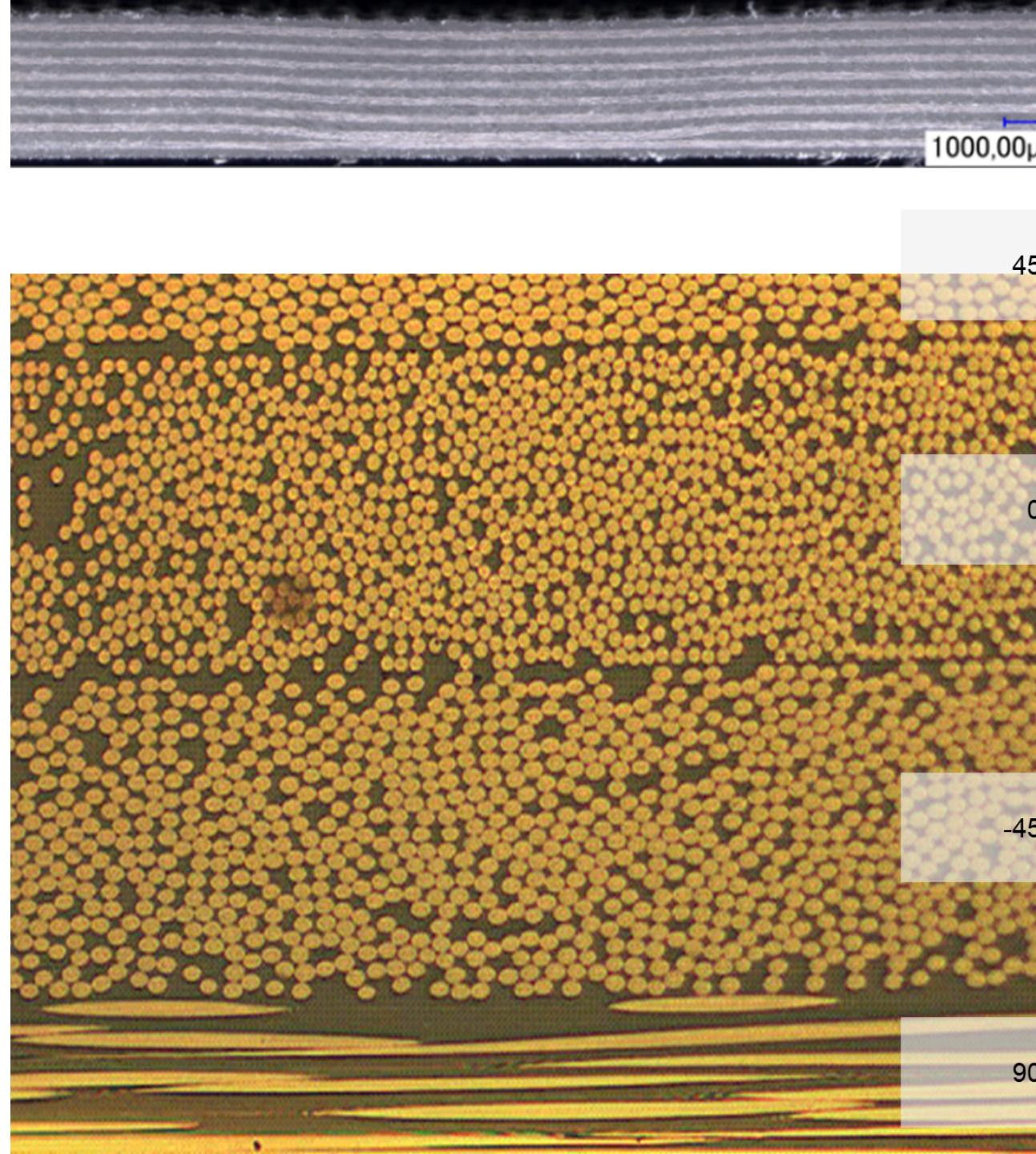


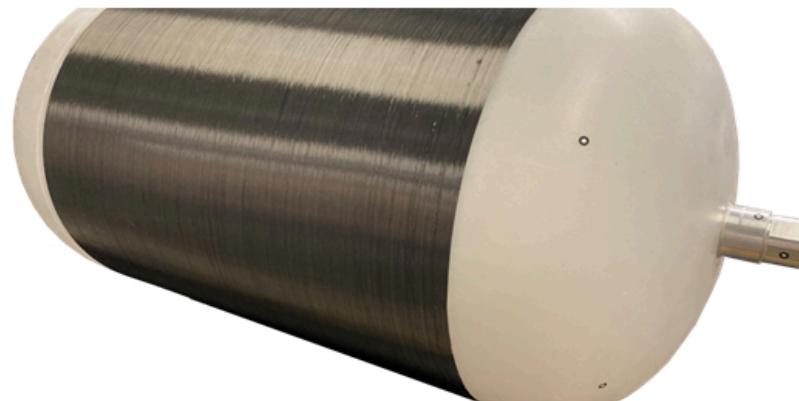
Vorlesung Werkstofftechnik - Faserverbundwerkstoffe

Prof. Dr.-Ing. Christian Willberg^{ID}

Hochschule Magdeburg-Stendal

Kontakt: christian.willberg@h2.de

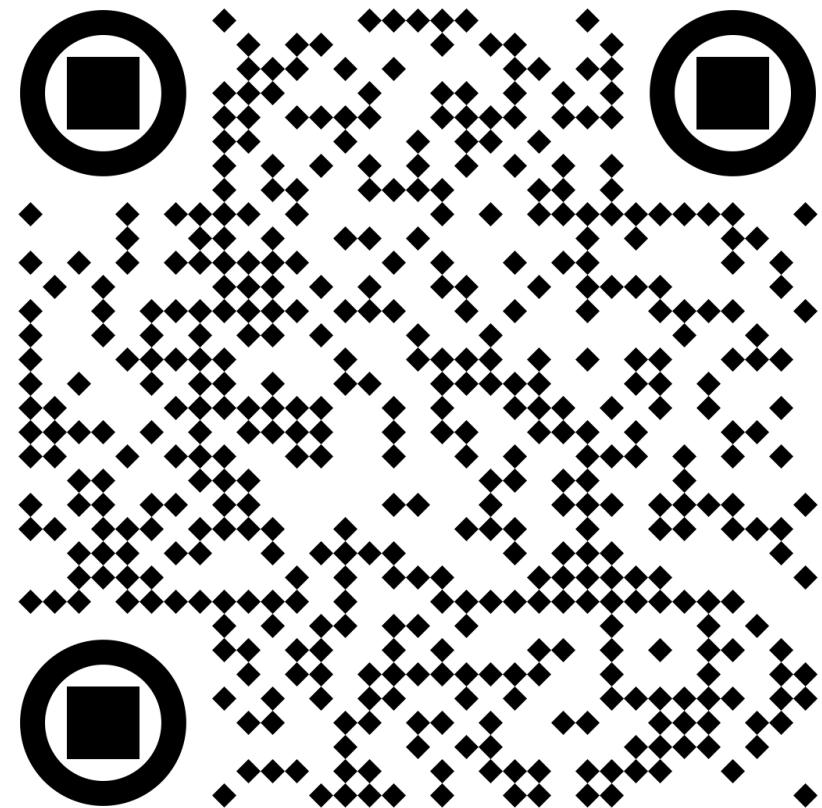




[https://leichtbau.dlr.de/der-weg-zu-leichten- und-langlebigen-wasserstoffdruckbehältern](https://leichtbau.dlr.de/der-weg-zu-leichten-und-langlebigen-wasserstoffdruckbehältern)

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



Fokus von Industrien

- Luft- und Raumfahrt
 - Gutes Festigkeits/Steifigkeits – Gewichtsverhältnis
 - Schaden-, Korrosionsstoleranz
 - Wartbarkeit / Reparierbarkeit
- Bauwesen
 - Widerstand gegen Umwelteinflüsse und Korrosion
 - Langlebigkeit

