

| Datum                                                | Titel / Inhalt                                                                        |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 29.10.13                                             | Einleitung / Erforderliche Grundlagen                                                 |
| 05.11.13                                             | Verhalten in der Schmelze                                                             |
| 12.11.13                                             | Verhalten als Festkörper                                                              |
| <b>19.11.13</b>                                      | <b>Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften /<br/>Kunststoffaufbereitung</b> |
| 26.11.13                                             | Einflüsse auf die Eigenschaften                                                       |
| 03.12.13                                             | Einführung in die Extrusion                                                           |
| 17.12.13                                             | Einführung in das Spritzgießen                                                        |
| <i>Vorlesungsfreie Zeit: 23.12.13 bis 06.01.14</i>   |                                                                                       |
| 07.01.14                                             | Verarbeitung von vernetzenden Formmassen / Faserkunststoffverbunde                    |
| 14.01.14                                             | Einführung in die Weiterverarbeitung                                                  |
| 21.01.14                                             | Einführung in das Konstruieren mit Kunststoffen                                       |
| 28.01.14                                             | Kunststoffe und Umwelt                                                                |
| <i>Prüfungsvorbesprechung; Prüfung am 13.02.2014</i> |                                                                                       |

**Bestehen Fragen zur vorherigen Vorlesung?**



# Kunststofftechnik

## Werkstofftechnik - Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch Zusatzstoffe

Institut für Kunststofftechnik  
Böblinger Straße 70  
70199 Stuttgart

## Nach dieser Veranstaltung sollten Sie...

- Die wichtigsten Faser- und Matrixtypen benennen und beschreiben,
- aus den mechanischen Eigenschaften von Faser und Kunststoff die mechanischen Eigenschaften des Verbunds berechnen,
- Defekte in Faserkunststoffverbunden beschreiben und
- verschiedene andere Zusatzstoffe und deren Funktion benennen

... können

- Nur wenige Polymere sind, so wie die Synthese sie liefert, verarbeitet- und verwendbar
- Erforderlich ist mindestens ein Schutz gegen Wärme- und Sauerstoffeinwirkung sowie andere Umweltbedingungen, die zum Beispiel bei der Lagerung auftreten können.
- Außerdem erfordert die jeweilige Anwendung dieser Materialien eine mehr oder weniger große Anzahl von Zusatzstoffen, welche die mechanischen Eigenschaften, die physikalischen Eigenschaften, die Verarbeitbarkeit oder das Aussehen beeinflussen.

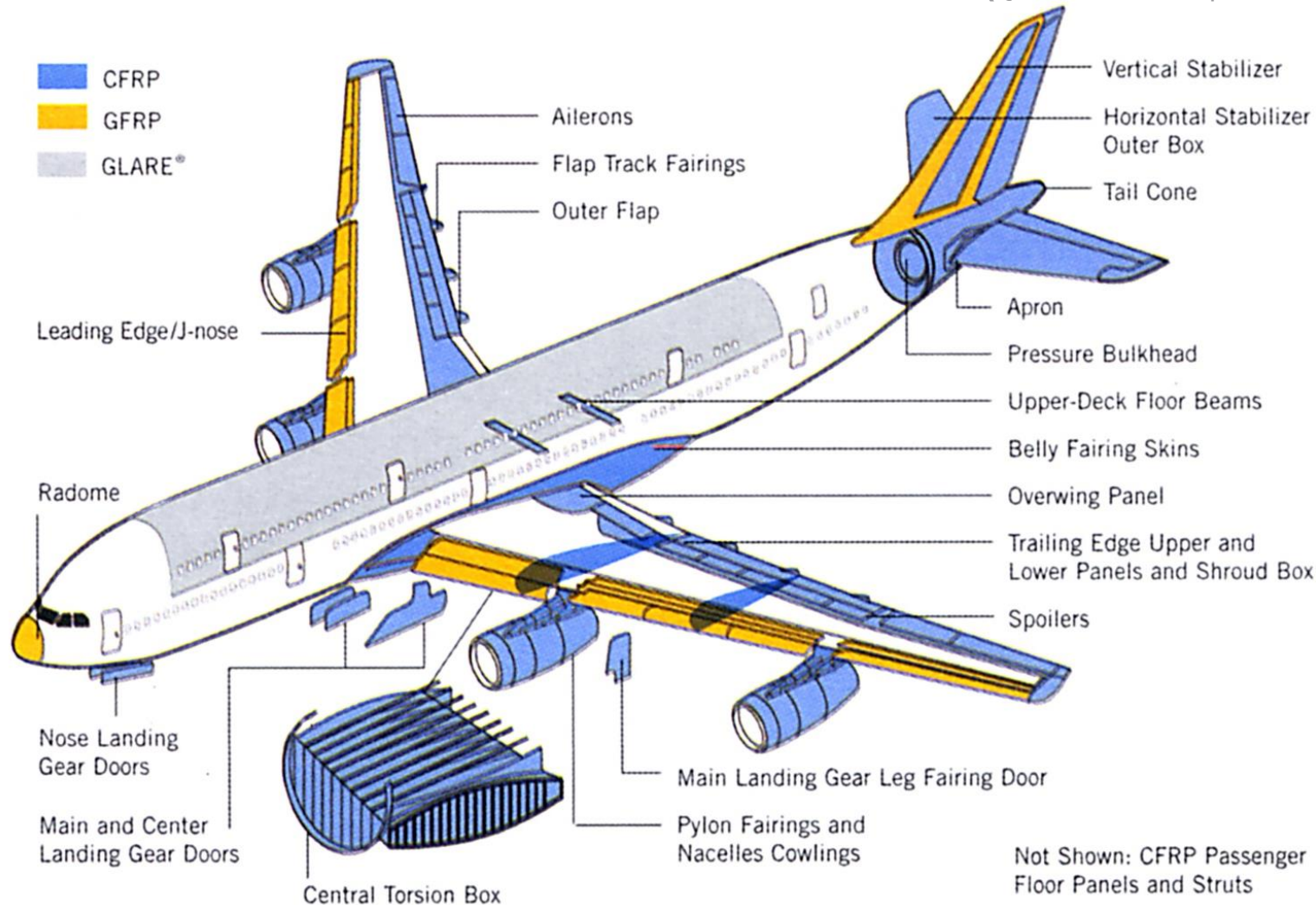
## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)

# Wo findet man Faserkunststoffverbunde?

Luftfahrt

## Airbus A380: > 22 % Gewichtsanteil an FKV (Quelle: JEC-Composites April 2004 S. 98)



# Wo findet man Faserkunststoffverbunde?

Windenergie



- Bis zu 70 m lang
- Endlosfaserverstärkte Kunststoffe
- Glasfasern + Duromer günstig
- Verarbeitung teuer

# Wo findet man Faserkunststoffverbunde?

Automobilbau

## BMW M3 Dach

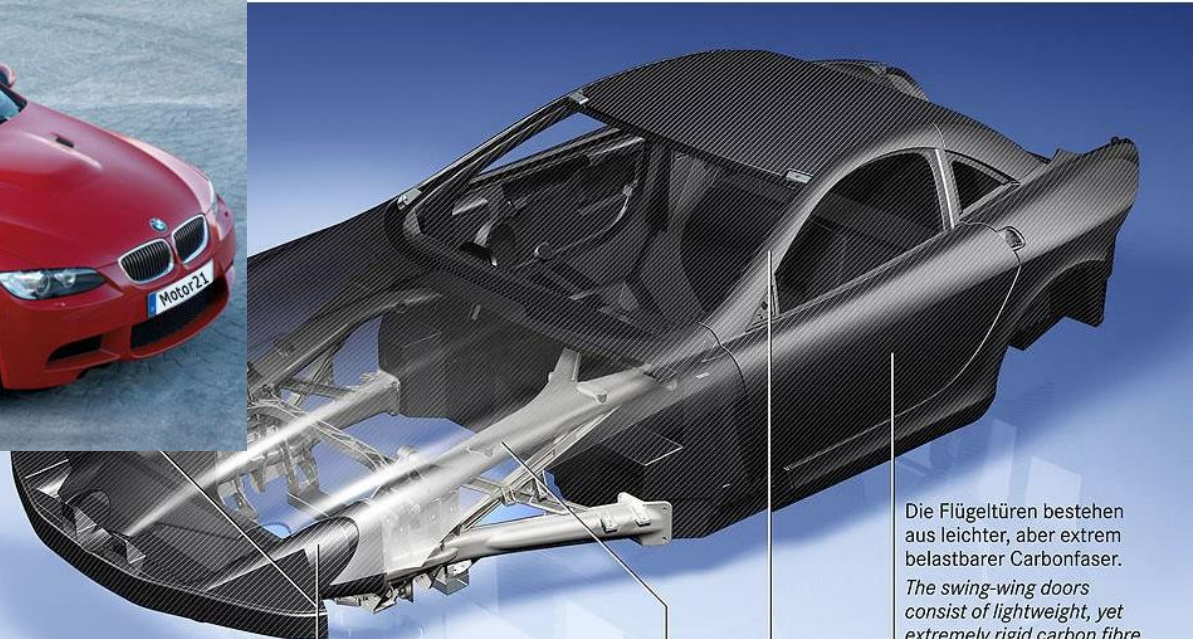


- Nur in Kleinserien
- Zukunft: Serienfahrzeuge auf Basis CFK (z.B. BMW i3)

Zwei 620 Millimeter lange CFK-Längsträger nehmen beim Frontalcrash die Aufprallenergie auf.  
*Two 620-millimetre long carbon-fibre-reinforced plastic longitudinal members absorb impact energy in a front-end crash.*

© Focus-online

## Mercedes SLR Komponenten



Der Motorträger besteht aus Aluminium-Sandguss und trennt die vorderen Aufprallzonen von der Fahrgastzelle.  
*The engine carrier is made of sand-cast aluminium and separates the front impact zones from the passenger compartment.*

Die Flügeltüren bestehen aus leichter, aber extrem belastbarer Carbonfaser.  
*The swing-wing doors consist of lightweight, yet extremely rigid carbon fibre.*

Die Fahrgastzelle wird komplett aus Carbonfaser hergestellt, die beim Frontal-, Seiten- oder Heckaufprall einen sehr sicheren Überlebensraum bietet.  
*The passenger compartment is made entirely of carbon fibre, which provides a very safe survival space in the event of a frontal, lateral or rear-end impact.*

# Wo findet man Faserkunststoffverbunde?

Freizeit



Glasfaser-Bootsrumpf

“Carbon”-Fahrradrahmen

Komplett-CFK Motorsegler “FS35”  
der AKAFlieg Uni Stuttgart



## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)

Anorganisch (Glas, Basalt) oder organisch (Kohlenstoff, Aramid, Natur),  
Einzelfilamente  $\varnothing$  5 – 50  $\mu\text{m}$

Nach Länge:

- Kurzfasern: 0,1 - 0,5 mm ( $l/d > 10$ , geringste Kraftübertragung)
- Langfasern: 0,5 - 50 mm ( $l/d > 1000$ )
- Endlosfasern ( $l/d \rightarrow \infty$ , höchste Kraftübertragung)

Vorkommen:

- Einzelne Faser: Filament ( $\varnothing$  5 – 50  $\mu\text{m}$ )
- Faserbündel: Roving (Einheit Tex; 1 Tex = 1 g pro 1000 Meter, oder Anzahl Filamente)
  - Automobilindustrie: 24K (=24000 Filamente pro Roving) bis 50K
  - Standard: 3K bis 12K
  - Raumfahrt: 1K (sehr teuer)
- Textilien: Vliese, Matten, (Multiaxial-) Gelege, Gewebe, Geflechte, etc.

