

# Vorlesung MTI - Beschichten

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg<sup>id</sup>

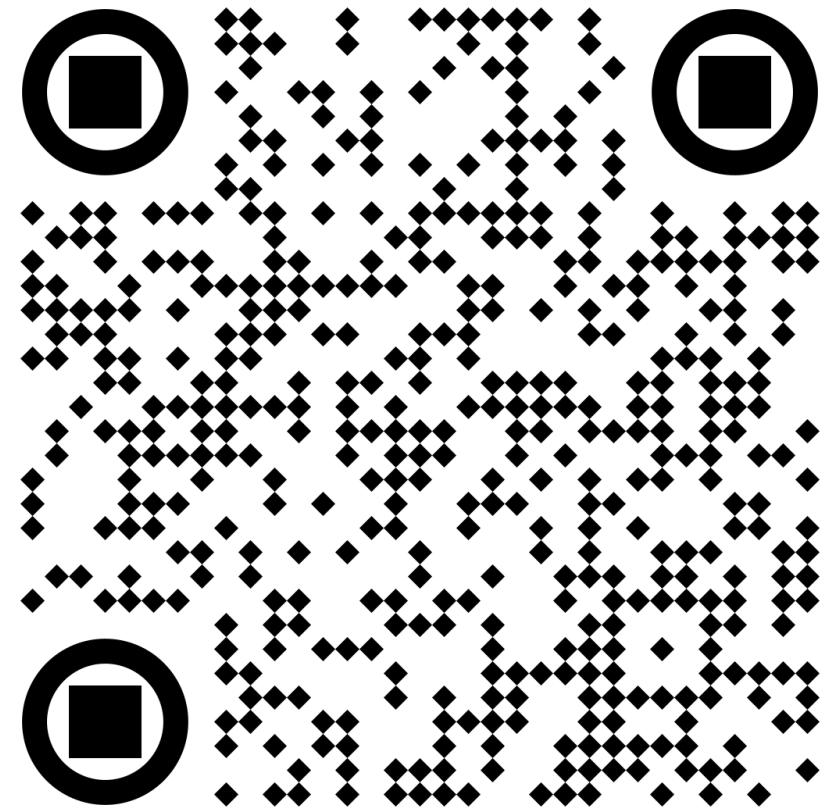
Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: [christian.willberg@h2.de](mailto:christian.willberg@h2.de)



# Definition

Unter **Beschichten** (englisch coating) ist das Aufbringen einer festhaftenden Schicht aus formlosem Stoff auf die Oberfläche eines Werkstückes.



Ziele?

- Abnutzung reduzieren
- fehlenden Werkstoff ergänzen
- Erzeugen bestimmter Oberflächeneigenschaften

# Verfahrensgruppen

Unterscheidbar nach Ausgangszustand des Beschichtungsmaterials

Zustand	Verfahren
Gasförmig	Chemische Gasphasenabscheidung, ...
Flüssig	Lackieren, Bemalen, Emailieren, ...
Gelöst	Galvanisieren, Verzinken, Chromatieren, ...
Fest	Plasma-Pulver-Auftragsschweißen, Pulverbeschichten, ...

# Lackieren

- mit Pinseln, Walzen oder Spritzen aufgetragen

[Video](#)

# Auftragsschweißen

- Schweißbraupe wird auf der Oberfläche angebunden

Auftragsfläche

$$\gamma = \frac{A_E}{A_E + A_A} 100\%$$

$\gamma$  sollte möglichst klein sein -> Einbrandtiefe  $t$  und Einbrandfläche  $A_E$  sind klein

[Video](#)

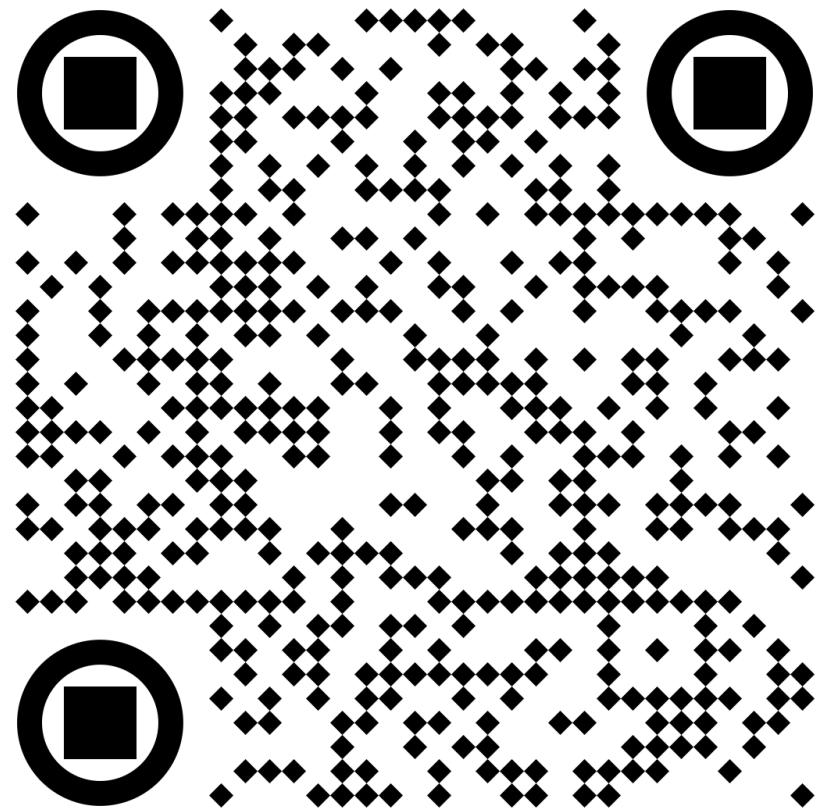
## Referenzen

Birgit Awiszus et al. (2007) "Grundlagen der Fertigungstechnik"

# Faserverbundwerkstoffe

# Was ist ein Faserkunststoffverbund (FKV)

- Mehrphasen- oder Mischwerkstoff im Allgemeinen bestehend aus zwei Hauptkomponenten (Faser und Matrix)
- Der Gesamtwerkstoff hat höherwertige Eigenschaften als jede der beiden beteiligten Komponenten alleine
- Material und seine Eigenschaften entstehen in der Fertigung



- Schifffahrt
  - Salzwasser
  - Schlagschäden
  - Lange Lebendauer
- Landtransportsysteme
  - Kosten
  - Einfache Fertigbarkeit
- Weitere Anwendungen
  - Dichtheit
  - ...

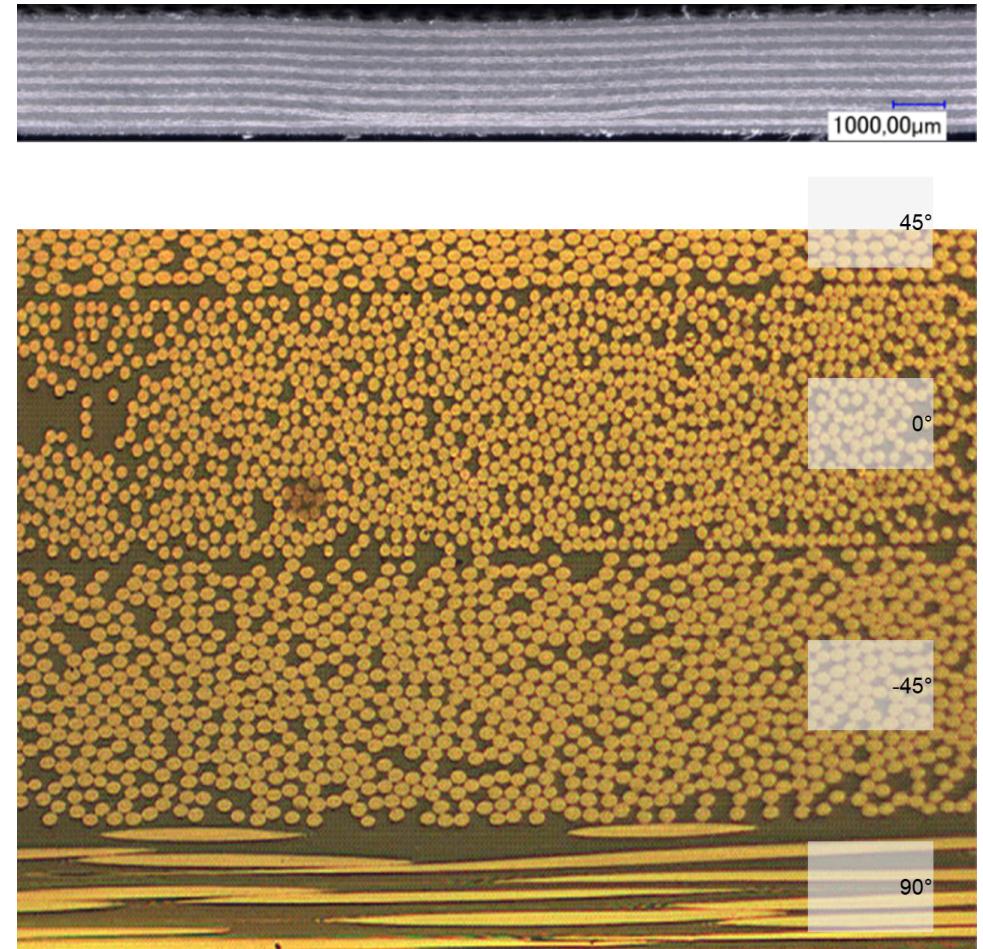
# Komponenten von Faserkunststoffverbunde

