

Werkstofftechnik II

Verbundwerkstoffe

Verfasser:

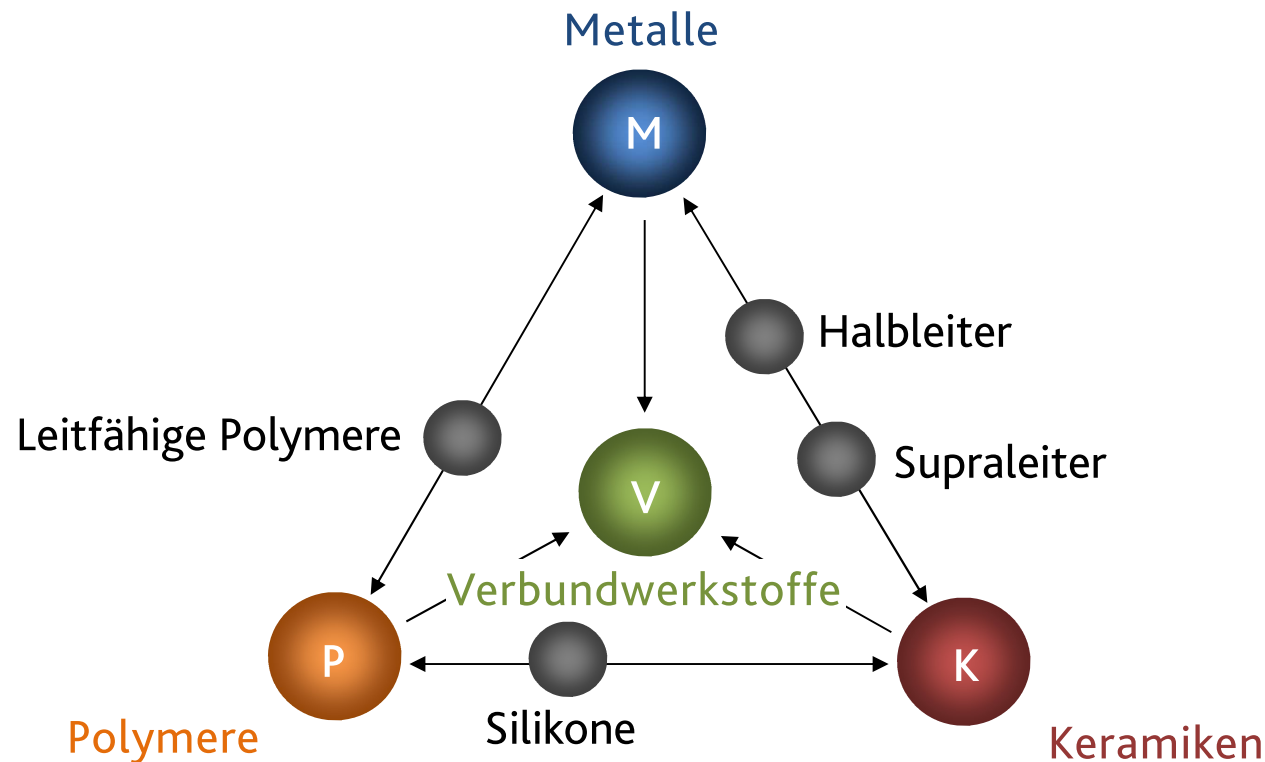
Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Christ

Agenda

- Korrosion und Korrosionsschutz
- Normgerechte Werkstoffkennzeichnung
- Vom Rohstoff zum Bauteil
- Eisenwerkstoffe
- Aluminiumlegierungen
- ...
- **Verbundwerkstoffe**
 - Allgemeines
 - Faserverstärkte Werkstoffe
 - Stahlbeton und Spannbeton
 - Hartmetalle