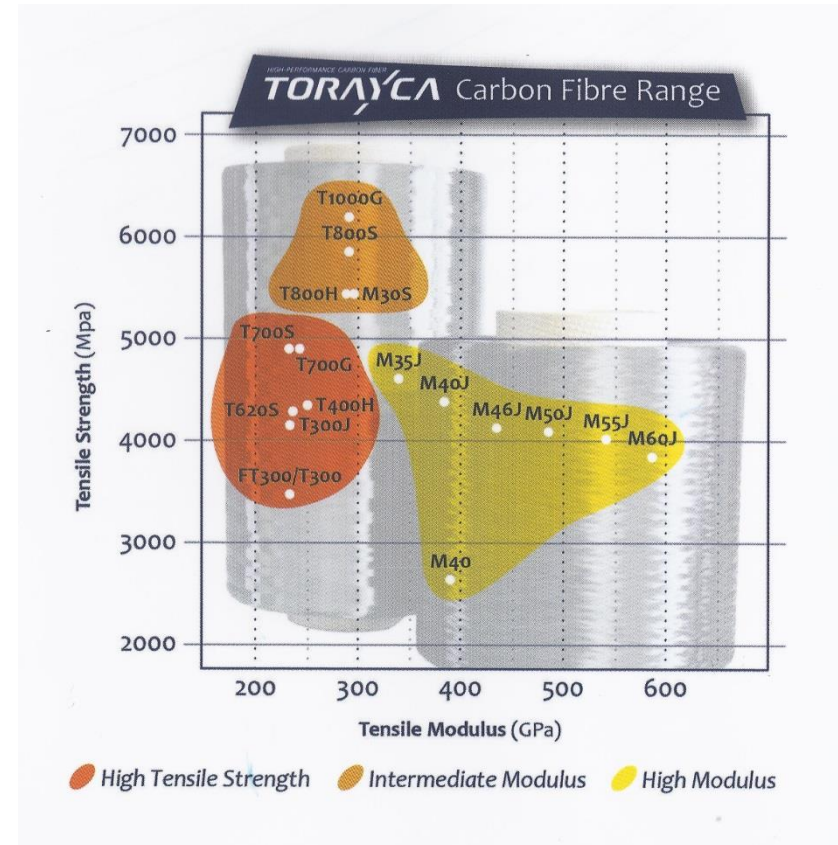
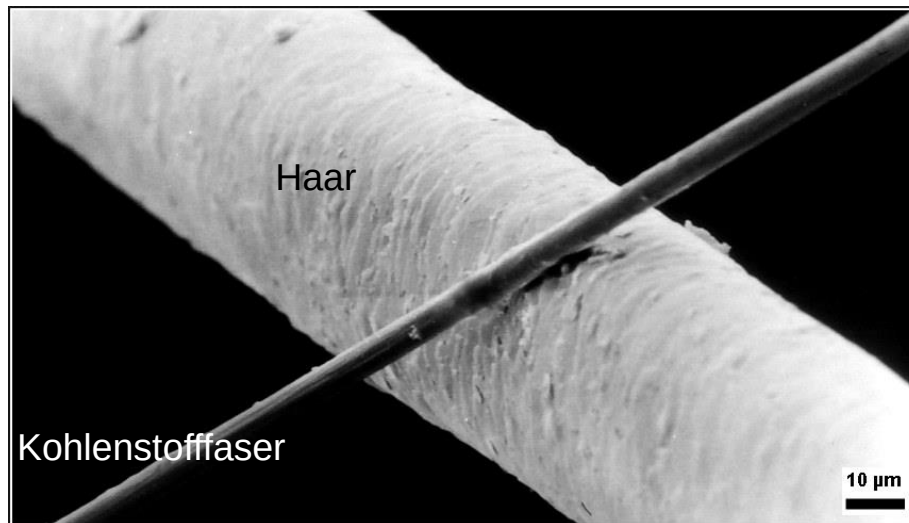
### Glas

- E-Modul  $\sim 70 \text{ GPa}$
- Festigkeit  $\sim 3 - 4 \text{ GPa}$
- Bruchdehnung  $\sim 4,5 \%$
- Dichte  $\sim 2,5 \text{ g/cm}^3$
- Preis  $1,5 \text{ €/kg}$
- wärmeformbeständig



### Kohlenstofffaser

- E-Modul ~ 250 - 600 GPa
- Festigkeit ~ 3 - 7 GPa
- Bruchdehnung ~ 0,5 - 1,5 %
- Dichte ~ 1,8 g/cm<sup>3</sup>
- Preis 20 - 1000 €/kg
- elektrisch leitfähig



Je nach Herstellungsprozess variieren die Eigenschaften stark zwischen Steifigkeit und Festigkeit

### Aramid (aromatische Polyamide; Handelsname z.B. Kevlar®, Nomex)

- E-Modul ~ 70 - 190 GPa
- Festigkeit ~ 3 - 3,5 GPa
- Bruchdehnung ~ 2 - 4 %
- Dichte ~ 1,44 g/cm<sup>3</sup>



Aramid/Kohlenstofffaser-Gewebe

### Basalt

- E-Modul ~ 90 GPa
- Festigkeit ~ 3 GPa
- Bruchdehnung ~ 3 %
- Dichte ~ 2,67 g/cm<sup>3</sup>
- Preis ~ 1,7 €/kg



Basaltgestein: ein natürlicher Rohstoff

### Vorteile

- nachhaltige Ressourcennutzung,
- preiswerter Rohstoff,
- gute thermische und stoffliche Wiederverwertbarkeit,
- arbeitsmedizinische Vorteile bei Verarbeitung und Entsorgung.

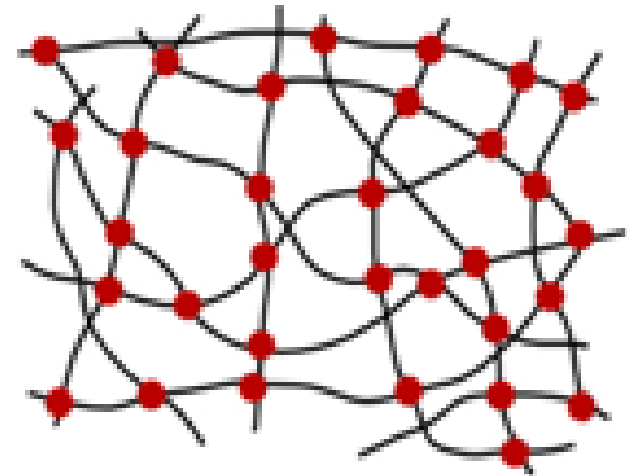
### Nachteil

- Niedrige mechanische Eigenschaften
- Stark wechselnde Eigenschaften je nach Herkunft und Wachstumsbedingungen

| Material                      | Dichte<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | E-Modul<br>[GPa] | Spezifischer E-Modul<br>[GPa/g/cm <sup>3</sup> ] | Zugfestigkeit<br>[GPa] | Bruchdehnung<br>[%] | T <sub>max</sub><br>[°C] |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| E-Glas<br>(2-3 €/kg)          | 2,55                           | 70               | 27                                               | 3,4                    | 4                   | 300-350                  |
| Kohlenstoff<br>(25-1000 €/kg) | 1,75                           | 275-400          | 157-230                                          | 3-5,7                  | 0,5-3               | 600                      |
| Naturfasern<br>(0,5 €/kg)     |                                |                  |                                                  |                        |                     |                          |
| Hanf                          | 1,45                           | 70               | 48                                               | 0,6                    |                     | 200                      |
| Flachs                        | 1,48                           | 30               | 20                                               | 0,75                   |                     | 200                      |
| Jute                          | 1,3-1,5                        | 55               | 36-42                                            | 0,55                   |                     | 200                      |
| Sisal                         | 1,45                           | 20               | 14                                               | 0,6                    |                     | 200                      |

### Varianten

- Epoxidharze:  
größte Verbreitung, beste mechanische Eigenschaften
- Phenolharze:  
ältestes verwendetes Duromer (Bakelite®)
- Spezialfälle:  
Bismaleinimidharze, Polyimidharze
- kostengünstig:  
ungesättigte Polyester, Vinylester



### Vorteil

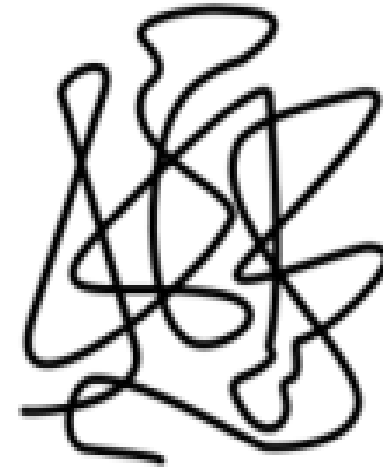
- Vor der Vernetzung niedrigviskos, daher exzellente Faserdurchtränkung

### Varianten

- amorph:  
PVC, PS, PMMA, PEI, PES, PC
- teilkristallin:  
PE, PB, PP, PA, PEEK

### Eigenschaften

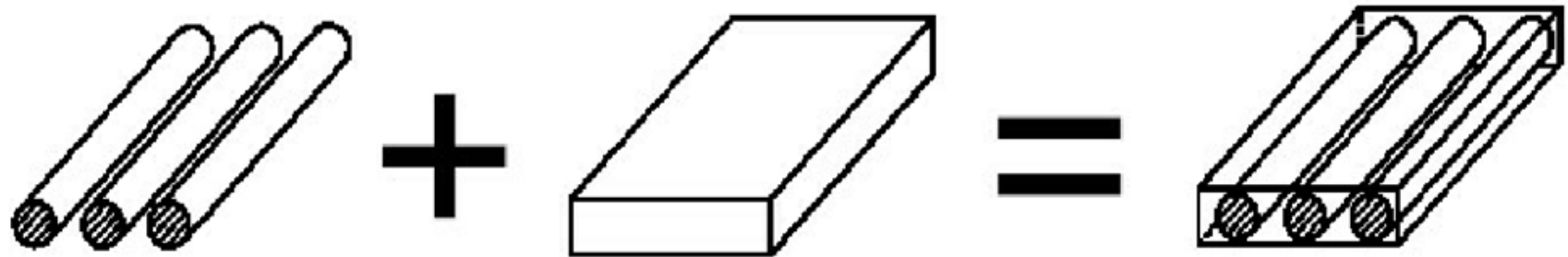
- geringere Festigkeiten als Duromere
- Dehnfähigkeit erlaubt Energieaufnahme (Zähigkeit)
- nicht niedrigviskos, daher eingeschränkte Faserdurchtränkung
- Trend zu thermoplastischen Matrixsystemen wegen geringen Zykluszeiten, Schweißbarkeit, Recyclebarkeit
- Forschung am IKT: Polymerisation von Polyamid nach Durchtränken von Fasern durch das Monomer  $\epsilon$ -Caprolactam noch während des Prozesses (In-situ-Polymerisation)



- Zählen Sie verschiedene Fasertypen auf! Erläutern Sie die Vor- und Nachteile von Glasfasern.
- Zählen Sie verschiedene Matrixsysteme auf! Erläutern Sie die Vor- und Nachteile von Duromeren als Matrix.

## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)



## Fasern

- Sehr gute mechanische Eigenschaften
- Richtungs**abhängig** (**anisotrop**)
- ungeschützt, lose

## Kunststoff-Matrix

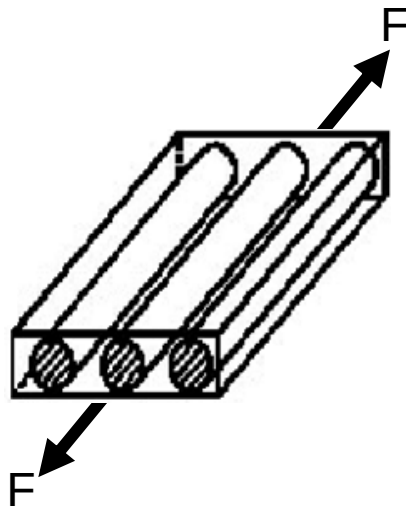
- Schlechte mechanische Eigenschaften
- Richtungs**unabhängig** (**isotrop**)

## Faserkunststoffverbund

- Sehr gute mechanische Eigenschaften, dominiert von Fasern
- Richtungs**abhängig** (**anisotrop**)

Beispiel aus der Natur: Holz

### Mischungsregel



E-Modul der Faser in Lastrichtung

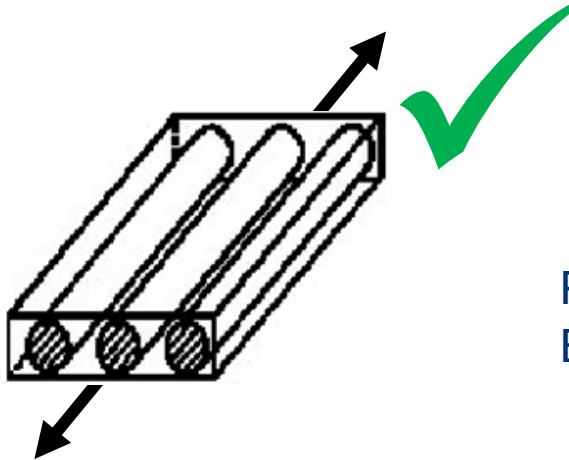
$$E_{\text{Lage}_{\parallel}} = \varphi E_{F_{\parallel}} + (1 - \varphi) E_M$$

E-Modul der Matrix

Faservolumengehalt  $\varphi = \frac{V_{\text{Faser}}}{V_{\text{gesamt}}}$  ; typischer Wert 40 – 65 %

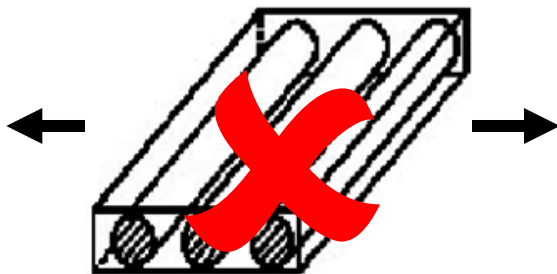
Voraussetzung: perfekte Haftung zwischen Faser und Matrix (→ Haftvermittler)

### Mischungsregel



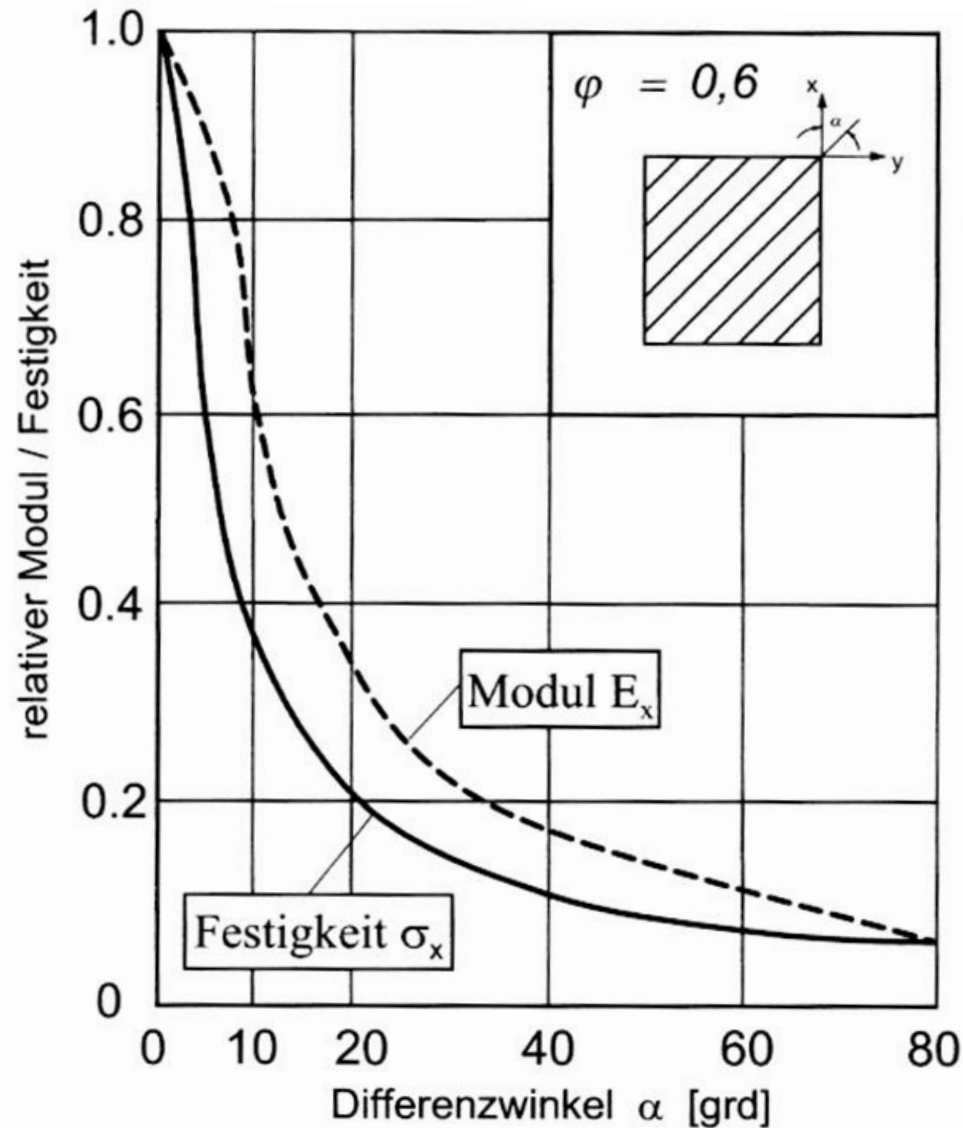
$$E_{\text{Lage}_{\parallel}} = \varphi E_{F_{\parallel}} + (1 - \varphi) E_M$$

Fasern dominieren Werkstoffeigenschaften  
Belastungsfall erwünscht.



$$\frac{1}{E_{\text{Lage}_{\perp}}} = \varphi \frac{1}{E_{F_{\perp}}} + (1 - \varphi) \frac{1}{E_M}$$

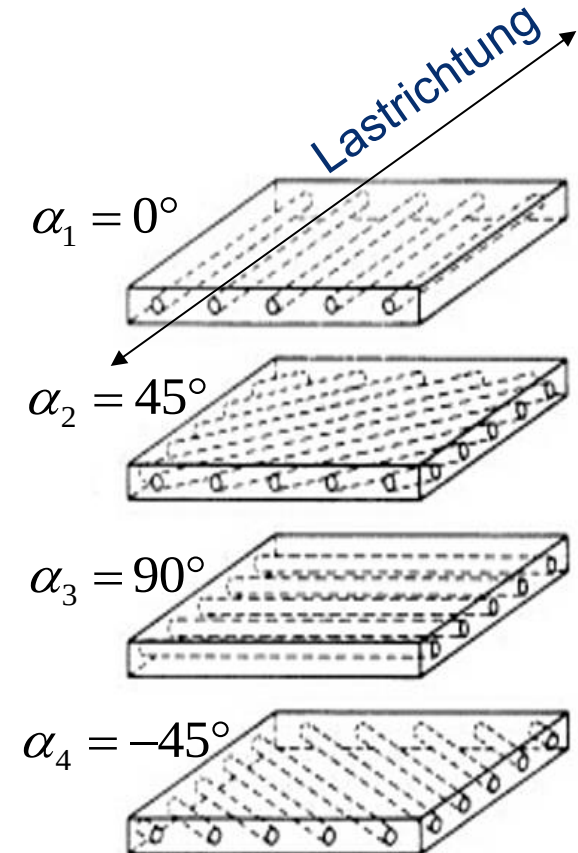
Matrix dominiert Werkstoffeigenschaften  
Belastungsfall ungünstig.



Problem:  $E_{\parallel} \gg E_{\perp}$

Lösung: **Mehrschichtverbund**

- Benennung mit eckigen Klammern, ähnlich wie in der Chemie:  
z.B.  $[0,90]_5$  oder  $[0,30,-30,60,-60]_S$ 
  - Eine Zahl im Index bedeutet eine Wiederholung
  - Ein „S“ im Index steht für Symmetrisch. Hier ist eine Symmetrieebene
- Bezugsrichtung ist immer parallel zu  $0^\circ$
- $[0,45,-45,90]_S$  wird auch als quasiisotrop bezeichnet.



Wie berechnet man die Elastizität eines Mehrschichtverbundes (für eine bestimmte Lastrichtung)?

Bekannte Elastizitätsmoduln:

$$E_{\text{Lage}_{\parallel}} = \varphi E_{F_{\parallel}} + (1 - \varphi) E_M \quad (\text{Parallelschaltung})$$

$$\frac{1}{E_{\text{Lage}_{\perp}}} = \varphi \frac{1}{E_{F_{\perp}}} + (1 - \varphi) \frac{1}{E_M} \quad (\text{Reihenschaltung})$$

Lage mit Verdrehwinkel:

$$E_i = E_{\text{Lage}_{\parallel}} \cos^4(\alpha_i) + E_{\text{Lage}_{\perp}} \sin^4(\alpha_i) \quad (\text{vereinfacht})$$

Gesamtes Laminat:

$$E_{\text{gesamt}_{\square}} = \frac{\sum E_i d_i}{d_{\text{gesamt}}} \quad (\text{Mischungsregel})$$

Ultrahochmodul (UHM) Kohlenstofffaser:  $E_{F_{||}} = 600 \text{ GPa}$ ,  $E_{F_{\perp}} = 12 \text{ GPa}$

Epoxidharzmatrix:  $E_M = 4 \text{ GPa}$

Faservolumengehalt:  $\varphi = 0,65$

Laminataufbau:  $[0, 30, -30, 90]_S$

Lagendicke:  $d_i = 0,125 \text{ mm}$

Gesucht: Laminatsteifigkeit in  $0^\circ$ -Richtung

*Rechnung nicht im Skript. Bitte mitschreiben!*

0°-Lage:  $E_{\parallel} = \varphi \cdot E_{F_{\parallel}} + (1 - \varphi) \cdot E_M = 391,4 \text{ GPa}$  (1)

90°-Lage:  $E_{\perp} = \left( \frac{\varphi}{E_{F_{\perp}}} + \frac{1 - \varphi}{E_M} \right)^{-1} = 7,1 \text{ GPa}$  (2)

$\pm 30^\circ$ -Lagen:  $E_{\pm 30^\circ} \approx E_{\parallel} \cos^4(30^\circ) + E_{\perp} \sin^4(30^\circ) = 237,6 \text{ GPa}$  (3)

Gesamtverbund:  $E_{\text{gesamt}_{0^\circ}} = \frac{\sum E_i d_i}{d_{\text{gesamt}}} = \frac{2E_{0^\circ}d + 4E_{30^\circ}d + 2E_{90^\circ}d}{8d} = 220,6 \text{ GPa}$  (4)

## Flächengewicht

CFK:  $m = \rho \cdot d = 1500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 8 \cdot 0,125 \text{ mm} = 1,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  (5)