Matrix – bindende Komponente

Formgebend

Schutz und Stabilisierung der Fasern

Spannungen an die Fasern  
übertragen



# Komponenten von Faserkunststoffverbunde

Faser – verstärkende Komponente

Lasttragend da hohe Steifigkeit  
und/oder Festigkeit bei geringem  
Gewicht

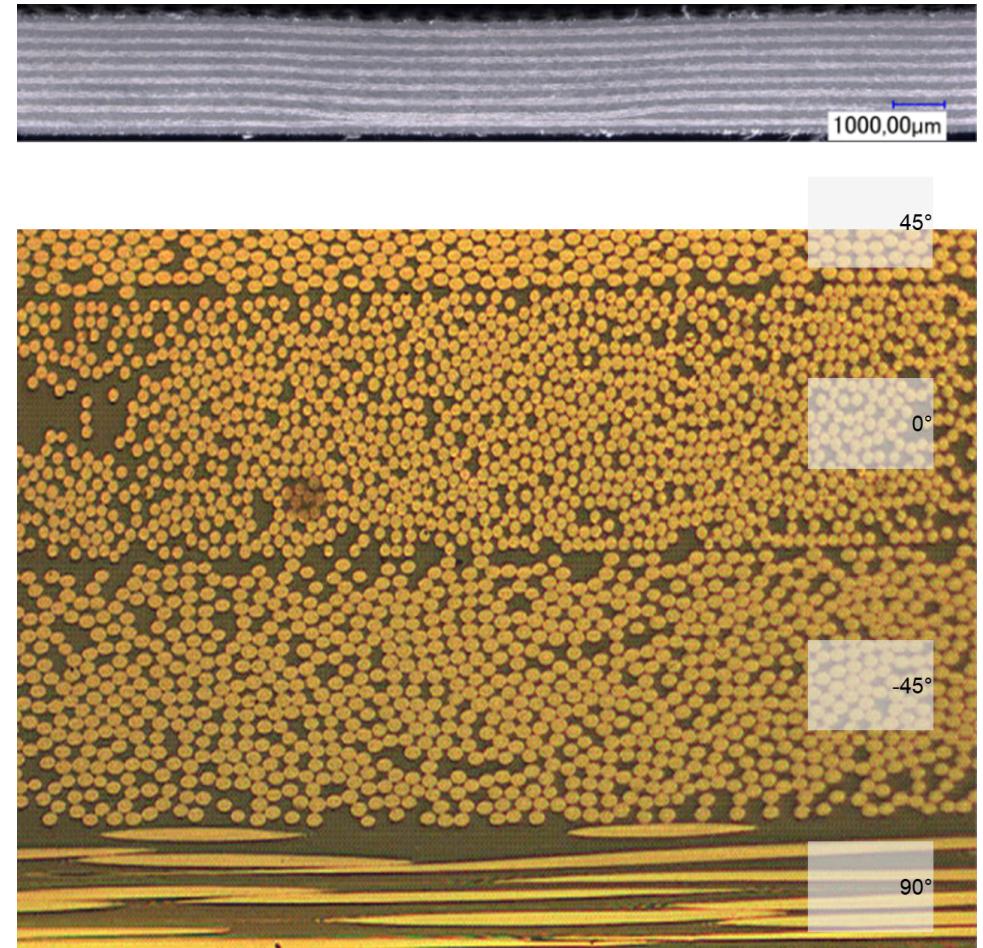
Begrenzte thermische Dehnung

Weitere Bestandteile (optional)

Faserbeschichtungen

Füllstoffe

Beimischung anderer Fasertypen



# Ausgangswerkstoffe - Faser

- Kurzfasern
  - Wirre Anordnung (geringe Anistropie)
  - Oft recyclete Fasern
- Langfasern
  - Mehrere Millimeter - einige Centimeter Länge
  - Geringere Anforderung bei Verarbeitung und Lagerung



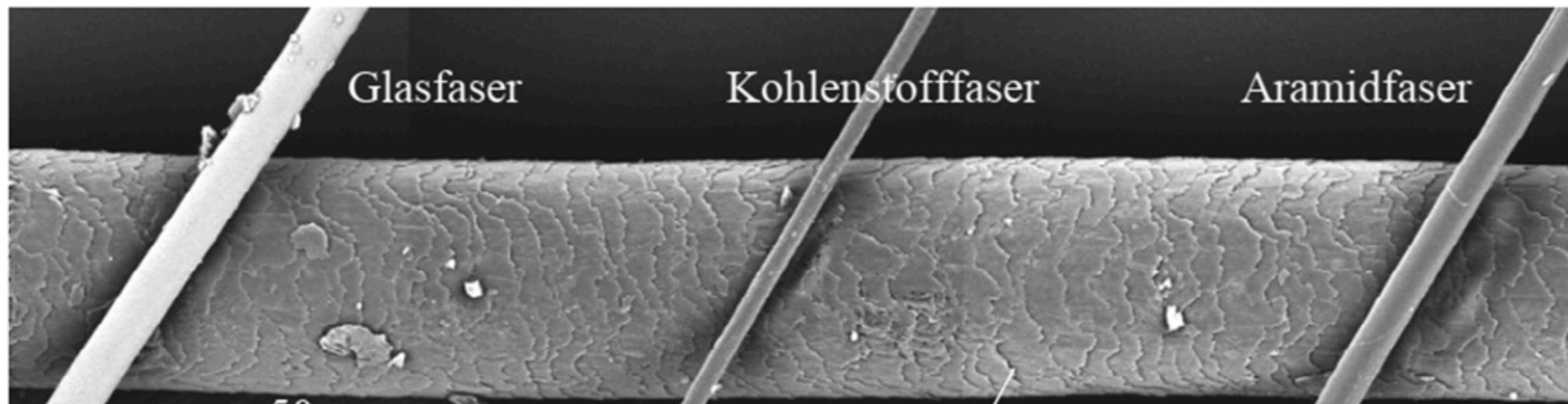
## Ausgangswerkstoffe - Faser

- Endlosfasern
  - Hohe Festigkeiten und Steifigkeiten
  - Höhere Anforderung bei Verarbeitung und Lagerung



# Ausgangswerkstoffe - Faser

- Naturfasern: Haare, Wolle, Seide, Baumwolle, Flachs, Sisal, Hanf, Jute, Ramie, Bananenfasern ...
- Organische Fasern: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polyester (PES), Polyacrylnitril (PAN), Aramid, Kohlenstoff ...
- Anorganische Fasern: Glas, Basalt, Quarz, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bor, ...
- Metallfasern aus: Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Beryllium, Wolfram ...