Werkstoffeinteilung

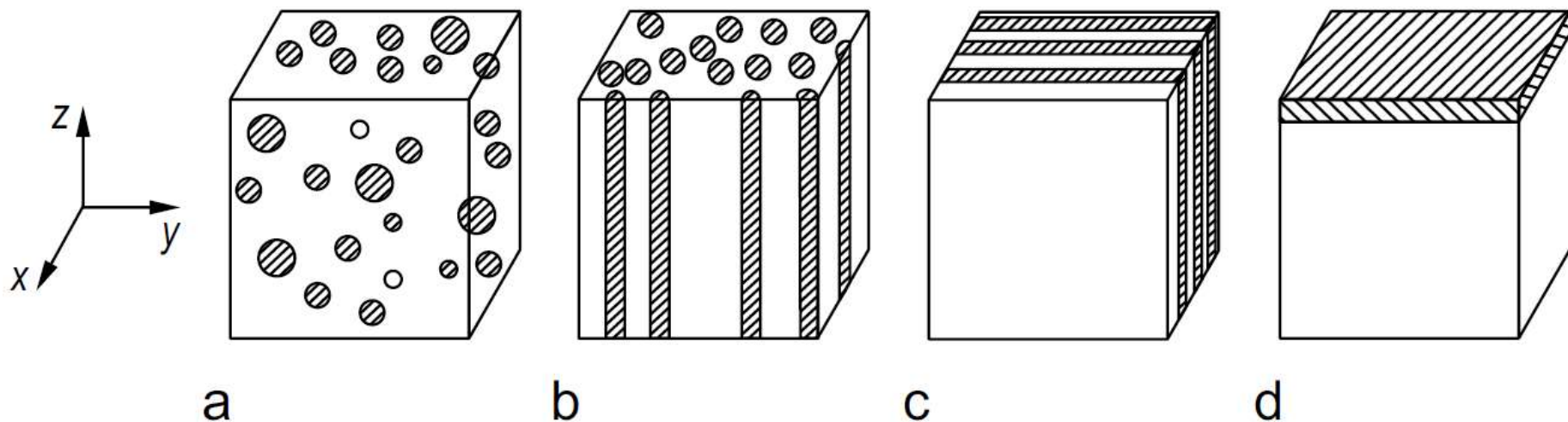
Einteilung nach den charakteristischen Eigenschaften = vier Hauptgruppen und vier Zwischengruppen



Einteilung der Verbundwerkstoffe

Eine Einteilung der Verbundwerkstoffe kann nach der Anordnung der beiden Komponenten vorgenommen werden:

- a) Isotropes Gefüge, z.B. Hartmetalle
- b) Faserverbund-Werkstoffe, z.B. glasfaserverstärkte Kunststoffe
- c) Schichtverbunde, z.B. Sicherheitsglas
- d) Oberflächenbeschichtung, z.B. TiN-Beschichtung auf Bohrern



Vorteil der Verbundwerkstoffe

Häufiges Ziel: Entwicklung von Werkstoffkombinationen mit günstiger spezifischer Festigkeit (Festigkeit/Dichte), hoher Warmfestigkeit oder besonderen Eigenschaften der Oberfläche.

⇒ Phasen des Kohlenstoffs und die keramischen Verbindungen aus Elementen mit niedriger Ordnungszahl (Al_2O_3 , SiC, B)

Nachteil dieser Stoffe: geringe plastische Verformbarkeit und große Kerb- und Mikrorissempfindlichkeit.

Lösungsweg: Vermeidung von Mikrorissen durch Verwendung von dünnen Fasern mit atomar ebenen Oberflächen (hohe Festigkeit), die in eine plastisch verformbare Grundmasse eingebettet werden.

Allgemeines

Diese Werkstoffe werden in der Technik deshalb gern benutzt, weil durch Anpassung der Dichte und **Orientierung** der Fasern an die Belastung ein „maßgeschneidertes“ Bauteil erstellt werden kann (z.B. Flugzeugbau, Sportgerät, Hubschrauberrotor). Häufigste Anwendung finden faserverstärkte Kunststoffe (GFK, CFK). Grundsätzlich sind aber Kombinationen aller Werkstoffgruppen möglich.