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

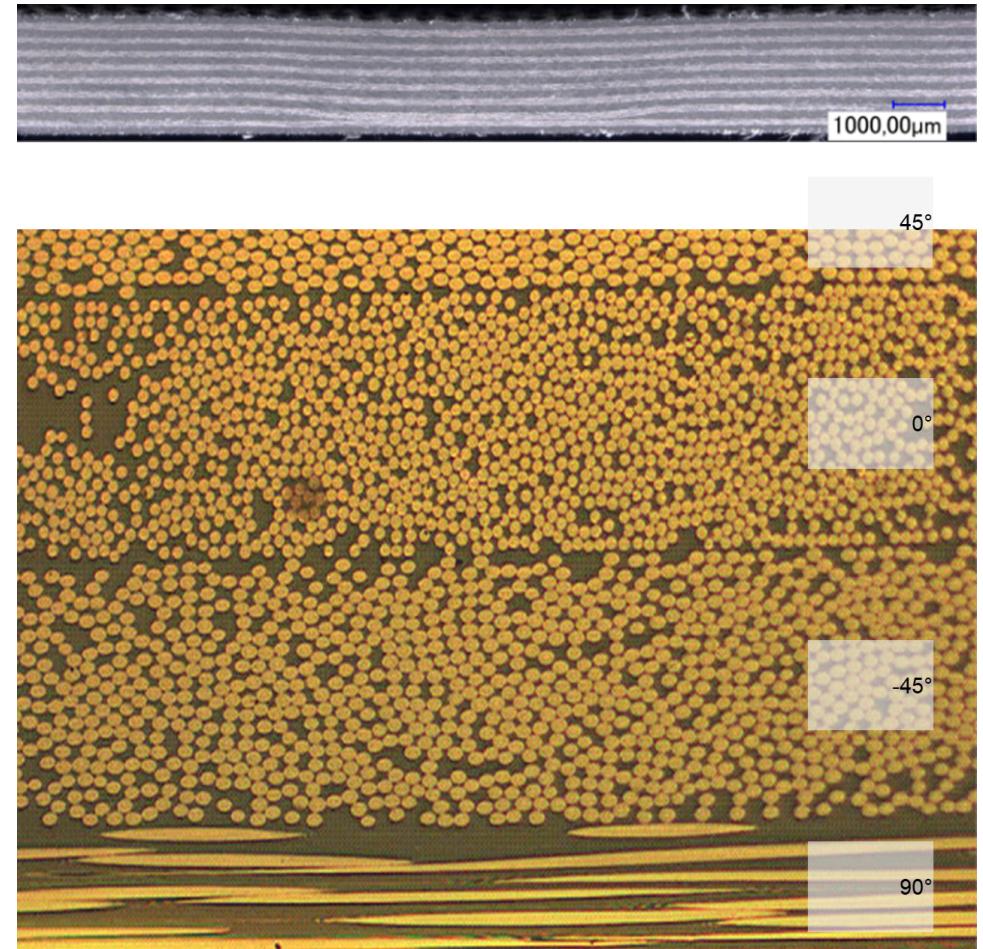
Komponenten von Faserkunststoffverbunde

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

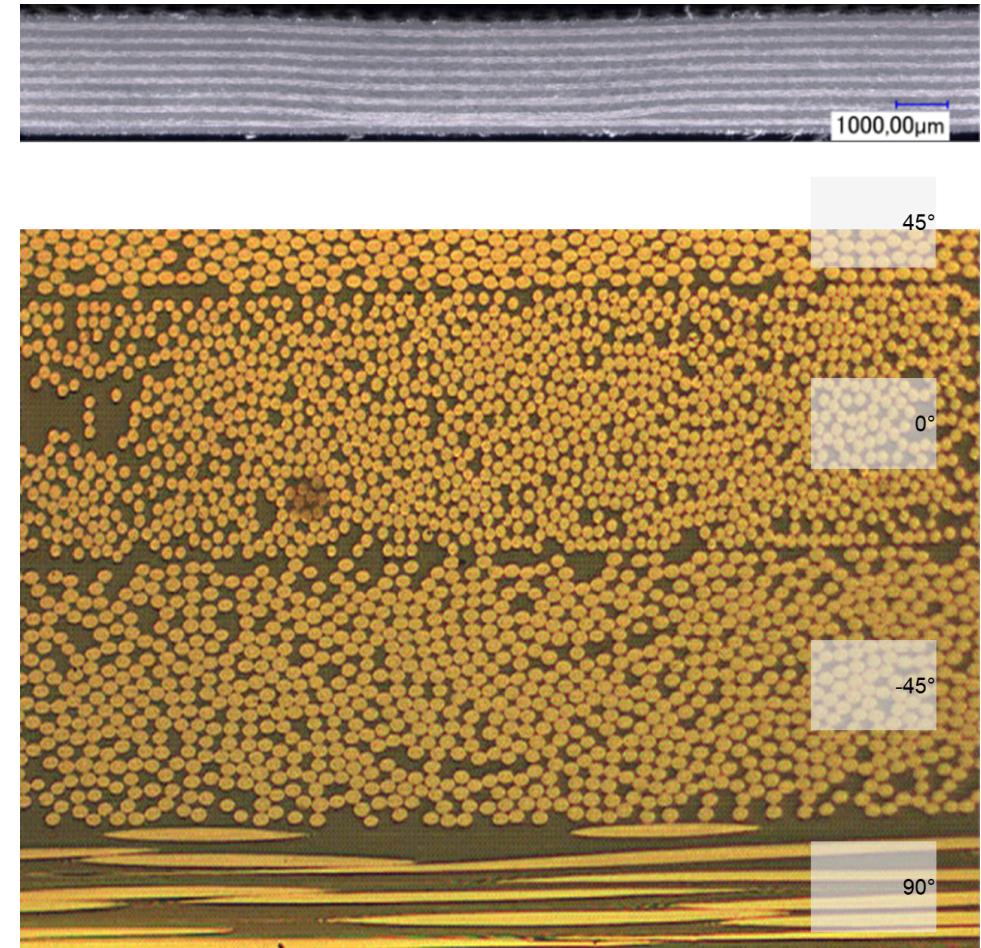
Begrenzte thermische Dehnung