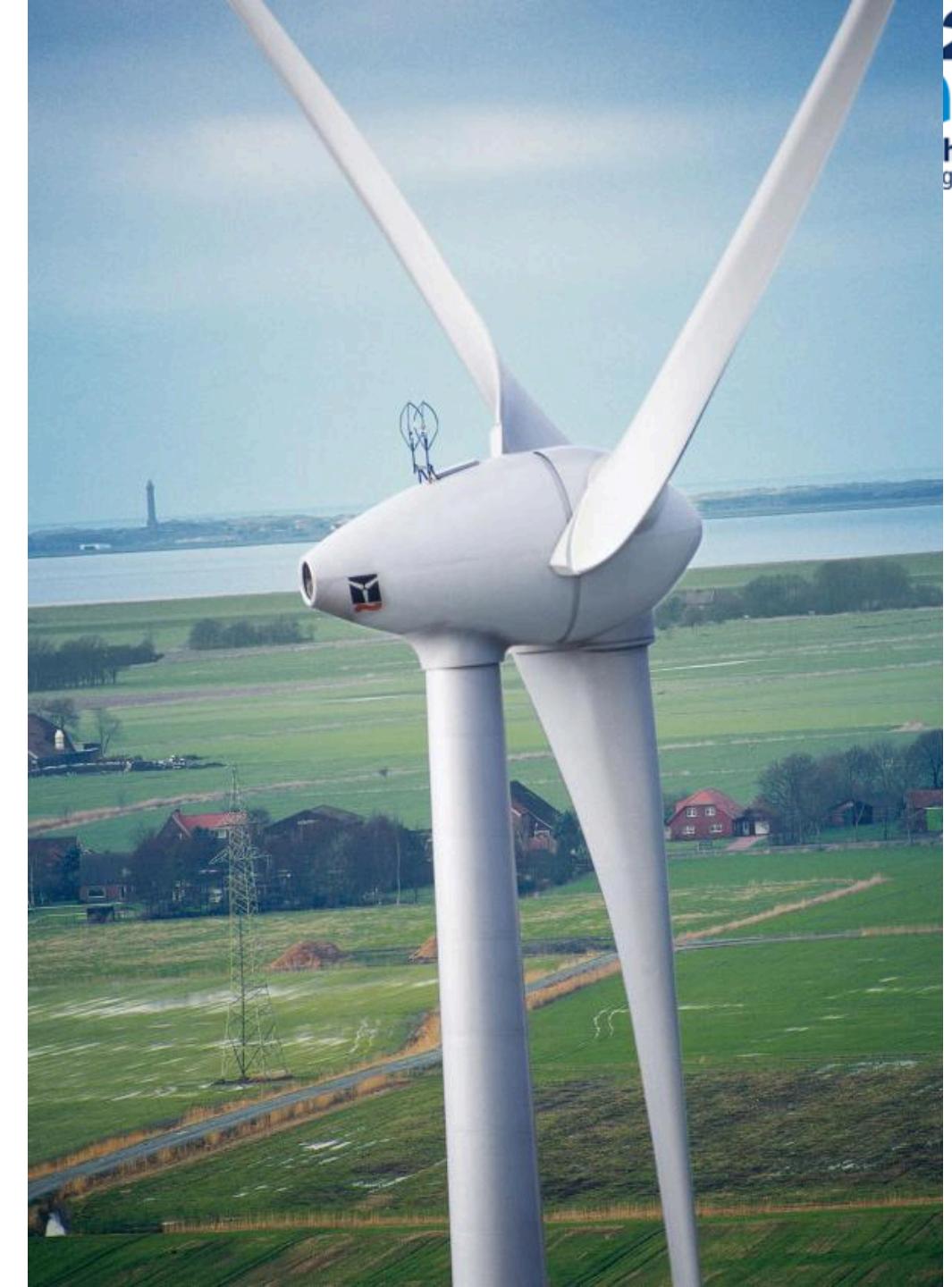


# Glasfaser

## Vorteile

hohe Längs-Zug- sowie die hohe  
Längs-Druckfestigkeit

Eine hohe Bruchdehnung  
aufgrund der niedrigen  
Fasersteifigkeit gute Drapierbarkeit,  
auch um enge Radien  
die vollkommene Unbrennbarkeit  
die sehr geringe  
Feuchtigkeitsaufnahme



# Glasfaser

## Vorteile

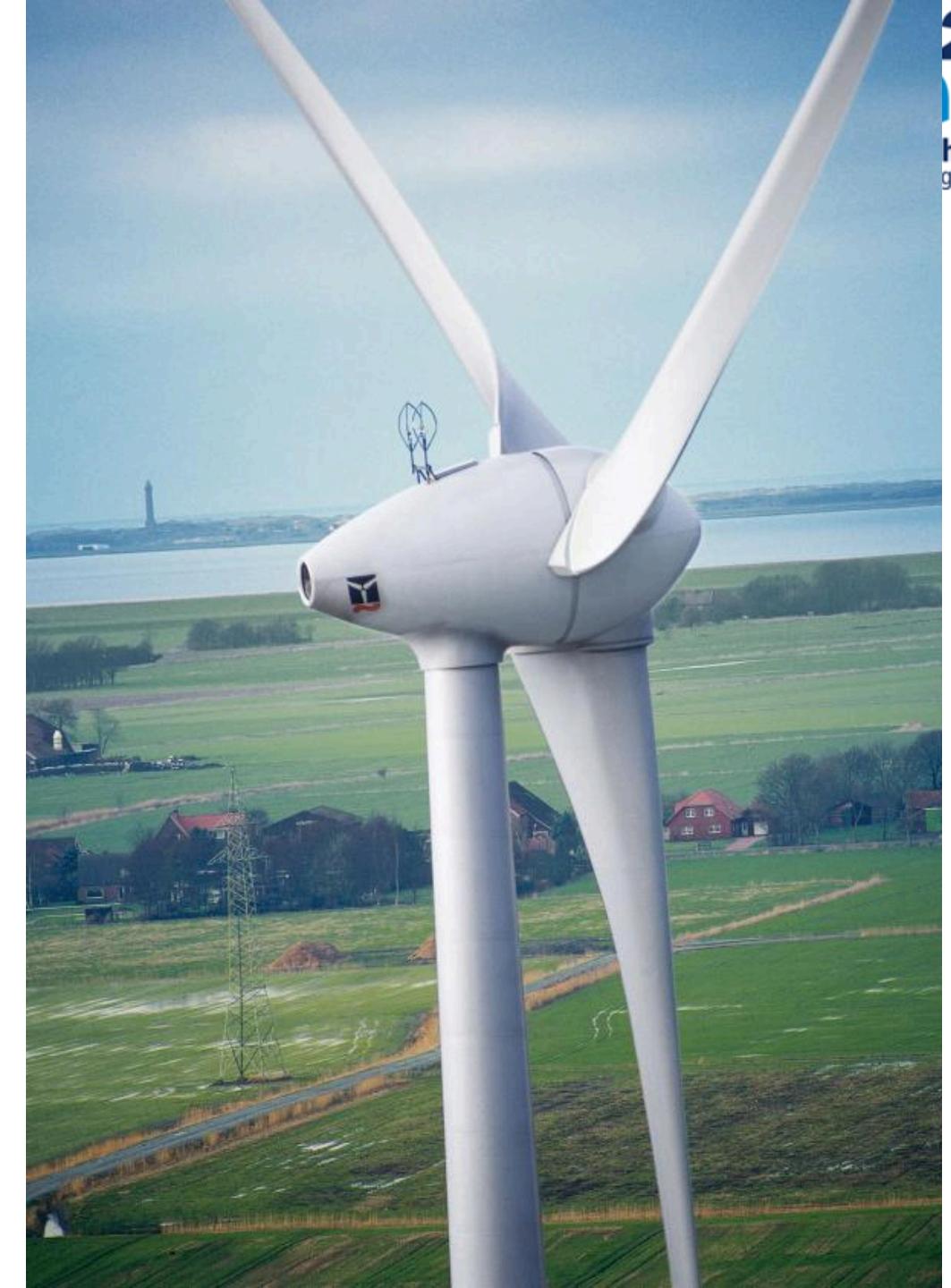
die gute chemische und mikrobiologische Widerstandsfähigkeit.

Kosten

## Nachteile

der für viele Strukturbauenteile zu niedrige Elastizitätsmodul der Glasfaser

Glasfasern sind unverrottbar (Vor- und Nachteil)



# Kohlefaser (C-Faser)

## Vorteil

C-Fasern sind sehr leicht, ihre Dichte ( $\rho_f \approx 1.8g/cm^3$ ) liegt deutlich unter derjenigen von Glasfasern ( $\rho_f \approx 2.54g/cm^3$ ).

extrem hohe Festigkeiten und sehr hohe Elastizitätsmoduln  
beide mechanischen Größen sind zudem in weiten Bereichen bei der Herstellung der Fasern einstellbar  
Exzellente Ermüdungsfestigkeit



## Nachteile

Geringere Druckfestigkeit in

Faserrichtung

Schlechtere Drapierbarkeit

Kosten

Elastizitätsmoduln in Faserlängs- und  
Querrichtung unterscheiden sich um  
eine Größenordnung (Vor- und  
Nachteil)



# Aufbau eines Rotorblattes von Windkraftanlagen



- Mit innovativen Faserverbundwerkstoffen auf Basis von Epoxy-Systemen der BASF lassen sich stabile Rotorblätter von über 60 m Länge herstellen.
- Mehrlagige resistente Hightech-Beschichtungen auf Polyurethan-Basis sorgen für ausreichenden Schutz gegen alle Umwelteinflüsse.