Grundmasse	Faser	Beispiel
Keramik	Metall	Spannbeton
Metall	Keramik	Al ₂ O ₃ -faserverstärktes Al
Metall	Kunststoff	hartfaserverstärktes Al
Kunststoff	Metall	metallfaserverstärkter Gummi
Keramik	Kunststoff	kunststoffgebundener Beton
Kunststoff	Keramik	glasfaserverstärkter Kunststoff

Anisotropie von faserverstärkten Werkstoffen

Zur Verdeutlichung der starken Anisotropie der Eigenschaften von faserverstärkten Werkstoffen, soll der Elastizitätsmodul E des Verbundes betrachtet werden. Es wird stark vereinfachend vorausgesetzt, dass die Fasern ideal haften und die Komponenten (Faser β und Matrix α) sich linear elastisch verhalten.

Fall a: Beanspruchung senkrecht zur Faserrichtung

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\beta} = \sigma$$

Für die Dehnung gilt mit den Volumenanteilen f_{α} , f_{β} :

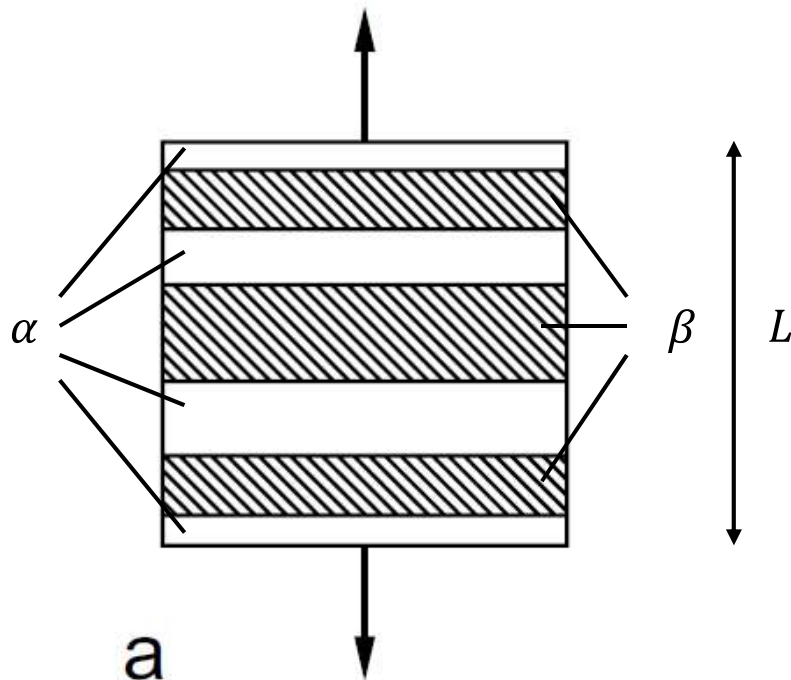
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_{\alpha} + \Delta L_{\beta}}{L} = f_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} + f_{\beta} \varepsilon_{\beta}$$

Dividieren mit σ :

$$\frac{\varepsilon}{\sigma} = f_{\alpha} \frac{\varepsilon_{\alpha}}{\sigma_{\alpha}} + f_{\beta} \frac{\varepsilon_{\beta}}{\sigma_{\beta}}$$

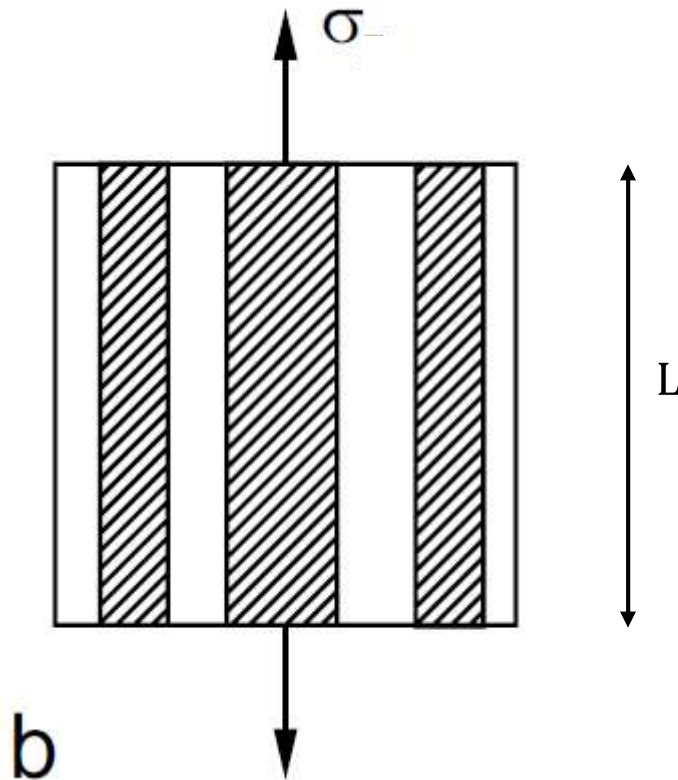
Damit folgt:

