-Schub- und nicht die Rand- Normalspannungen

a Schichten sind nicht miteinander verbunden und zeigen bei Längsbelastung unterschiedliche hohe Querkontraktionen

b Schichten sind verbunden und behindern sich bzgl. der Querverformung. Es entstehen Schichtkräfte in Querrichtung, die vom spannungsfreien Rand über interlaminare Spannungen aufgebaut werden

2. Versagen von Faserverbundwerkstoffen

2.3. Delamination oder Schichtentrennung (delamination) III

Im 3. Teil der LV:

semi-analytisches Modell einer Platte mit Delamination