# Matrixmaterialien

- Faserverbundwerkstoffe können als Matrix auch Metalle, Beton, usw. haben



# Ausgangswerkstoffe FKV - Matrix

## Duroplastische Reaktionsharze

- Epoxidharze, Phenolharze, Polyesterharze, Vinylesterharze, ...
- Werden mit Reaktionsmittel für die Aushärtung gemischt
- Vorimprägnierte Fasern -> Prepregs
- Exotherm und volumenändernd beim Aushärten

## Thermoplaste

- Polypropylen, Polyamid, Polyarylensulfide, ...
- Schmelzen bei einer bestimmten Temperatur (55 °C – 155 °C)
- Teuer aber Recyclebar
- Schwieriger zu handhaben

# Verbund schematisch

## Symmetrien

- Transversale Isotropie  
(Eigenschaften in 2 und 3  
Richtung sind gleich)

- Orthotropie
- Anisotropie

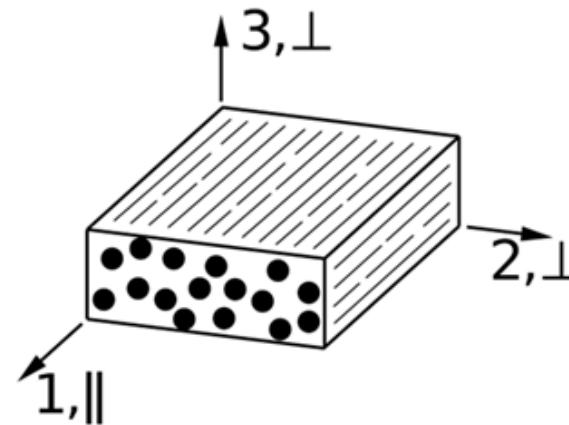
**Faservolumenanteil  $\varphi$**

Errechnet sich aus

Mischungsregel

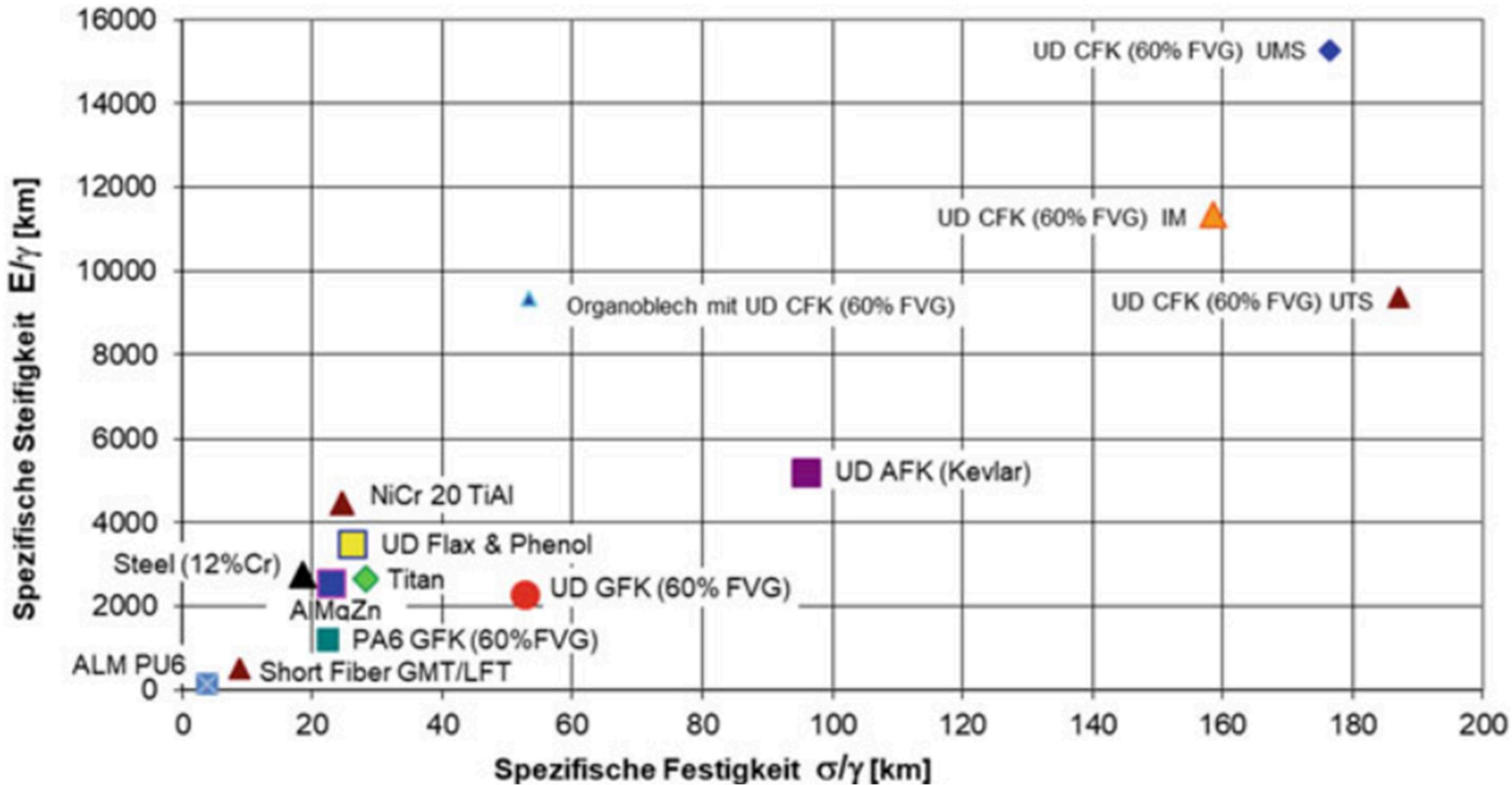
$$\rho = \varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_m$$

Steifigkeiten und Festigkeiten



[CC BY-SA 3.0 de](#)

	$E_{\text{f}\parallel}$ in N/mm <sup>2</sup>	$E_m$ in N/mm <sup>2</sup>	$E_{\text{f}\perp}$ in N/mm <sup>2</sup>
GF-EP-Verbund (E-Glasfaser)	73 000	3 400	45 160
CF-EP-Verbund (HT-C-Faser)	230 000	3 400	139 960
CF-EP-Verbund (HM-C-Faser)	392 000	3 400	236 560
AF-EP-Verbund (Aramidfaser)	125 000	3 400	76 360
Stahl 25CrMo4			206 000
Aluminium-Legierung AlCuMg2			72 400
Titan-Legierung TiAl6V4			108 000



# Fertigung

Wahl des Verfahrens hängt ab von

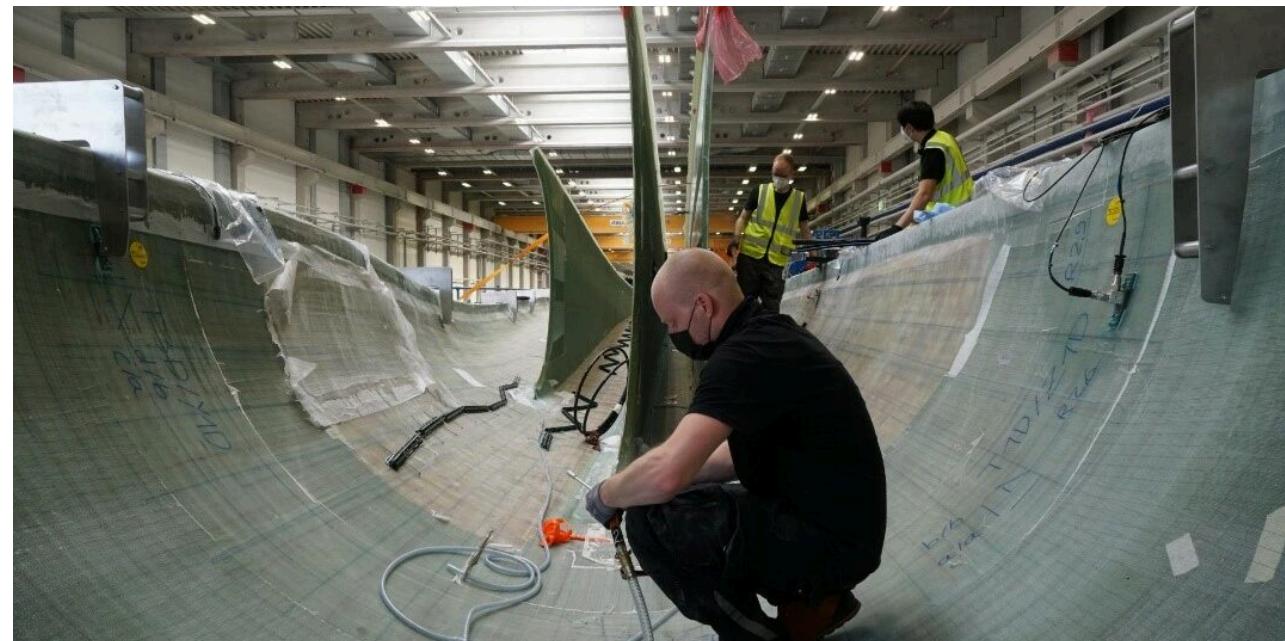
- Der konkreten Anwendung
- Einsatzbedingungen
- Grundmaterial (Faser, Matrix)
- Stückzahl
- Kosten
- Betriebsicherheit
- ...