$$\frac{1}{E_{\perp}} = \frac{f_{\alpha}}{E_{\alpha}} + \frac{f_{\beta}}{E_{\beta}} \quad \text{bzw.} \quad E_{\perp} = \frac{E_{\alpha} E_{\beta}}{E_{\alpha} f_{\beta} + E_{\beta} f_{\alpha}}$$



$$\varepsilon_{\alpha/\beta} = \frac{\Delta L_{\alpha/\beta}}{L_{\alpha/\beta}} = \frac{\Delta L_{\alpha/\beta}}{f_{\alpha/\beta} \cdot L}$$

Anisotropie von faserverstärkten Werkstoffen



$$\sigma_{\alpha/\beta} = \frac{F_{\alpha/\beta}}{A_{\alpha/\beta}} = \frac{F_{\alpha/\beta}}{f_{\alpha/\beta} \cdot A}$$

Fall b: Beanspruchung parallel zur Faserrichtung

$$\varepsilon_{\alpha} = \varepsilon_{\beta} = \varepsilon$$

Analog zu Fall a gilt nun:

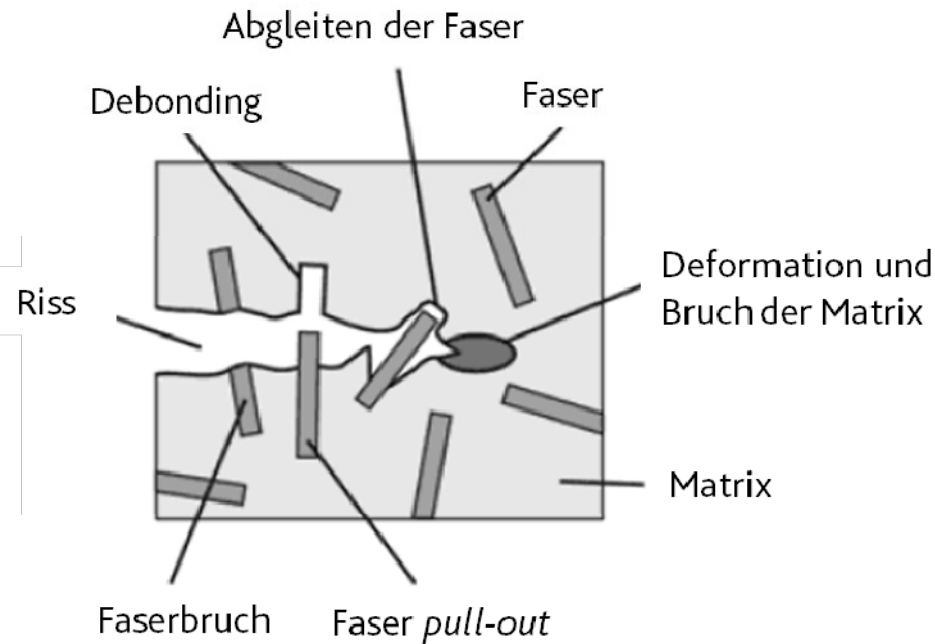
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F_{\alpha} + F_{\beta}}{A} = \sigma_{\alpha} f_{\alpha} + \sigma_{\beta} f_{\beta}$$

Somit folgt durch Division mit ε :

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha}} f_{\alpha} + \frac{\sigma_{\beta}}{\varepsilon_{\beta}} f_{\beta} \quad \text{bzw.} \quad E_{||} = E_{\alpha} f_{\alpha} + E_{\beta} f_{\beta}$$

Bei nicht durchlaufenden Fasern muss berücksichtigt werden, dass die Spannungen in den Fasern durch Schubspannungen in der Faser Grenzfläche übertragen werden. Bei guter Haftung kommt es zum Faserbruch bevor ein Abscheren der Grenzfläche einsetzt.