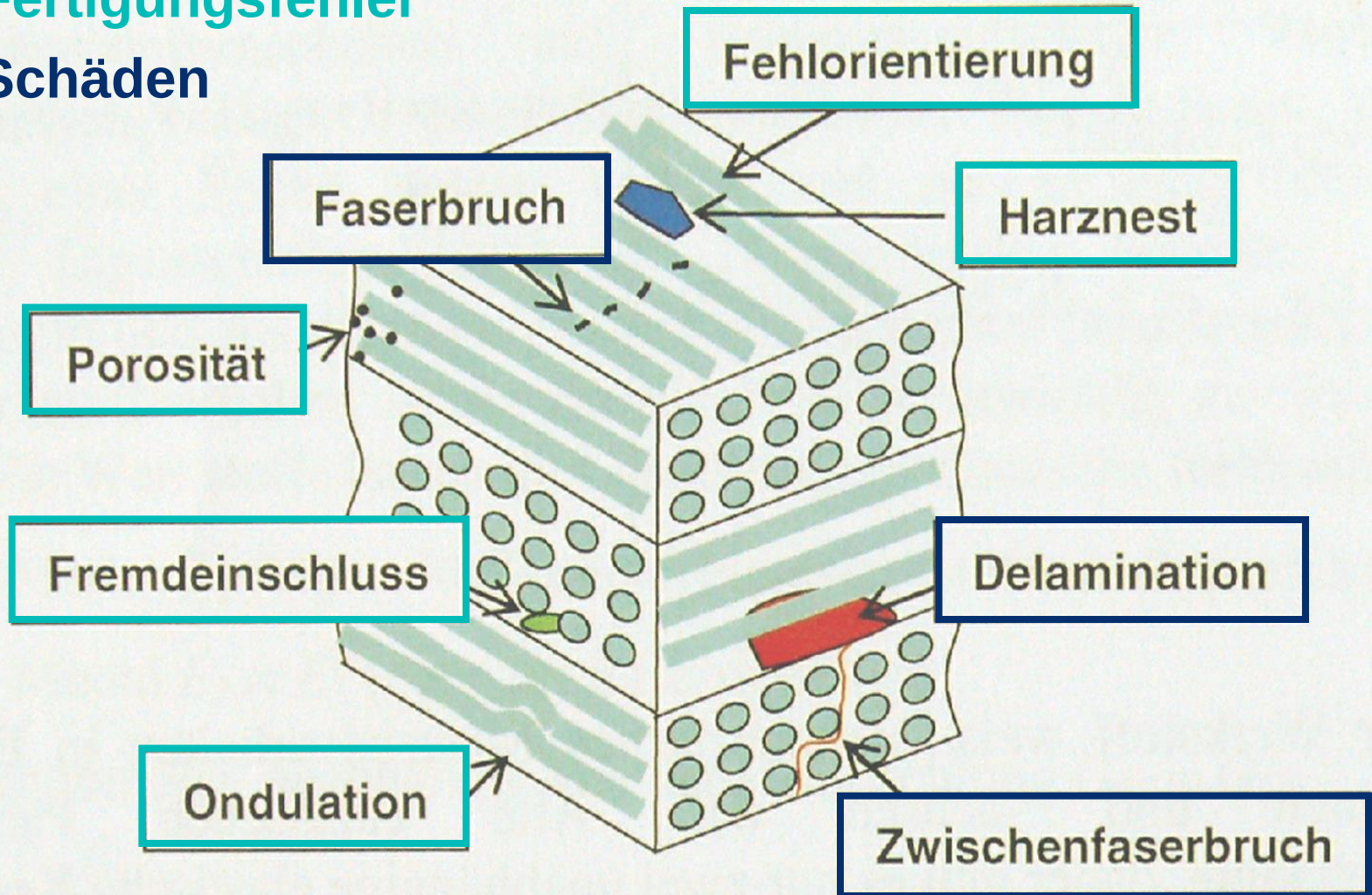
vgl. Stahl:  $m = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1 \text{ mm} = 7,85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  (6) mit  $E_{\text{Stahl}} = 210 \text{ GPa}$

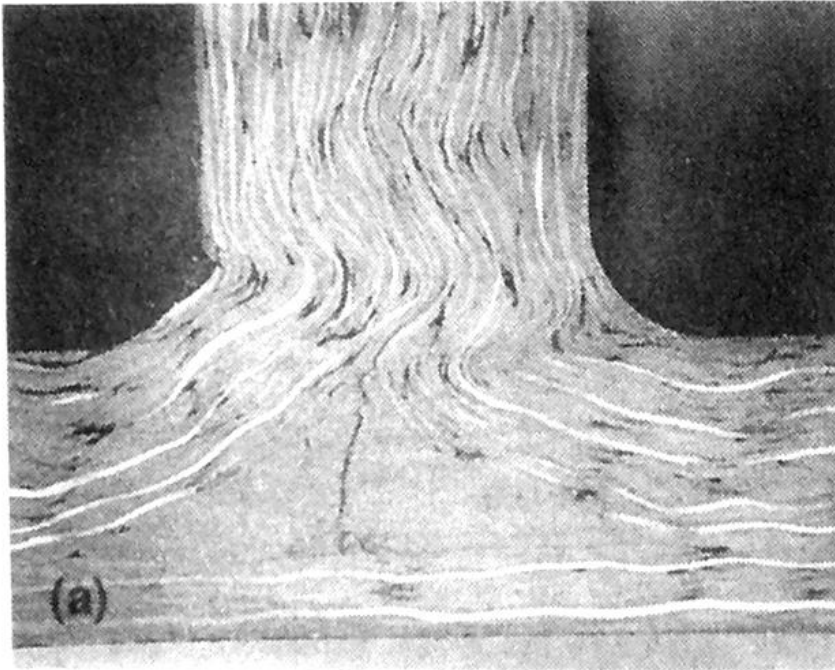
- Was ist Anisotropie?
- Was bedeutet die Anisotropie von FKV's für den Konstrukteur
- Berechnen Sie das Flächengewicht  $m=\rho \cdot d$  eines Laminates mit Aufbau  $[0, 30, -30, 90]_s$   
Gegeben:  $E_{F\parallel}$ ,  $E_{F\perp}$ ,  $E_M$ ,  $\rho$ ,  $d_i$  und Formeln

## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

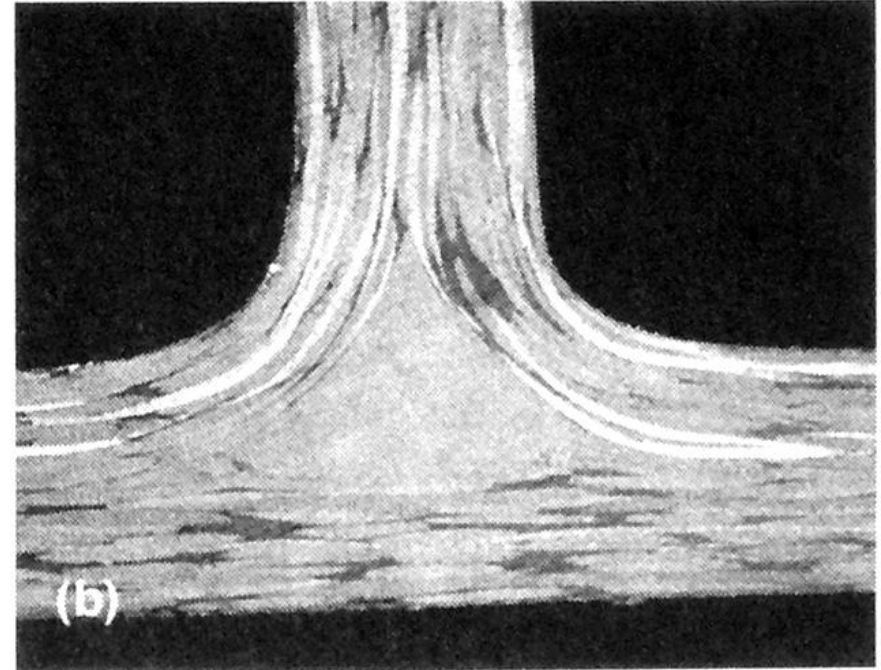
- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)

## Fertigungsfehler Schäden





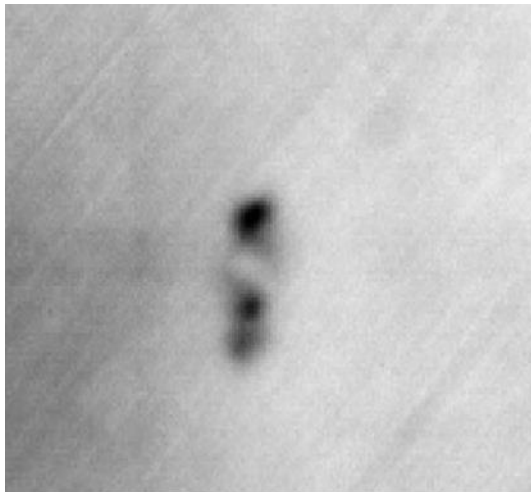
unakzeptable Ondulationen



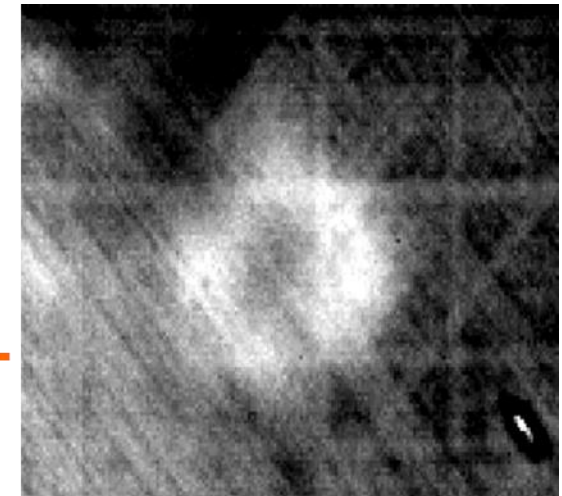
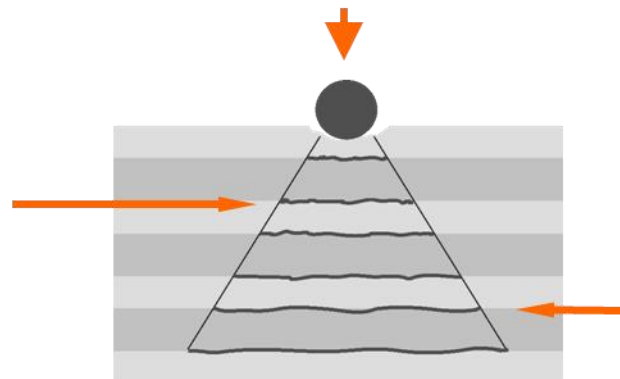
gutes Bauteil,  
Faserorientierung in Kraftflussrichtung

- verdeckt: von außen nicht sichtbar (im Gegensatz zu Beulen in Metallen)
- zwar geringer Einfluss auf Zugfestigkeit, aber totaler Verlust der Schubfestigkeit
- Ursachen: übermäßige Biege- oder Stoßbeanspruchung