## Fertigung - Verfahrensschritte

- Erstellen von Formwerkzeugen
- Zuschnitt und Ablage von Vorprodukten
- Aushärtung des Harzsystems
- Nachbearbeitung des Bauteils

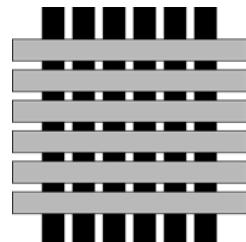
# Formwerkzeug / Faserablage

- Gips
- Kunststoff
- Metallen
- Faserverbunden
- Thermaldehnung sollte kompatibel

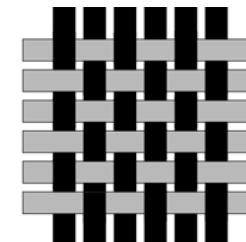


# Halbzeuge

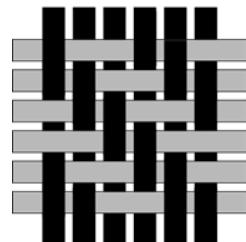
- Handhabbarkeit
- Verringerung der Fertigungstiefe
- Erhöhung der Qualität
- Beispiele:
  - Gewebe
  - Gelege
  - Fliese, Matten
  - Kernmaterialien
  - Flechtschlüche
  - ...



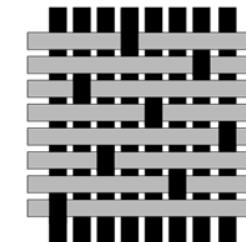
Gelege



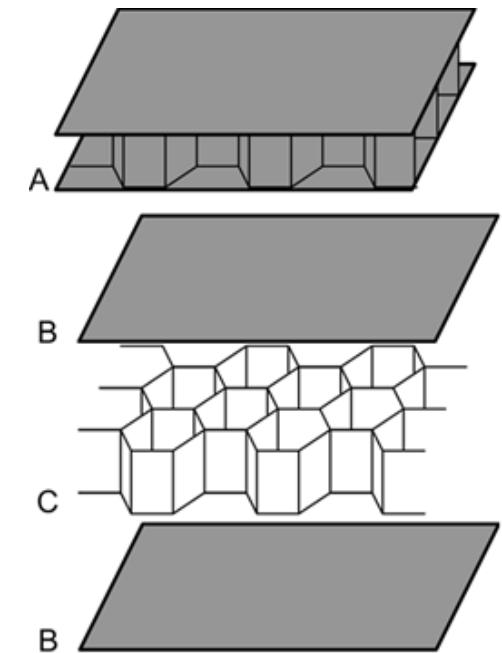
Leinengewebe



Köpergewebe



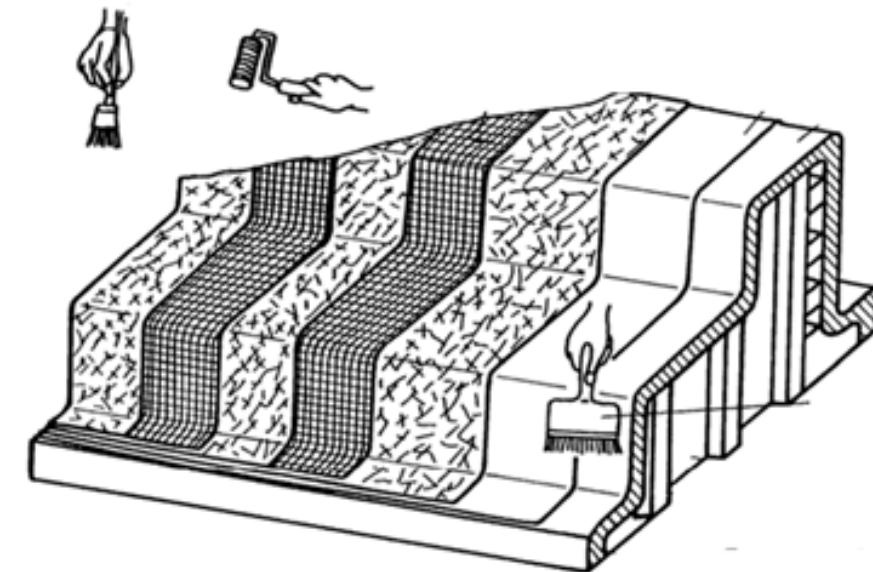
Atlasgewebe



[CC BY-SA 2.5](#)

# Fertigung

Manuell  
Faserablage  
Handlaminieren  
...  
Wickeln  
Spritzverfahren  
Pultrusion  
Pressen  
RTM (Resin Transfer Moulding)  
Verfahren  
Automatisierte Faserablageverfahren  
...