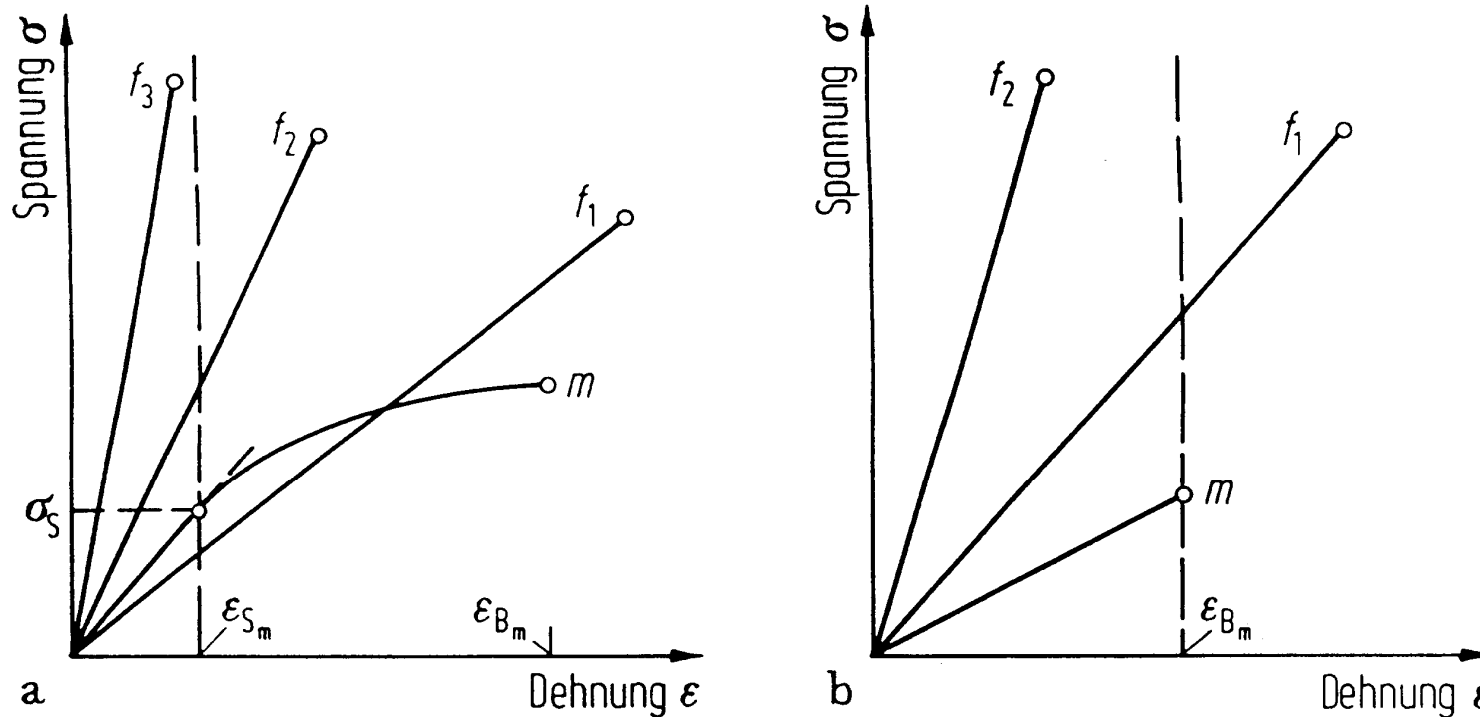
Schädigungsmechanismen



Schematische Darstellung der in Faserverbunden auftretenden Schädigungsmechanismen