„Impact“  
Stoßrichtung



Oberflächlich geringe Schädigung



Schädigung in Tiefe größer

Thermographiebilder zur Visualisierung von Delaminationen

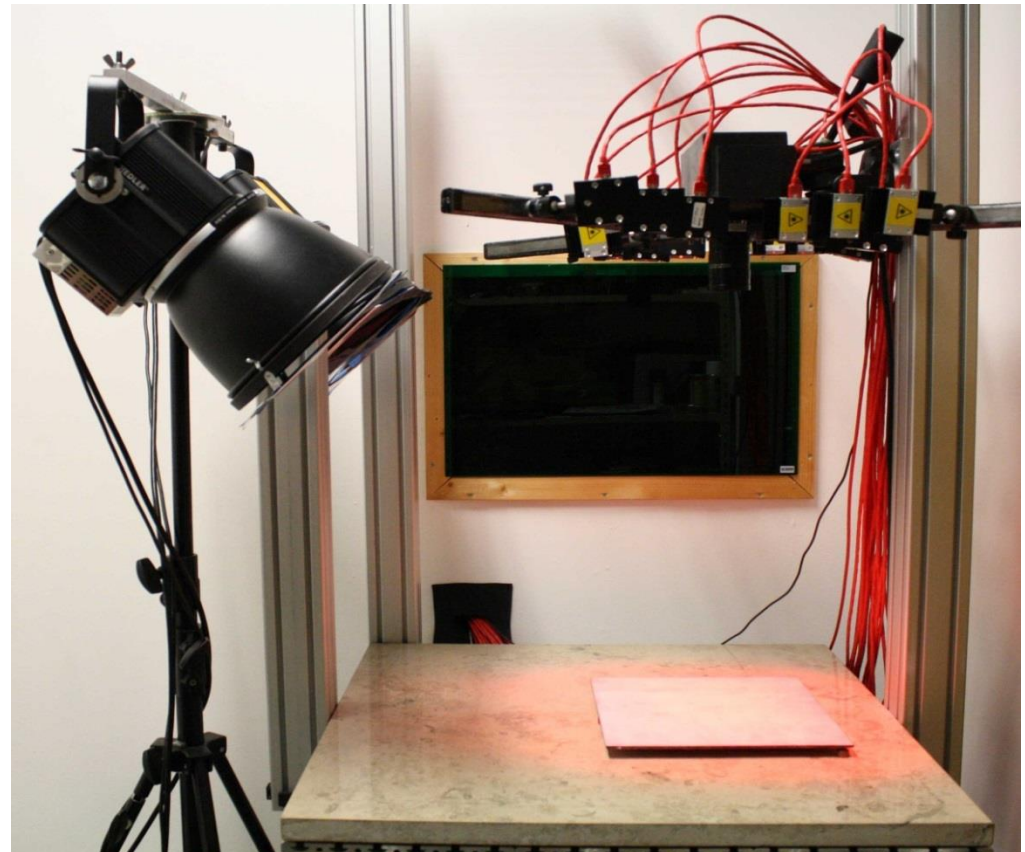
## Thermographie am IKT

- Berührungslos
- Bis ca. 5 mm Tiefe in CFK
- Messdauer ca. 1 bis 5 min
- Detektion von
  - Delaminationen
  - Porositäten
  - Harznestern
  - Fremdeinschlüssen
  - Ondulationen



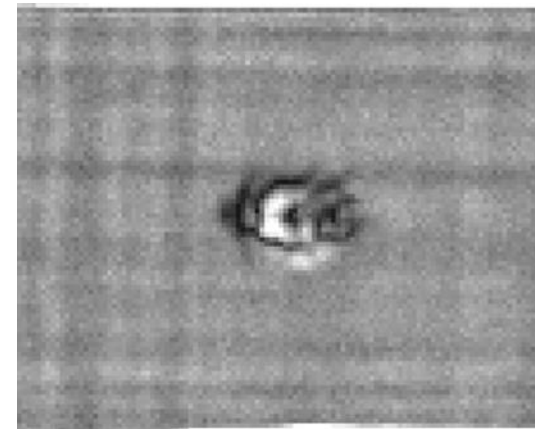
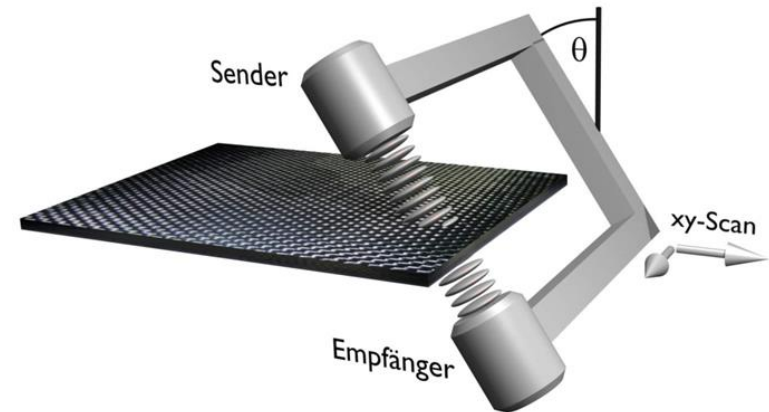
## Shearographie

- Berührungslos
- Bis ca. 8 mm Tiefe in CFK
- Messdauer ca. 1 bis 10 min
- Detektion von
  - Delaminationen
  - Fremdeinschlüssen
  - Zwischenfaserbrüchen
  - Faserbrüchen
  - Ondulationen



## Luftgekoppelter Ultraschall

- Berührungslos
- Messdauer ca. 30 min, je nach Größe
- Detektion von
  - Delaminationen
  - Fremdeinschlüssen
  - Zwischenfaserbrüchen
  - Faserbrüchen
  - Ondulationen
  - Harznestern
  - Porositäten



Messergebnis eines  
Luftultraschallscans einer Delamination

- Benennen Sie typische Fehler in Faserkunststoffverbunden!
- Erklären sie den Begriff Zerstörungsfreie Prüfung! Nennen Sie mindestens 2 Beispiele für Verfahren

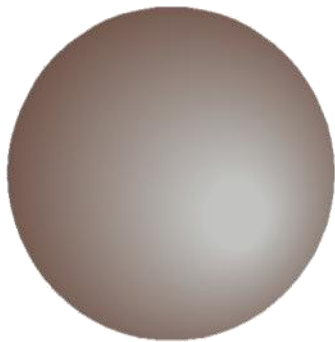
## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)

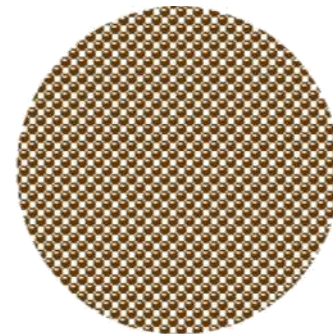
**Nanofüllstoffe:** Füllstoffe mit mindestens einer charakteristischen Dimension im Größenbereich von einem bis ca. 100 Nanometern.

Neben Art des Ausgangsmaterials führen insbesondere Größe und Gestalt der Nanostrukturen zu neuartigen (mechanischen, optischen, magnetischen, elektrischen und chemischen) Eigenschaften.

Das Ersetzen von makroskopischen Füllstoffen durch Nanopartikel führt zu einer deutlichen Zunahme der Rolle von Oberflächen und Grenzflächenwechselwirkungen.

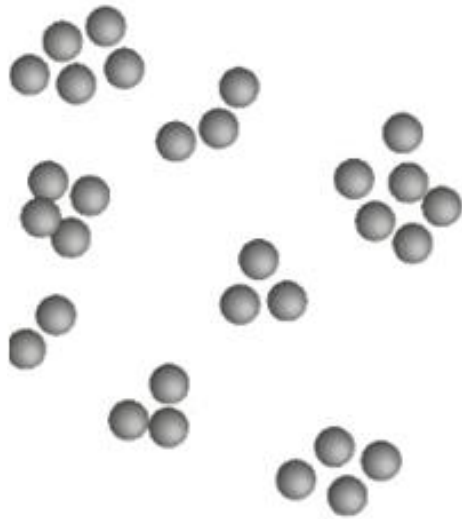


Mikropartikel  $\varnothing = 1 \mu\text{m}$



entspricht  $10^9$  Nanopartikeln mit  $\varnothing = 1 \text{ nm}$

Für eine maximale Wirksamkeit von Nanopartikeln wird eine feinverteilte, sog. dispergierte Verteilung der Partikel angestrebt (technisch anspruchsvoll!).



Agglomeration

Quasi unwirksam  
(wie makroskopische  
Füllstoffe)



Dispergierte Nanopartikel

(gewünscht)



Nanopartikel-Netzwerk

(weniger wirksam als  
dispergierte Nanopartikel)

### Schichtsilikate

Verbesserung des Flammschutzes,  
mechanischer Eigenschaften und  
Barriereeigenschaften

### Kohlenstoff-Nanoröhrchen

elektrische, thermische und mechanische  
Eigenschaftsverbesserung

### Titandioxid-Partikel

absorbieren UV-Strahlen

### Silber-Partikel

antibakterielle und fungizide Wirkung

### Siliziumdioxid-Partikel

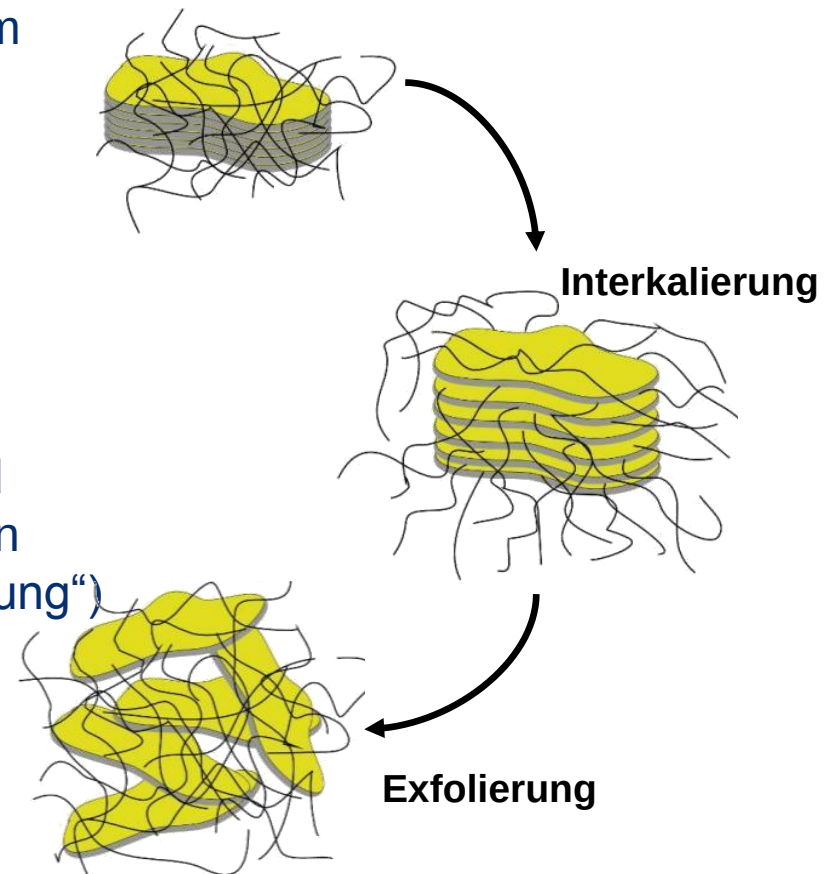
sehr hart (Kratzbeständigkeit von Lacken)

Schichtsilikate sind natürlich vorkommende Tonminerale (Montmorillonite), die eine Schichtstruktur aufweisen.