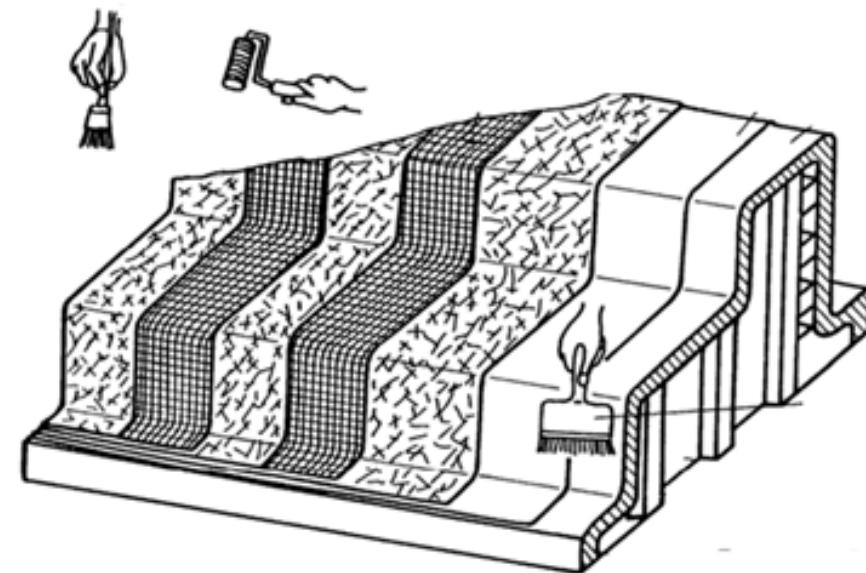
# Fertigung

Manuell

Faserablage

Handlaminieren

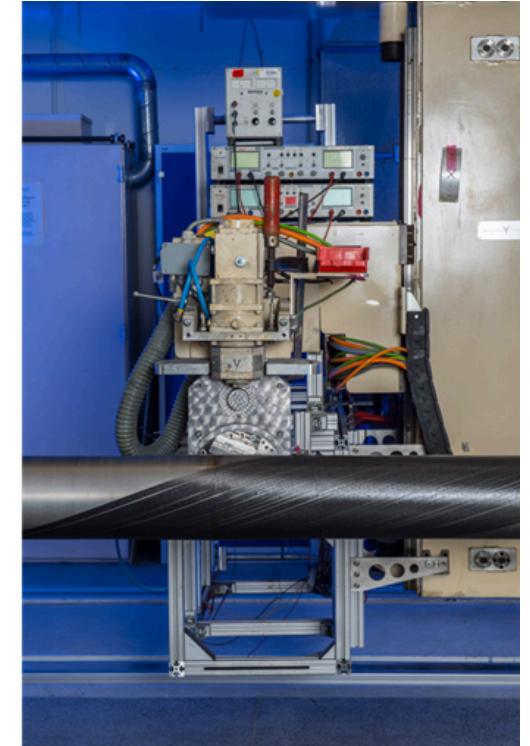
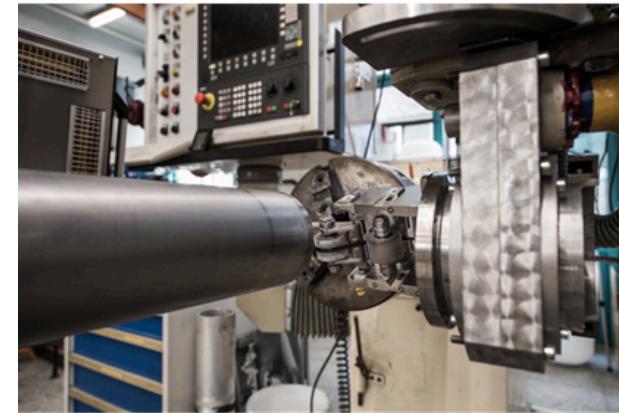
...



# Fertigung

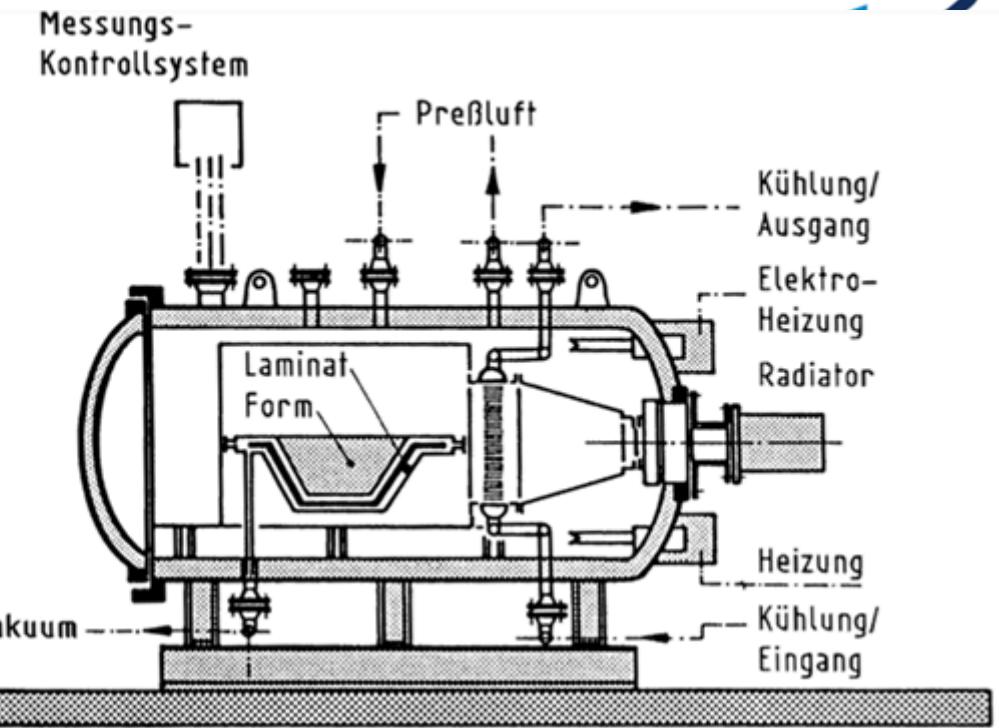
Manuell  
Faserablage  
Handlaminieren  
Wickeln  
Spritzverfahren  
Pultrusion  
Pressen

...



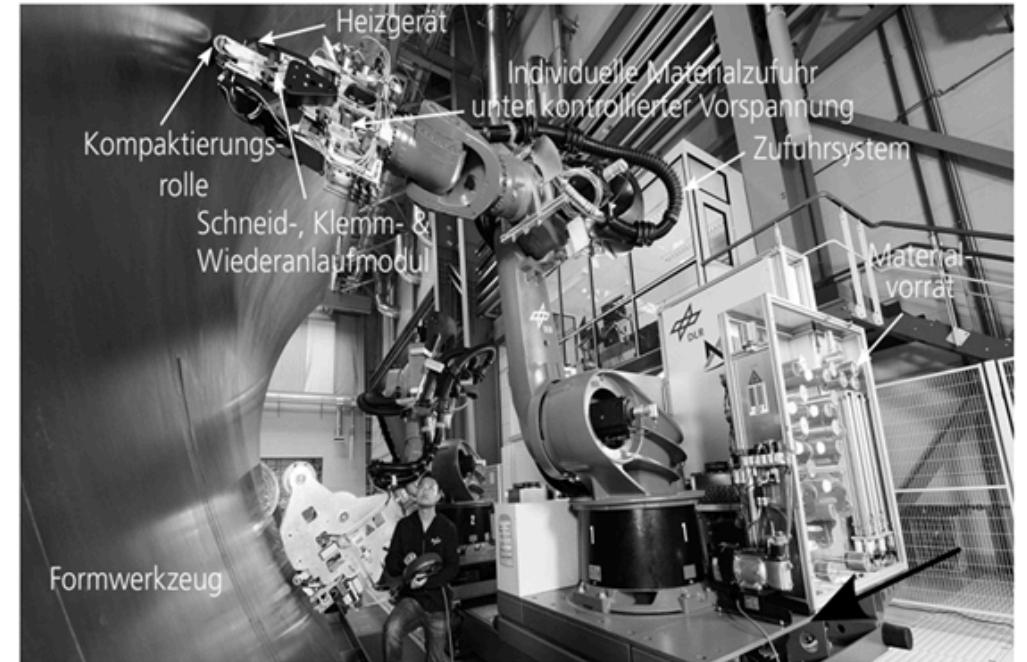
# Fertigung

- Manuell
- Faserablage
- Handlaminieren
- Wickeln
- Spritzverfahren
- Pultrusion
- Pressen
- RTM (Resin Transfer Moulding)
- Verfahren
- ...



# Fertigung

Manuell  
Faserablage  
Handlaminieren  
Wickeln  
Spritzverfahren  
Pultrusion  
Pressen  
RTM (Resin Transfer Moulding)  
Verfahren  
Automatisierte Faserablageverfahren  
...



AFP-Maschine im Zentrum für  
Leichtbauproduktionstechnologie (DLR-ZLP).

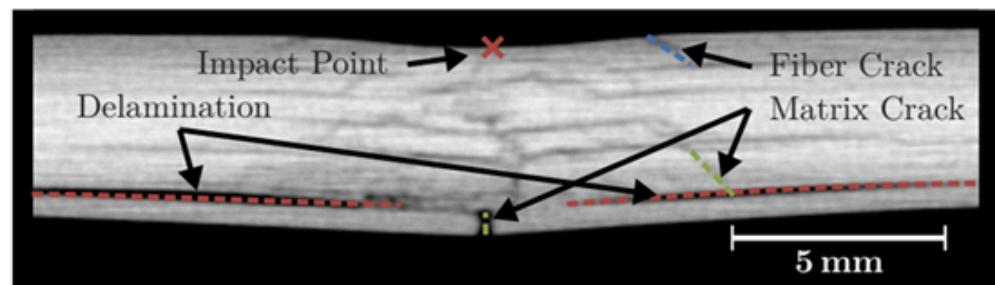
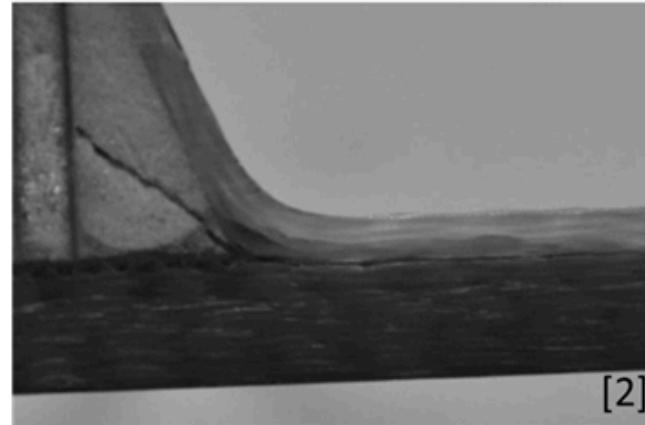
# Schäden in Faserverbunden