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



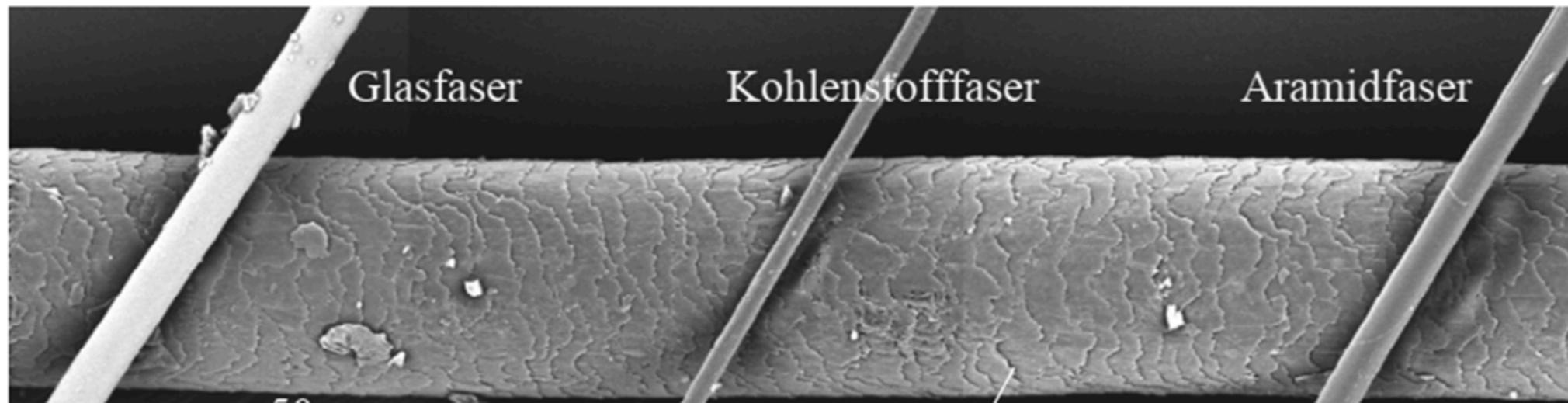
Ausgangswerkstoffe - Faser

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



Ausgangswerkstoffe - Faser

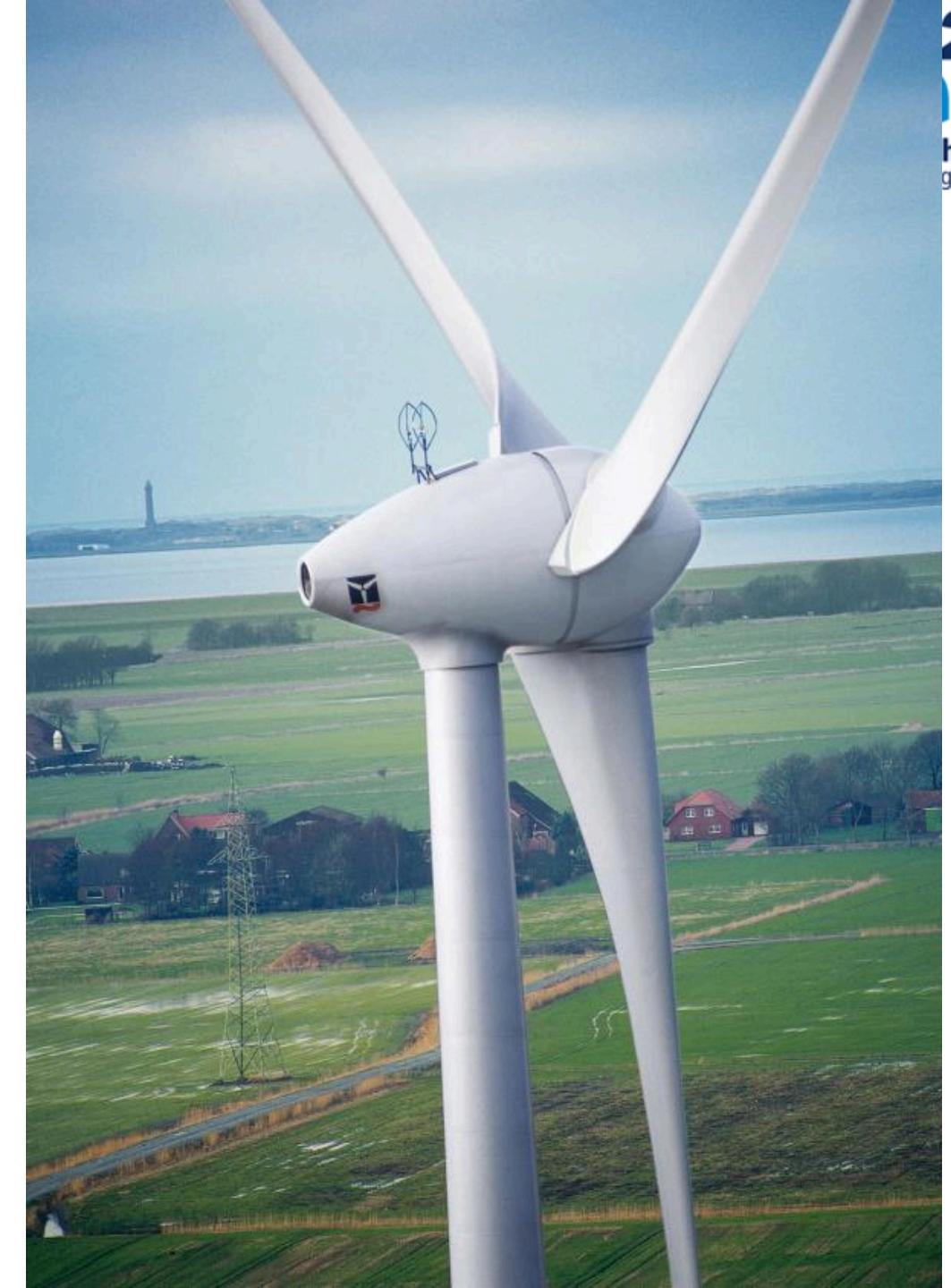
- Naturfasern: Haare, Wolle, Seide, Baumwolle, Flachs, Sisal, Hanf, Jute, Ramie, Bananenfasern ...
- Organische Fasern: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polyester (PES), Polyacrylnitril (PAN), Aramid, Kohlenstoff ...
- Anorganische Fasern: Glas, Basalt, Quarz, SiC, Al₂O₃, Bor, ...
- 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