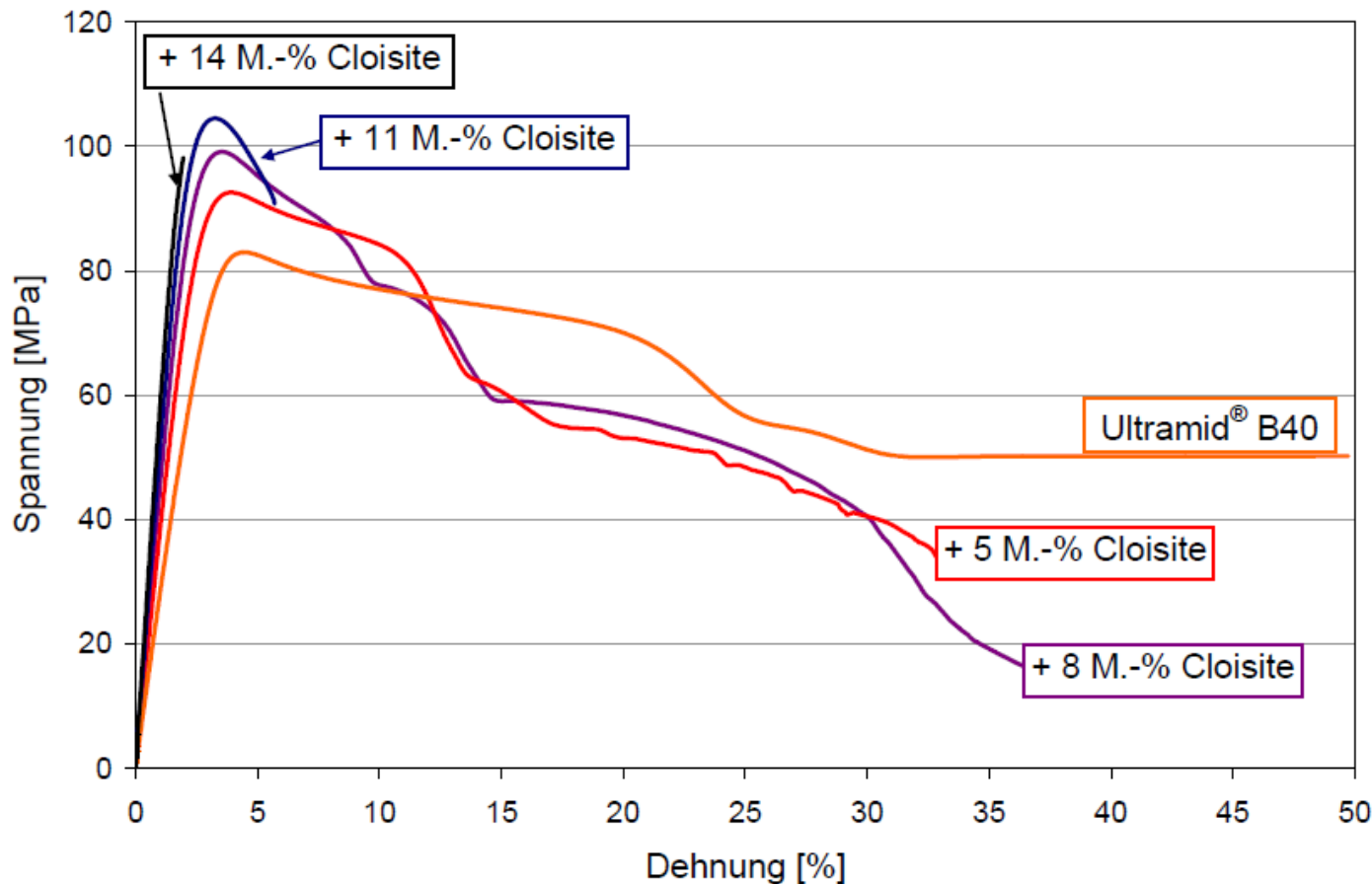
|                    |                   |
|--------------------|-------------------|
| Schichtdicke:      | ca. 1 nm          |
| Schichtausdehnung: | ca. 50 bis 500 nm |
| Aspektverhältnis:  | ca. 50 bis 500.   |

Die einzelnen Schichten sind mittels Kationen chemisch verbunden.

Während der Einarbeitung in die Schmelze (z.B. mittels Doppelschneckenextruder) wird durch das Eindiffundieren von Polymerketten der Schichtabstand aufgeweitet („Interkalierung“) und letztlich eine möglichst gleichmäßige räumliche Anordnung der Schichten („Exfolierung“) angestrebt.



Mechanische Kennwerte eines PA 6 (Ultramid B40) in Abhängigkeit vom Füllstoffgehalt (Schichtsilikate „Cloisite®“).



[Quelle: S. Geier, Dissertation 2011, IKT]

## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)

Antioxidantien  
Antistatika  
Flammschutzmittel  
Farbmittel  
Fließhilfsmittel\*  
Haftvermittler\*  
Nukleierungsmittel\*  
Schlagzähmodifizier\*  
Treibmittel  
UV-Stabilisatoren  
Wärmestabilisatoren  
Weichmacher\*

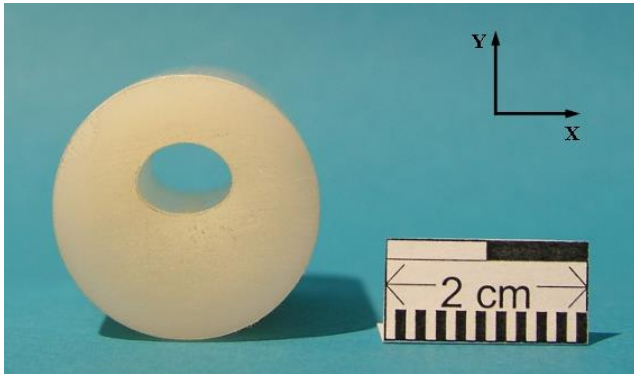
...

(\* werden näher dargestellt)

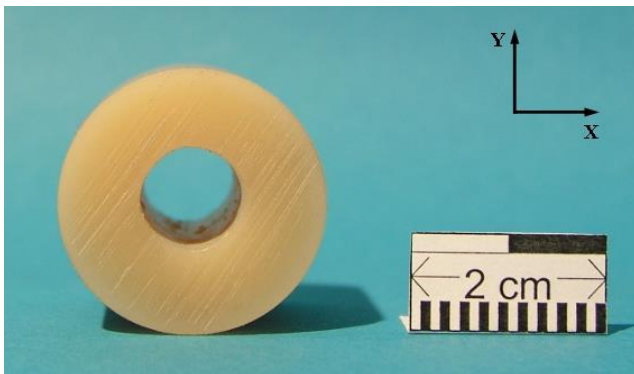
Allen Funktionszusatzstoffen ist gemeinsam, dass ihre Wirkung von der Löslichkeit und Verteilung im betreffenden Polymer abhängt.



- Viskositätserniedrigende Zusätze: senken Druckbedarf der Maschine oder Temperaturbedarf der Schmelze (meist niedermolekulare Bestandteile, die Nebenvalenzkräfte verringern)
- Viskositätserhöhende Zusätze (siehe Beispiel)



Problem: Sagging-Effekt bei der Rohrextrusion  
(Schmelze zu dünnflüssig und sammelt sich „unten“)



Maßnahme: Erhöhung der Viskosität

[Quelle: Stuttgart Kunststoff-Kolloquium, 2011]

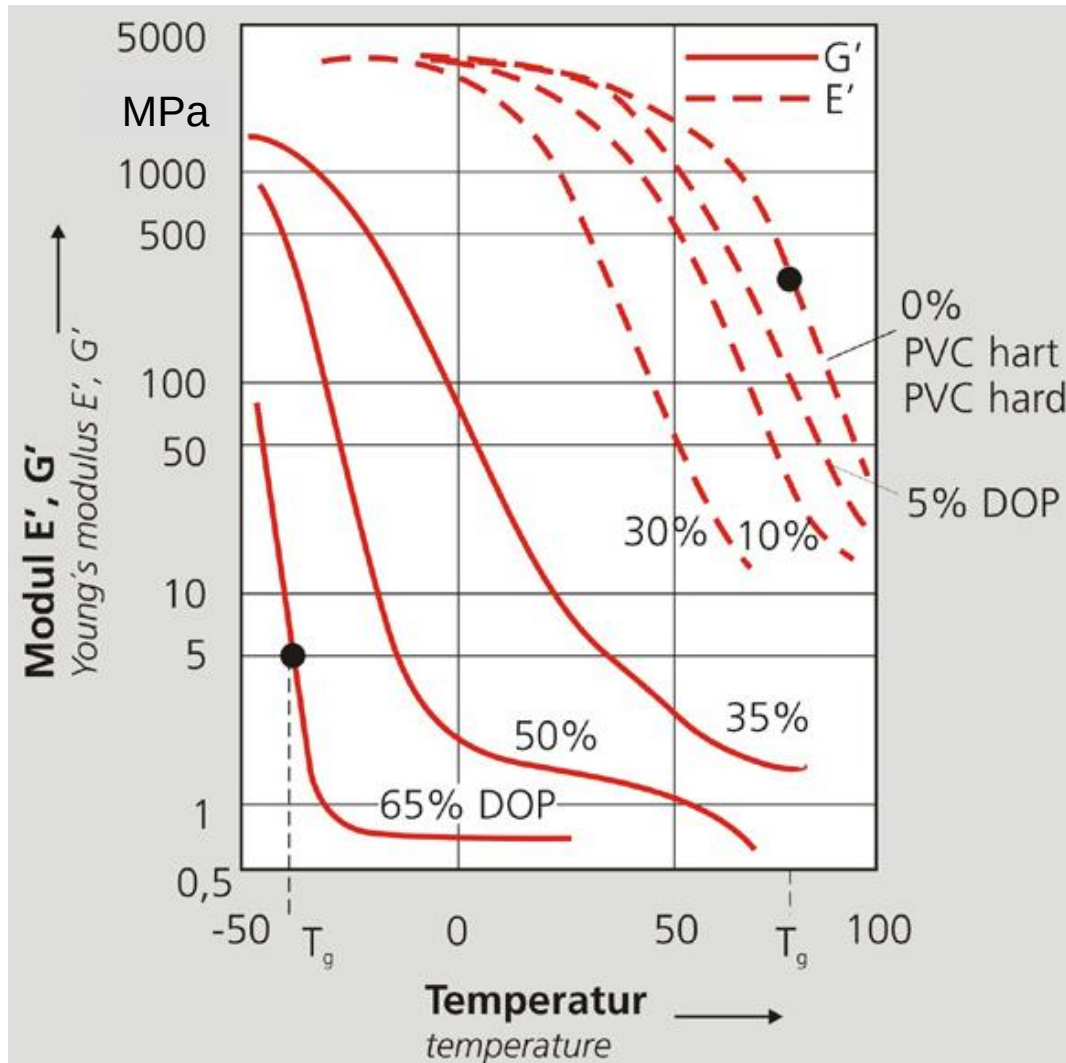
**Weichmacher** erhöhen die Dehnbarkeit und verringern die Steifigkeit des festen Werkstoffs. Die Weichmacher lagern sich zwischen den Molekülketten an und verringern die Nebenvalenzkräfte. Dabei wirken sie zugleich oft als Fließhilfsmittel während der Verarbeitung.