Nach Heslehurst können 52 Fehlertypen kategorisiert werden

- Einteilung nach Auftreten im Lebenszyklus
  - Materialprozess – Fehler die bei der Bereitstellung der Teilbestandteile auftreten
  - Komponentenfertigung – Fehler während der Kompositfertigung, welche während der Ablage, Aushärtung, Bearbeitung oder der Assemblierung auftreten
  - In-service Nutzung – im Betrieb auftretende Schäden
- Einteilung nach Größe
  - Mikroskopisch
  - Makroskopisch

# Delaminationen

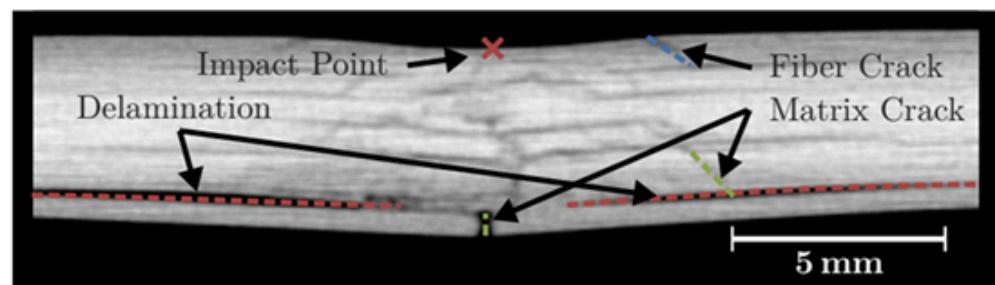
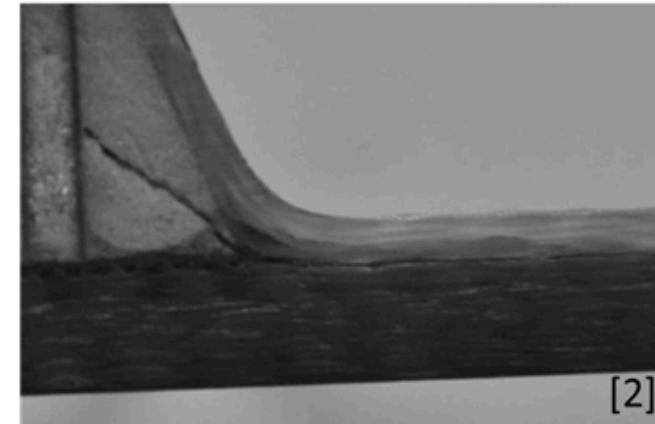
- eine der häufigsten Schädigungen
- hohe interlaminare Spannungen durch
- Querkontraktionseffekte
- Unterschiedliche Wärmedehnungen
- Kanten (Geometrie, Mikrorisse, Poren)
- Trennfolien



Dienel: Damage Assessment for Composite Structures based on Individual Residual Strength Prediction, 2019

# Delaminationen

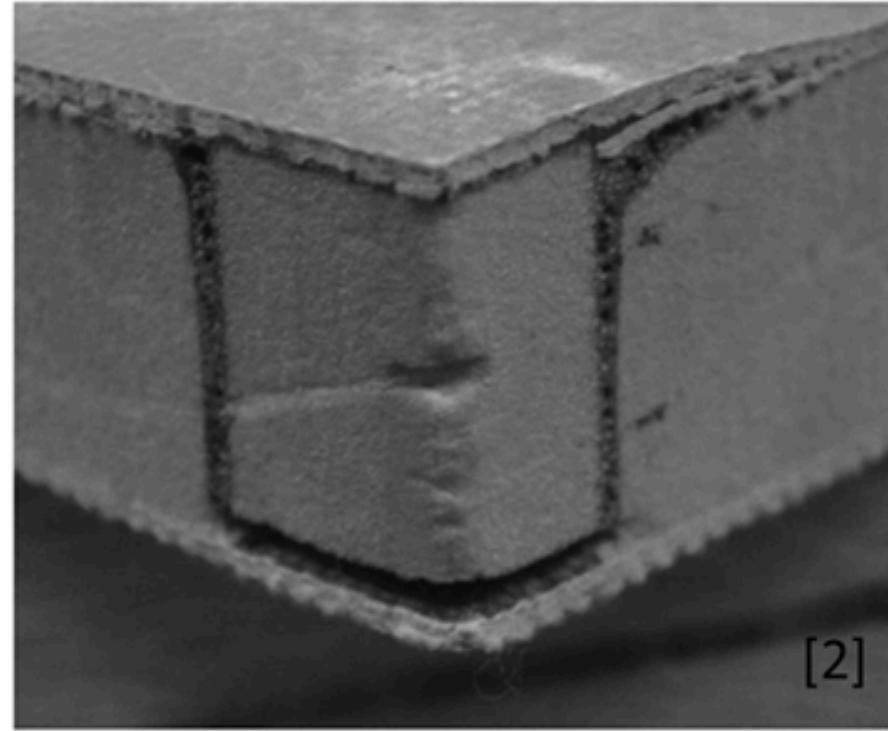
- Verschmutzungen
- Trennung zwischen zwei Lagen – interlaminarer Riss
- Feuchteeintritt
- Lebensdauerreduktion
- Stabilität



Dienel: Damage Assessment for Composite Structures based on Individual Residual Strength Prediction, 2019

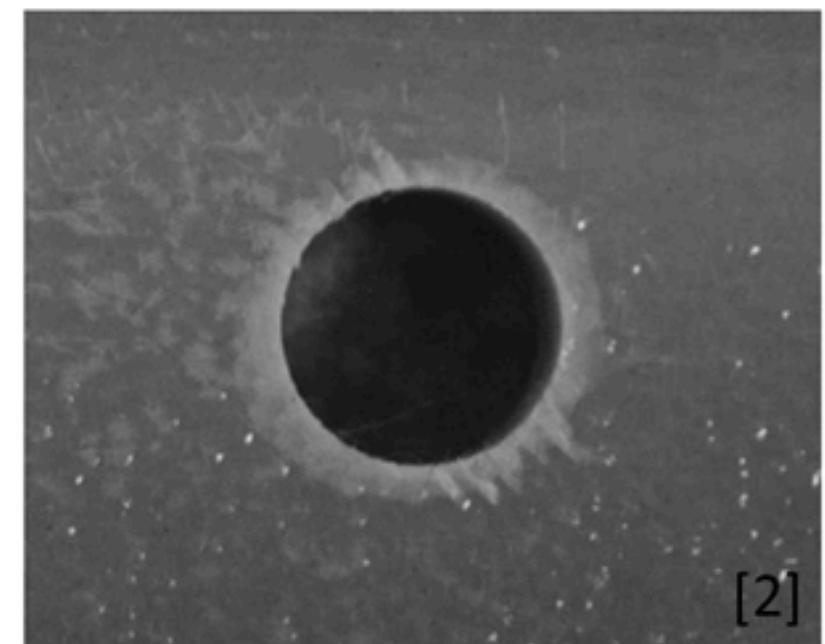
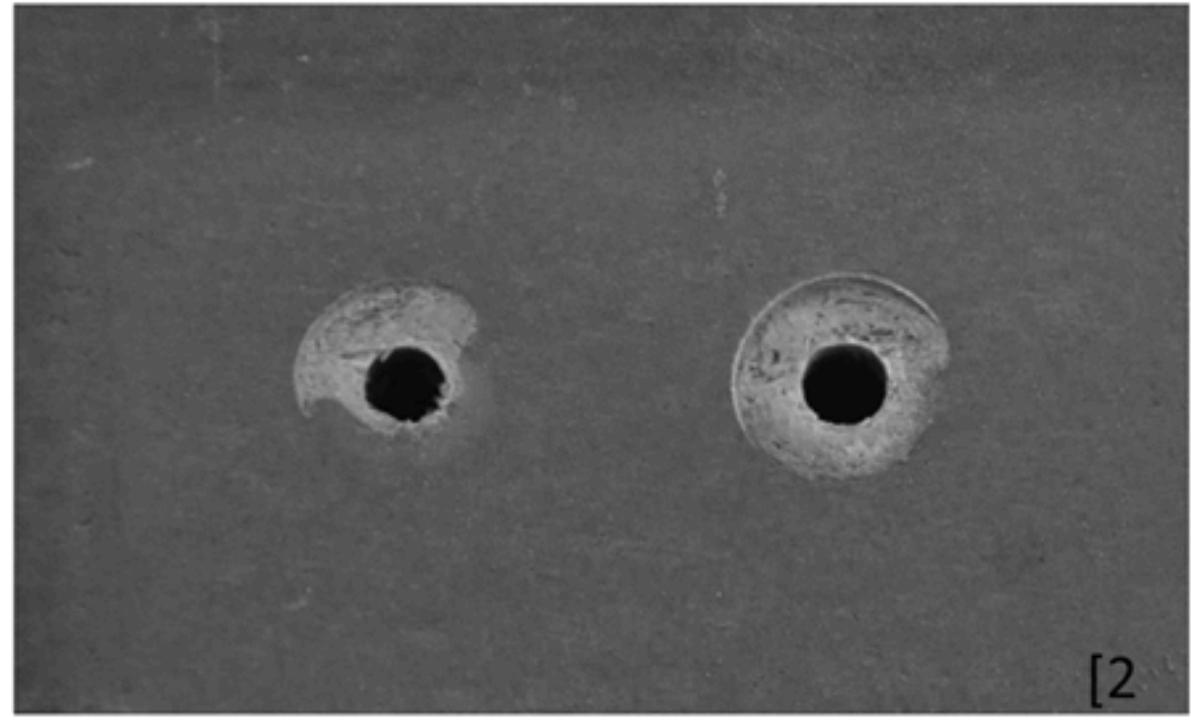
# Ablösungen