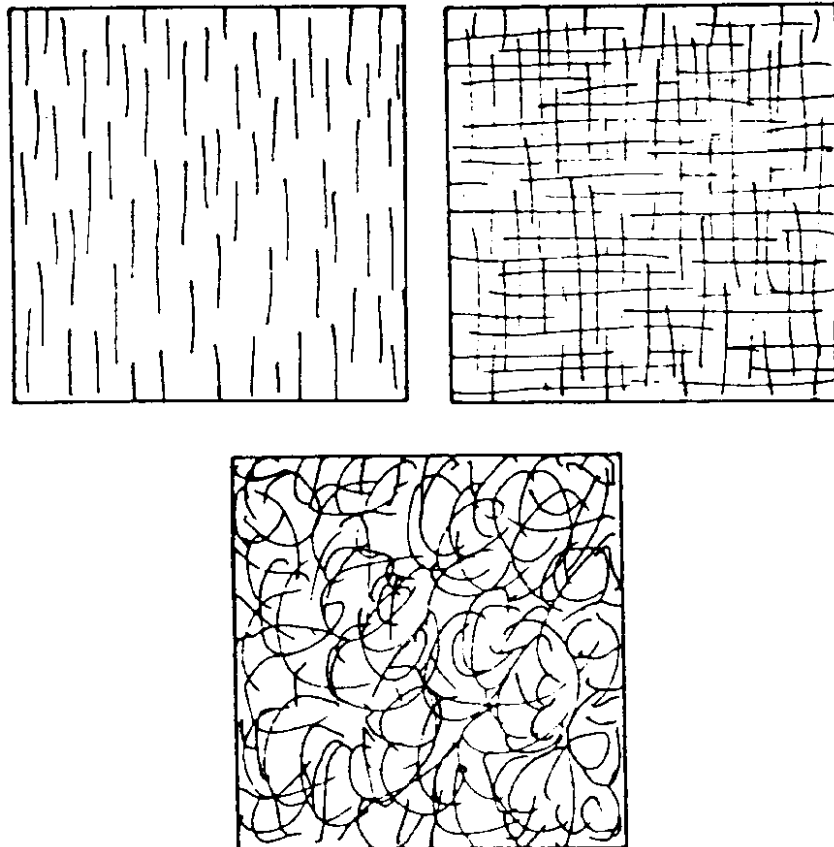
- Die Eigenschaften des Verbundes werden durch die drei mikrostrukturellen Komponenten Polymermatrix, Faser und die Grenzfläche (Interface) zwischen beiden Komponenten bestimmt.
- Der Bruch beginnt mit Mikroholraumbildung bzw. Mikrorissen, und hängt von den verschiedenen mikromechanischen Mechanismen ab:
 - Deformation und Bruch der Matrix (Sprödbbruch, duktiler Bruch),
 - Abgleiten der Faser in der Ablösregion (Riss umläuft Faser),
 - Faser/Matrix Ablösung (*debonding*),
 - Herausziehen von Faser aus der Matrix mit und ohne Matrixfließen (*pull-out*),
 - Faserbruch.

Spannungs-Dehnungsverhalten (Beanspruchung in Faserrichtung)



Je nach Elastizitätsmodul der Faser f_i und Bruchdehnung von Faser und Matrix m lassen sich verschiedene Fälle unterscheiden:

- Im Fall a liegt eine spröde Faser in einer plastisch verformbaren Matrix vor. Die Faser 2 und 3 würden vor der Matrix reißen.
- Im Fall b verhält sich auch die Matrix spröde. Die Faser 2 reißt, bevor die Bruchdehnung der Matrix erreicht ist, während bei Faser 1 die Matrix zuerst bricht.

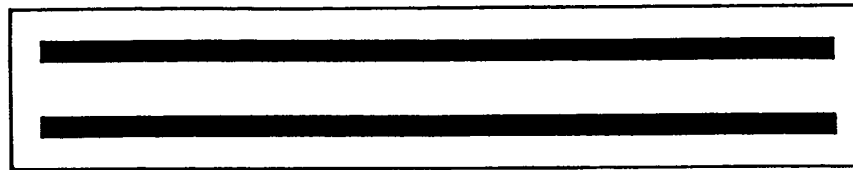


Als Fasermaterial kommt infrage:

- Haarkristalle (Whisker) aus Keramik und Metallen
- Keramische Fasern, z.B. Kohle-, Bor- und Korundfasern
- Fasern aus Legierungen mit hoher Festigkeit
- Glasfasern
- Organische Kettenmoleküle

Je nachdem, ob isotrope oder anisotrope Eigenschaften gewünscht werden, werden die Fasern uniaxial, biaxial oder regellos verteilt angeordnet.