### **Innere Weichmachung (chemisch gebundene Blockcopolymere)**

Einpolymerisieren (chem. Reaktion) einer „weichmachenden“ Komponente  
Beeinflussung der Beweglichkeit und Reduktion der Nebenvalenzkräfte

### **Äußere Weichmachung (physikalisch gebunden)**

- Physikalische Mischung mit meist niedermolekularen Stoffen
- Keine chemische Verbindung, daher Gefahr der Migration und des Weichmacherverlusts
- Chemischer Grundcharakter des Werkstoffes nicht verändert



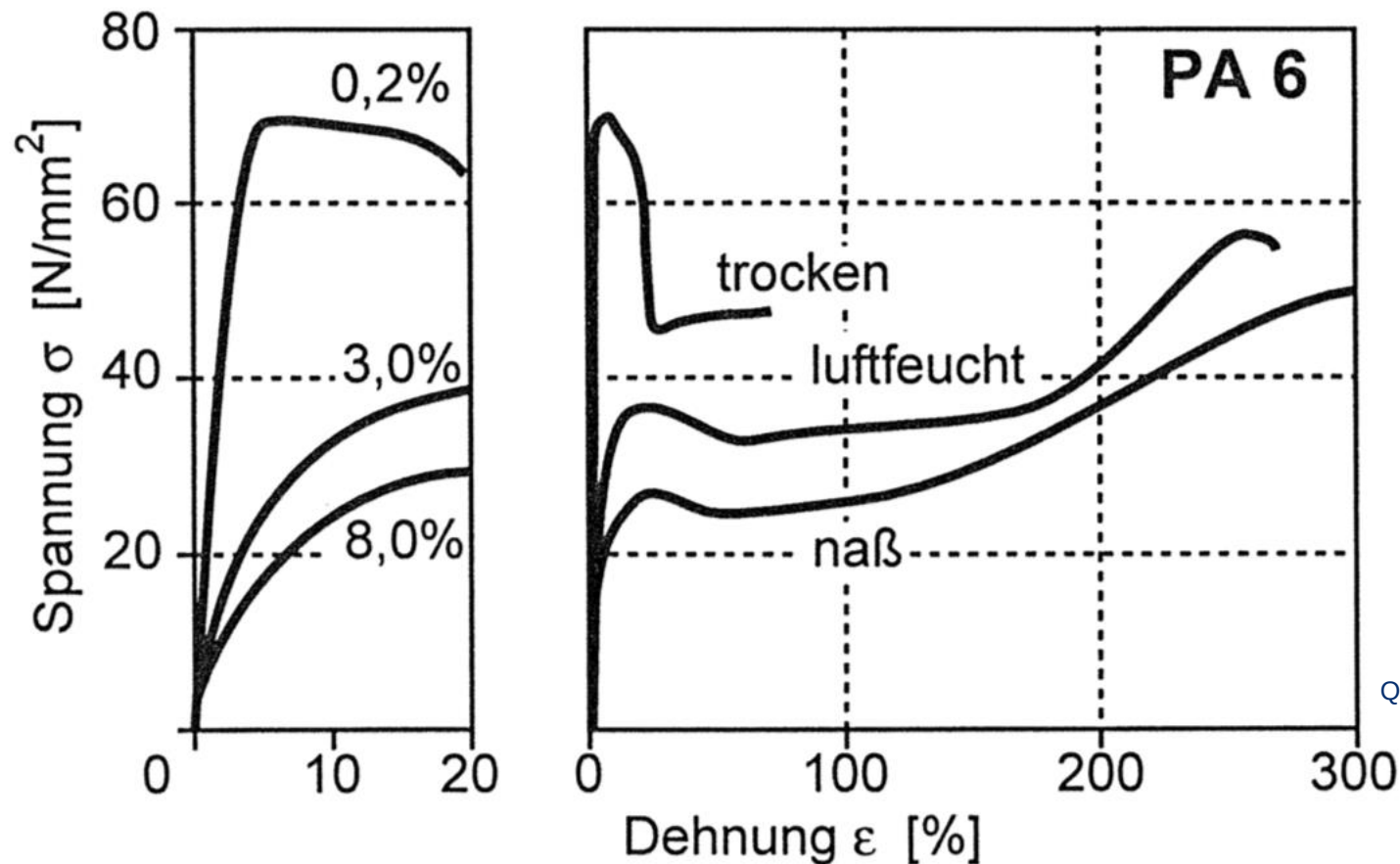
Absenkung der Steifigkeit mit steigendem Anteil Dioctylphthalat (DOP)

DOP heute unter reproduktionstoxischem Verdacht.

Teureres DINCH gilt als unbedenklich.

**Ursache:** Polare Carbonamid-Gruppen in der PA-Molekülkette ermöglichen das Eindringen von Wassermolekülen

**Resultat:** Abnahme der Steifigkeit, Erniedrigung der Glasübergangstemperatur  
Erhöhung der Dehnfähigkeit



Quelle: Ehrenstein

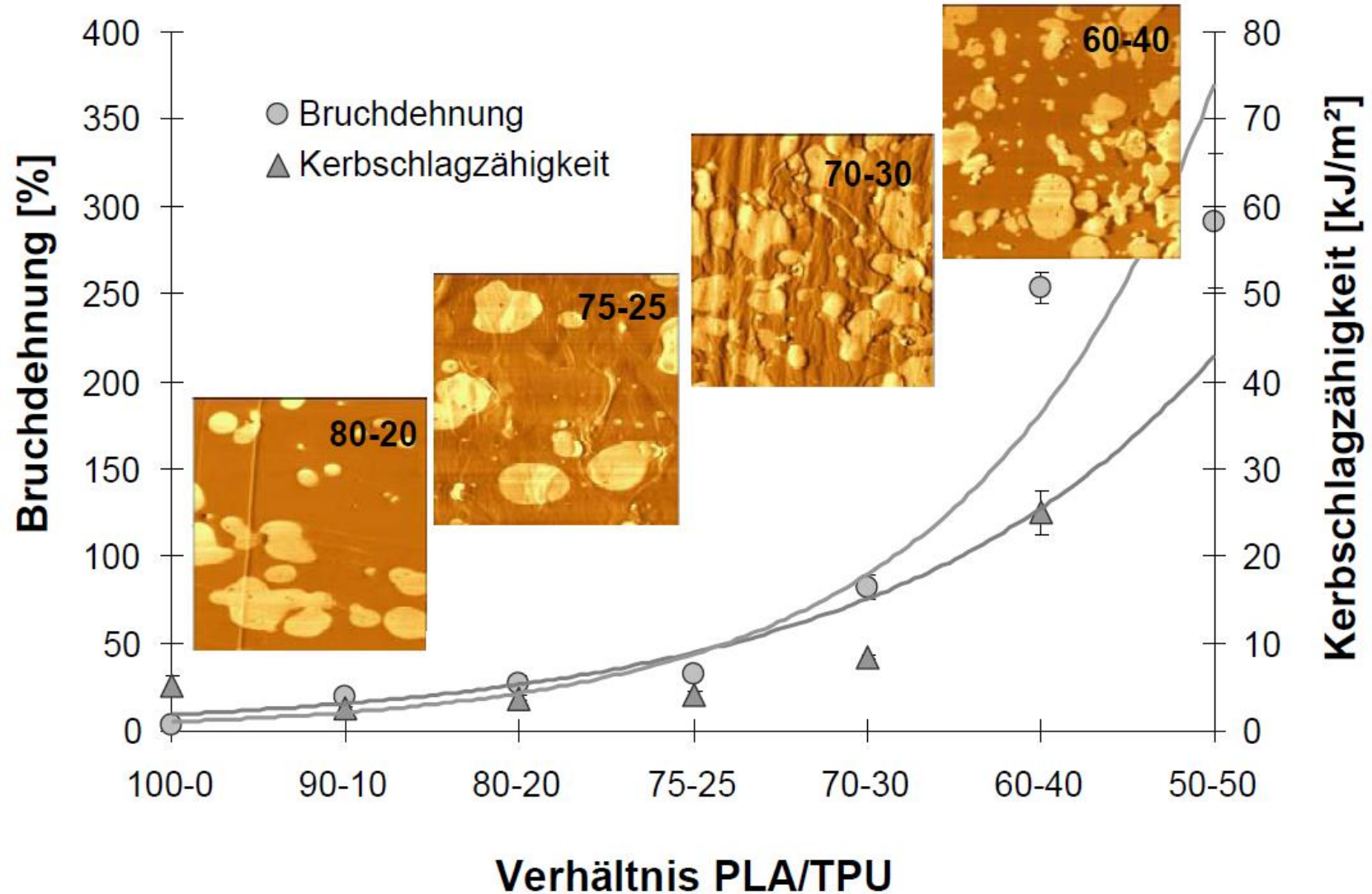
**Schlagzähmodifizier:** Sehr spröden Werkstoffen werden Partikel aus sehr dehnfähigen Werkstoffen zugesetzt. Startende Risse pflanzen sich schnell durch spröde Werkstoffe hindurch, werden aber durch die dehnfähigen Partikel „aufgefangen“. Entsprechend dem Mischungsverhältnis verändern sich auch andere Eigenschaften.

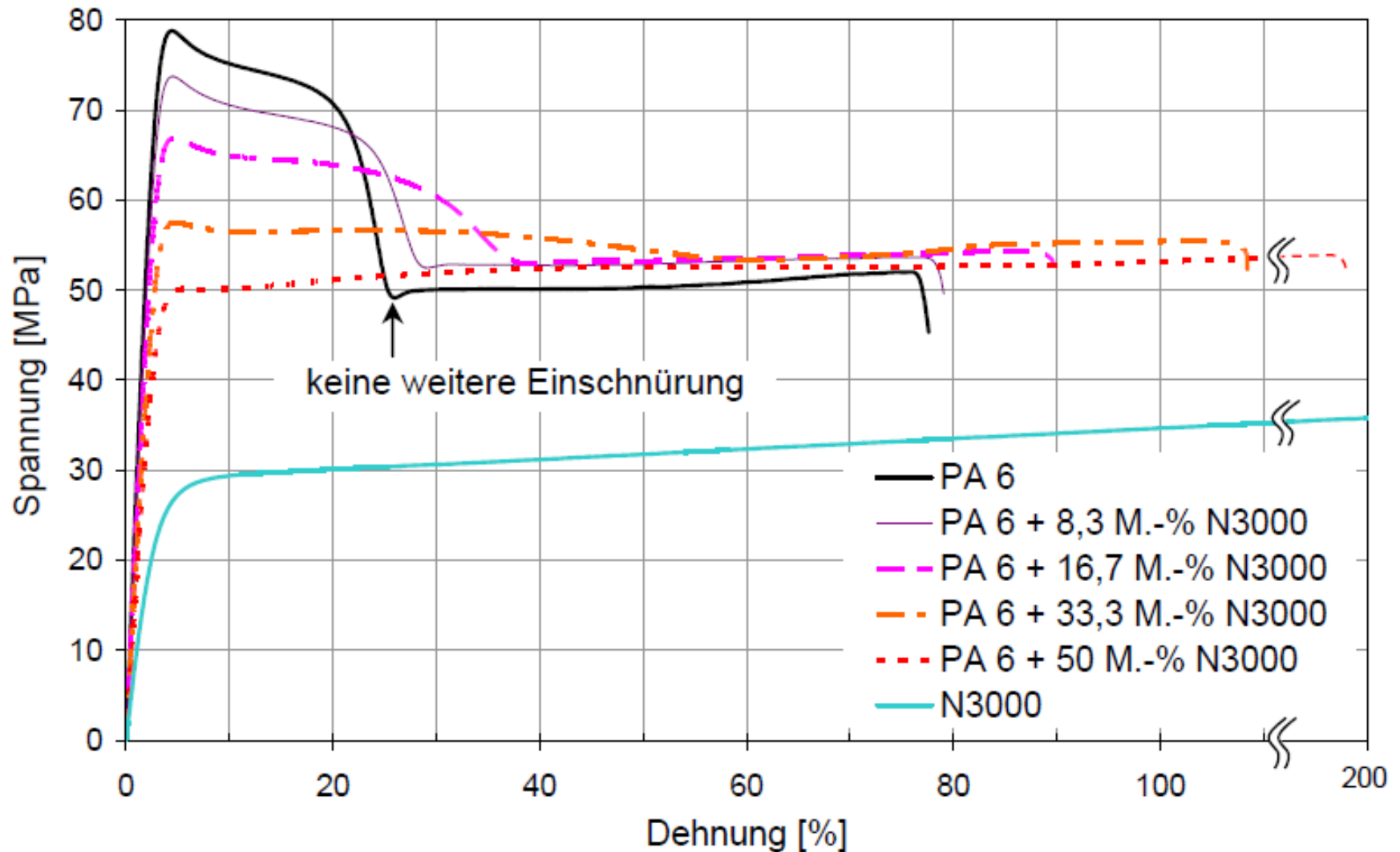
### Blend

- physikalische Mischung (heterogene Gemische) mittels Doppelschneckenextruder
- Mischung mit weichen Elastomerpartikeln – Rissstoppende Wirkung
- Komponenten müssen kompatibel gemacht werden (Haftvermittler)