- Schlechte Prozesskontrolle
- Schlechte Passung
- Durch eintretenden Trennfilm
- Schlechte Oberflächenbehandlung  
(Verschmutzung, etc.)
- Relevant bei Kernanbindung und Verklebung von Komponenten



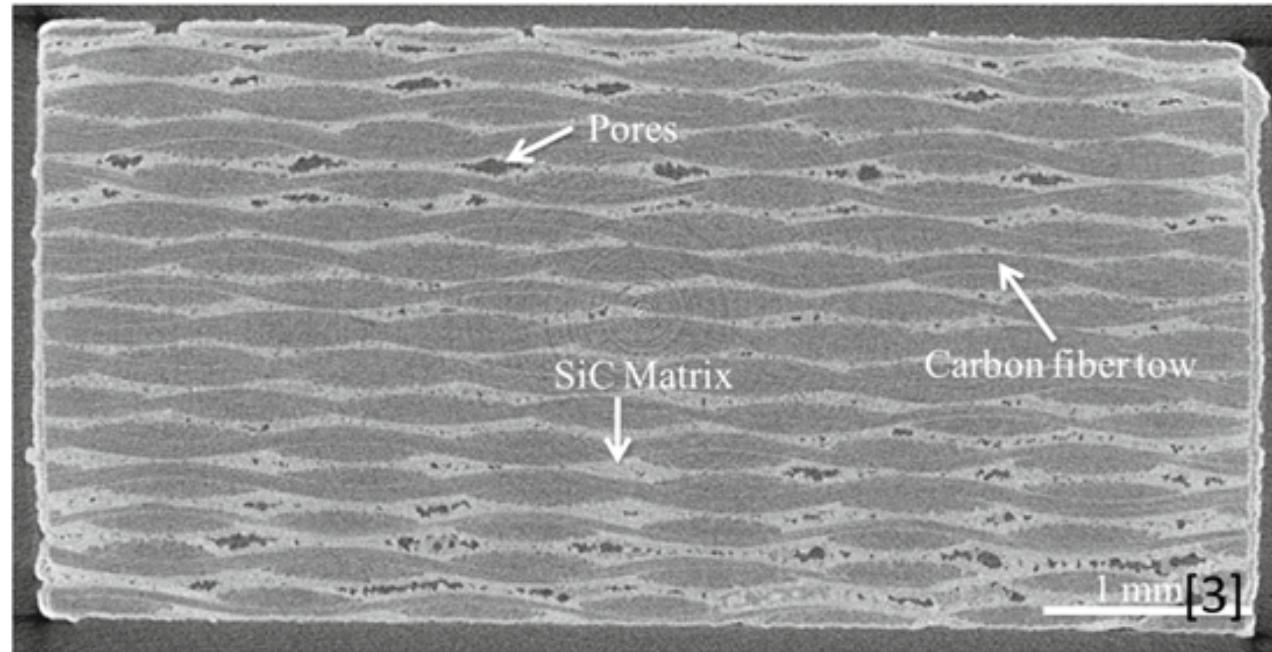
# Fehler an Verbindungsbohrungen

- Zu starkes Anziehen von Schrauben Oberflächenschädigung
- Lokale Beschädigung der ersten Lage
- Austrittsschäden bei Bohrungen
- Meist Splitterungen und lokale Delaminationen
- Splitter können bei Bohrungen zwischen zwei Komponenten verbleiben



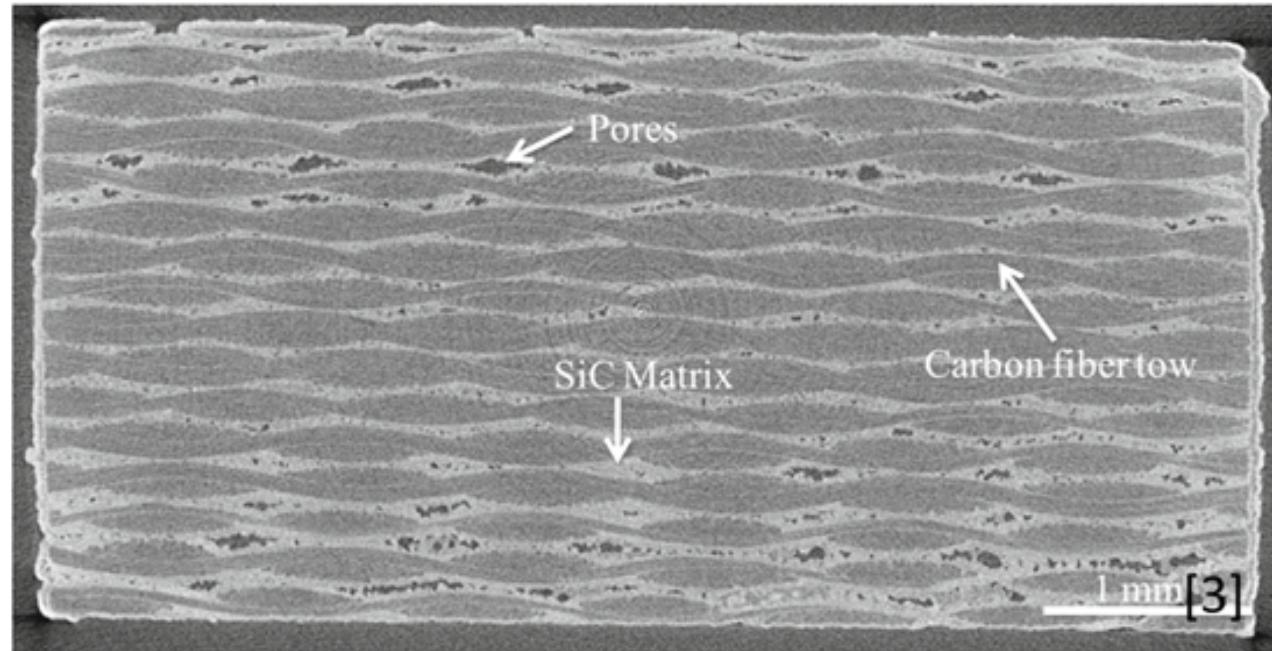
# Porosität

- Schlechte Material- und Prozesskontrolle
- Überaltertes Material
- Feuchtigkeit im Prepreg
- Fehlfunktion im Autoklav



# Porosität

- Verschlechtert die Lageneigenschaften
- Auswirkung auf die Ermüdungslebens-dauer
- Konzentrationen von Poren wichtiger als Größe
- Wirkt sich auf die Dichtheit aus



# Vor- und Nachteile

## Vorteile

- Spezifische Materialeigenschaften
- Weitgehend elastisches Verhalten
- Hohe Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung
- „maßgeschneidertes“ Material
- Alterung- und Korrosionsbeständigkeit

# Vor- und Nachteile

## Nachteile

- Variantenreichtum
- Geringe Zugfestigkeit senkrecht zur Faser
- Schwierige Prüfung
- Recyclebarkeit
- Spezifische Materialeigenschaften und Verarbeitungsverfahren