Beton besitzt zwar eine gute Druckfestigkeit, die Zugfestigkeit ist aber sehr gering. Die Anwendbarkeit von Beton kann sehr erweitert werden, wenn man ihn mit einem Werkstoff verbindet, der eine gute Zugfestigkeit besitzt. Am günstigsten ist dafür Stahl geeignet.



Prinzip des Stahlbetons

Stahlbeton

Die statische Auslegung des Stahlbetons geht von einer Festigkeit des Betons von null aus. Der Elastizitätsmodul von Stahl ($\approx 200 \text{ GPa}$) ist höher als der von Beton (bis 50 GPa). Der Elastizitätsmodul des Stahlbetons errechnet sich aus:

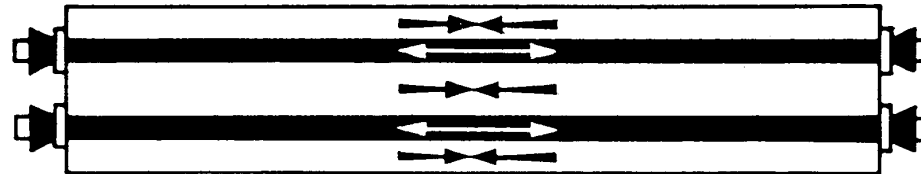
$$E_{\text{Zug}} = E_{\text{St}} f_{\text{St}} + E_{\text{Beton}} f_{\text{Beton}}$$

Die Belastungsgrenze im Zug wird durch die Dehnfähigkeit des Betons bestimmt und liegt bei etwa $0,02\%$. Dies entspricht einer Spannung im Stahl von:

$$\sigma_{\text{St}} = E_{\text{St}} \cdot \varepsilon_{\text{Beton}} = 210 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 42 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

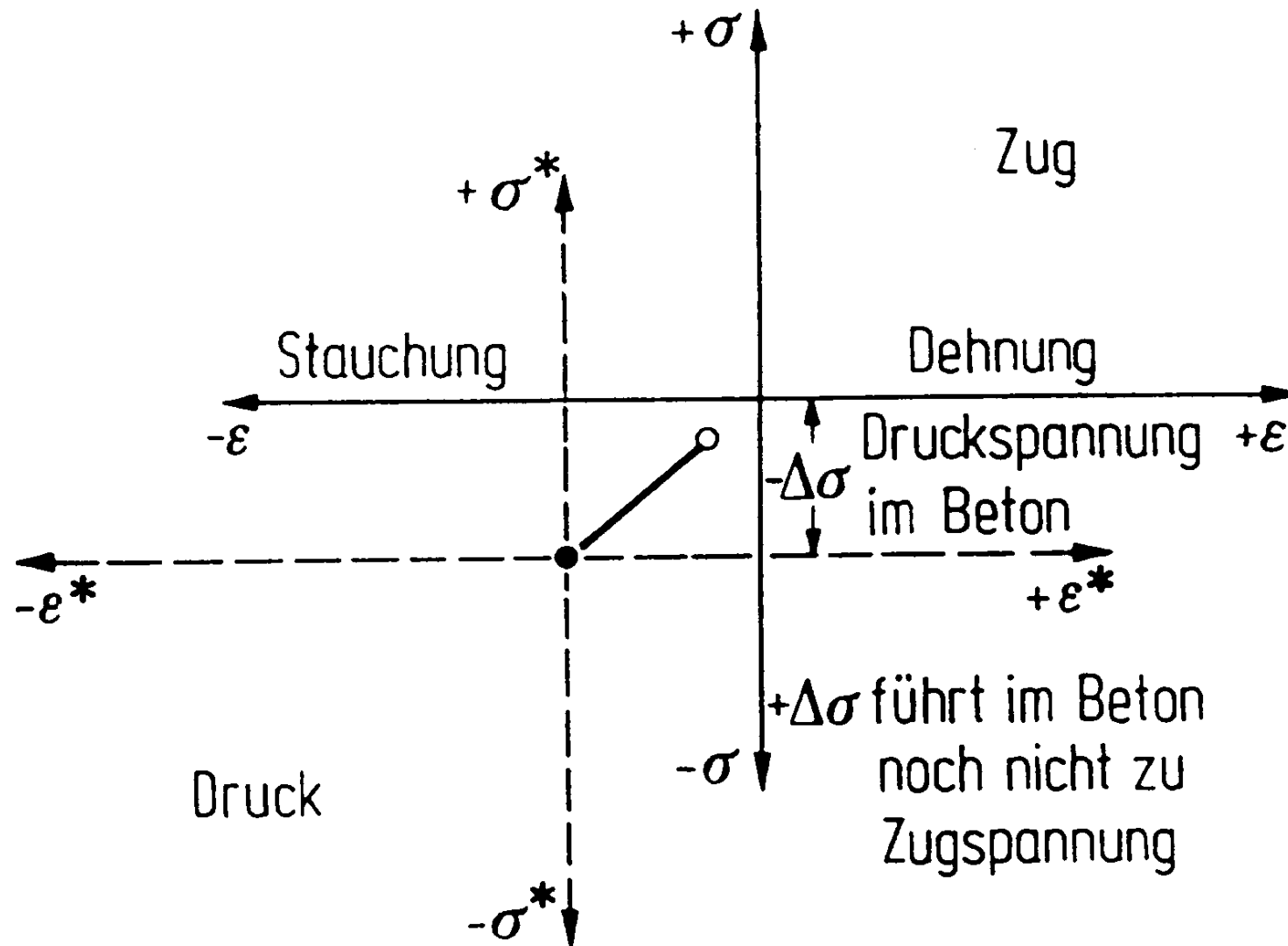
Dieser Wert liegt weit unter der Streckgrenze eines Baustahles (z.B. St 37: $\approx 300 \text{ N/mm}^2$).