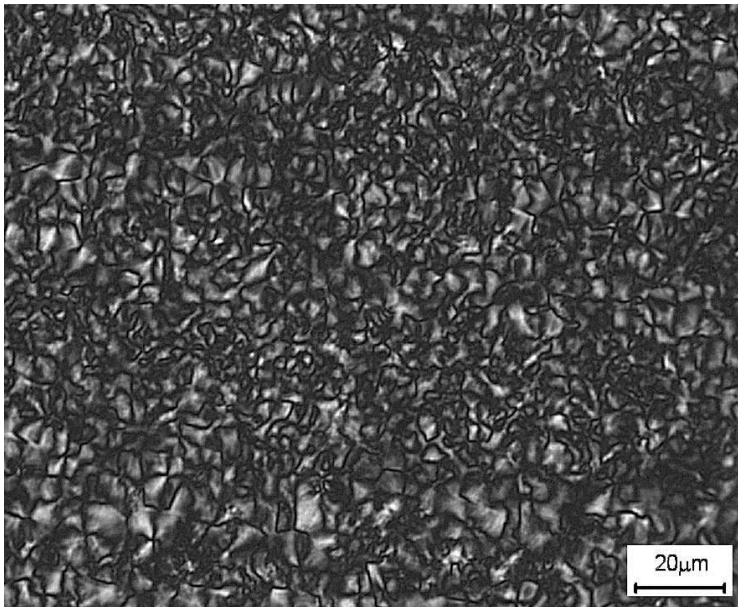
**im Vergleich dazu: (Block-) Copolymere (siehe auch „innere Weichmachung“)**

- chemische Verbindung
- Polymerisation eines weichen dehnfähigen Polymers in die Hauptkette eines festen und spröden Polymers

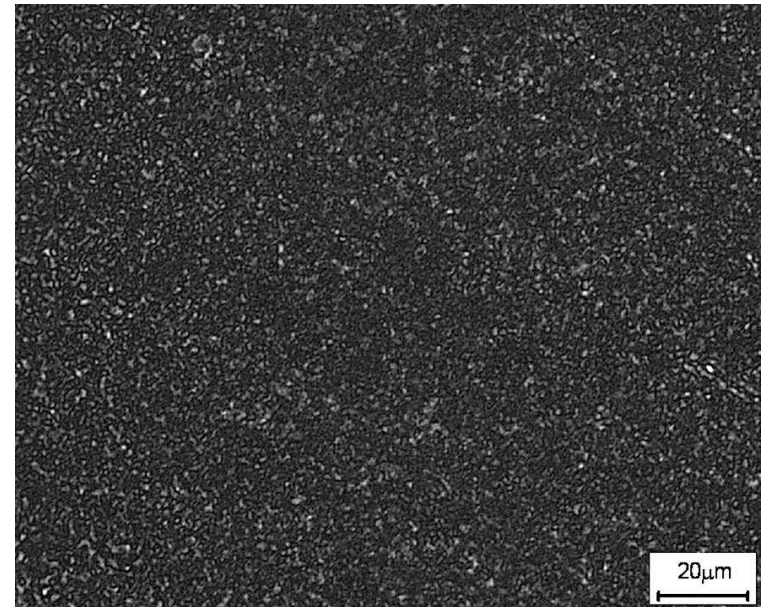




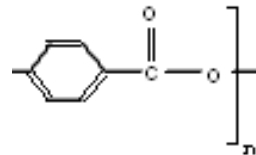
- Keimbildner bilden viele kleine Sphärolite → Erhöhung Kristallinitätsgrad
- Die Kristallisationstemperatur ist bei konstanter Abkühlgeschwindigkeit umso höher, je höher die Keimdichte ist. → Zykluszeitverkürzung
- Durch das homogenere Gefüge → Verringerung von Schwindung



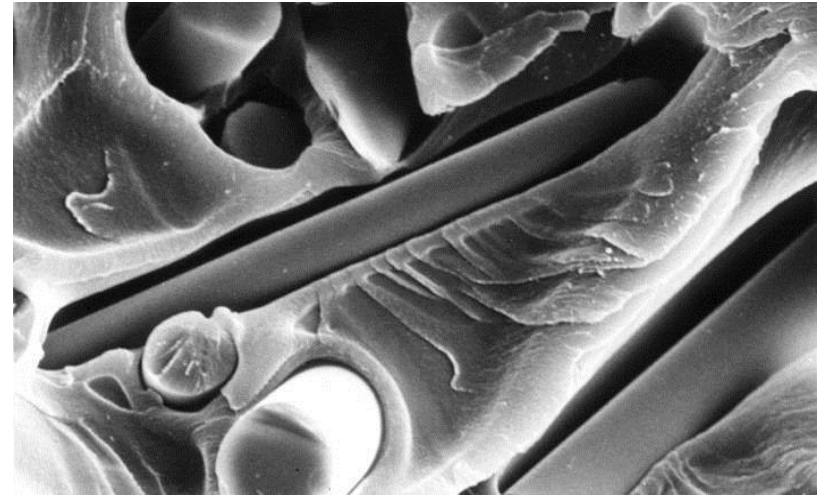
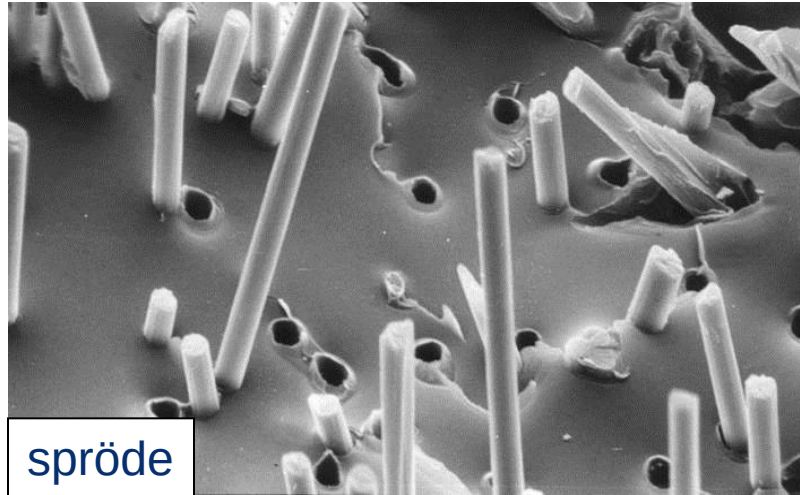
PA 6 **nicht** nukleiert



PA 6 nukleiert

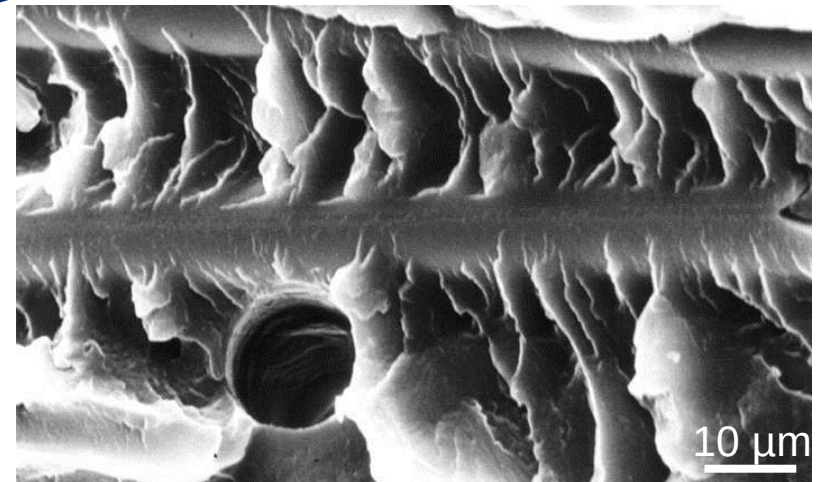
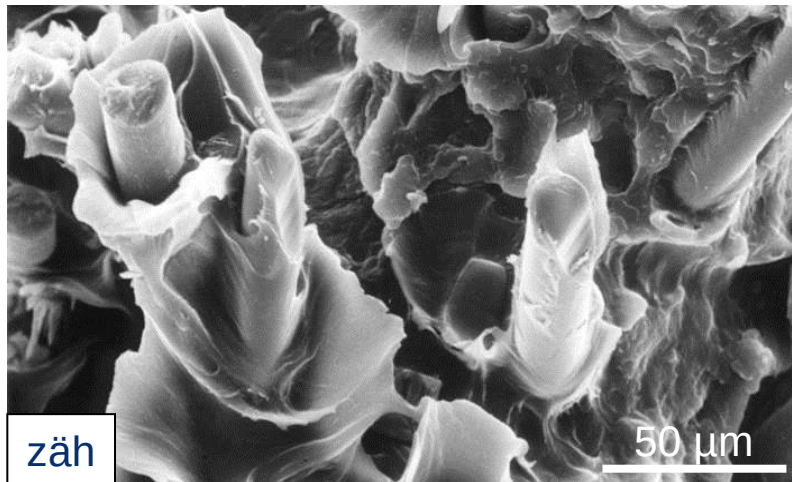
A yellow tube of UHU Der Alleskleber adhesive with a black cap. The text "UHU" is prominently displayed in large black letters, and "Der Alleskleber" is written below it in smaller black letters.

schlecht



Faserschlichte als Haftvermittler

gut



### **Polymerblends: Mischung von mindestens zwei Thermoplasten**

- Kostengünstige Neuentwicklung maßgeschneiderter Werkstoffe
- Kombination der Eigenschaften zweier Blendpartner
- Beispiele für kommerzielle Blends: PC/ABS und PA/ASA
- Herstellung auf Doppelschneckenextruder, seltener auf Verarbeitungsmaschine

## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften mit Zusatzstoffen

- Verstärkungsstoffe
  - Fasern
    - Anwendungen von Faserkunststoffverbunden
    - Faser- und Matrixtypen
    - Prinzip der Faserverstärkung und deren Berechnung
    - Defekte und Prüfung von Faserkunststoffverbunden (FKV)
  - Nanofüllstoffe
- Funktions-Zusatzstoffe (Verarbeitungshilfsmittel, Eigenschaftsverbesserer)
- Füllstoffe (Inaktive Füllstoffe)

**Inaktive“ Füllstoffe** erhöhen das Volumen und verringern den Preis. Zugleich erhöhen sie dennoch die Dichte, den E-Modul, die Härte und die Wärmeformbeständigkeit. Außerdem kann eine geringere Schwindung erwartet werden, da der Füllstoff selbst kaum schwindet.

### Beispiele:

Organische Füllstoffe: Holzmehl, Cellulosepulver, Schalen- und Kernmehl

Anorganische Füllstoffe: Calciumcarbonat (Kreide), Talkum, Feldspat

### Nachteile:

- Reduzierung der Dehnfähigkeit und Zähigkeit
- Beim Zerspanen erhöhter Werkzeugverschleiß
- Rückstände (Asche) bei der Verbrennung

# Kunststofftechnik

## Gezielte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften

Institut für Kunststofftechnik  
Böblinger Straße 70  
70199 Stuttgart