Ein weitere deutliche Verbesserung der Belastbarkeit im Zug wird dadurch erreicht, dass der Beton in Beanspruchungsrichtung in Druck vorgespannt wird.



Da bei **Spannbeton** im Beton starke Druckspannungen herrschen, können äußere Zugbelastungen ertragen werden, ohne dass der Beton zugbeansprucht wird.

Zur Erzeugung der Vorspannung werden Stäbe, Seile oder Drähte aus hochfestem Stahl vorgespannt ($\approx 1000 \text{ N/mm}^2$).



Allgemeines

Es handelt sich bei Hartmetall um eine Gemisch aus einer metallischen Phase (meist weniger als 20%), die als Matrix dient, und darin eingebettete Teilchen aus dem Karbid eines Übergangsmetalls. Diese Karbide besitzen eine hohe Härte und Schmelztemperatur (kovalenter Bindungsanteil!).

Stoff	TiC	VC	Cr ₃ C ₂	ZrC	NbC	Mo ₂ C	HfC	TaC	WC
<i>T</i> °C	3140	2830	1895	3530	3500	2400	3890	3780	2600
<i>HV</i>	3200	2950	2280	2560	2400	1950	2700	1790	2180

Aus wirtschaftlichen Gründen werden meist TiC, WC oder Mischkarbide benutzt. Die weiche metallische Matrix - meist Co - dient als Bindemittel für die harten Teilchen.

Es resultiert ein Werkstoff, der hohe Härte, Abriebfestigkeit, Festigkeit bei hoher Temperatur (durch die Keramik) mit einer gewissen Duktilität und Temperaturwechselbeständigkeit (durch die Verformbarkeit der metallischen Phase) kombiniert.

Allgemeines

Stoff	HV
Diamant	8000
Borkarbid	3700
Siliziumkarbid	3500
Wolframkarbid WC	2200
Hartmetalle	~1500
gehärteter Stahl	~ 900
Baustahl FE 360	~ 100

Hartmetalle eignen sich besonders für Anwendungen, bei denen eine hohe Verschleißfestigkeit gefragt ist, z.B. Werkzeuge für spanabhebende Formgebung bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. Die Herstellung der Hartmetalle erfolgt durch Sintern.