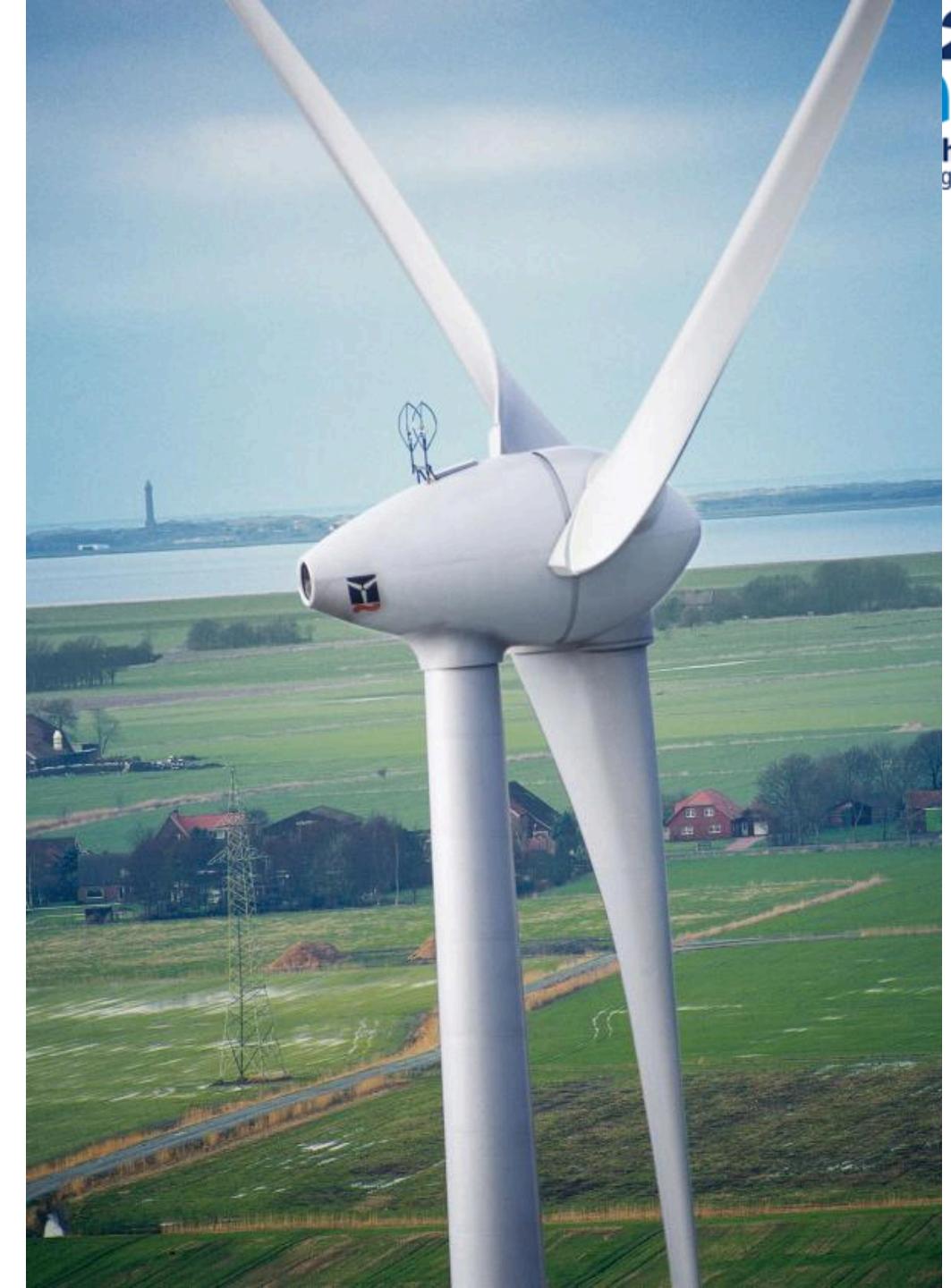
die gute chemische und mikrobiologische Widerstandsfähigkeit.

Kosten

Nachteile

der für viele Strukturbauenteile zu niedrige Elastizitätsmodul der Glasfaser

Glasfasern sind unverrottbar (Vor- und Nachteil)

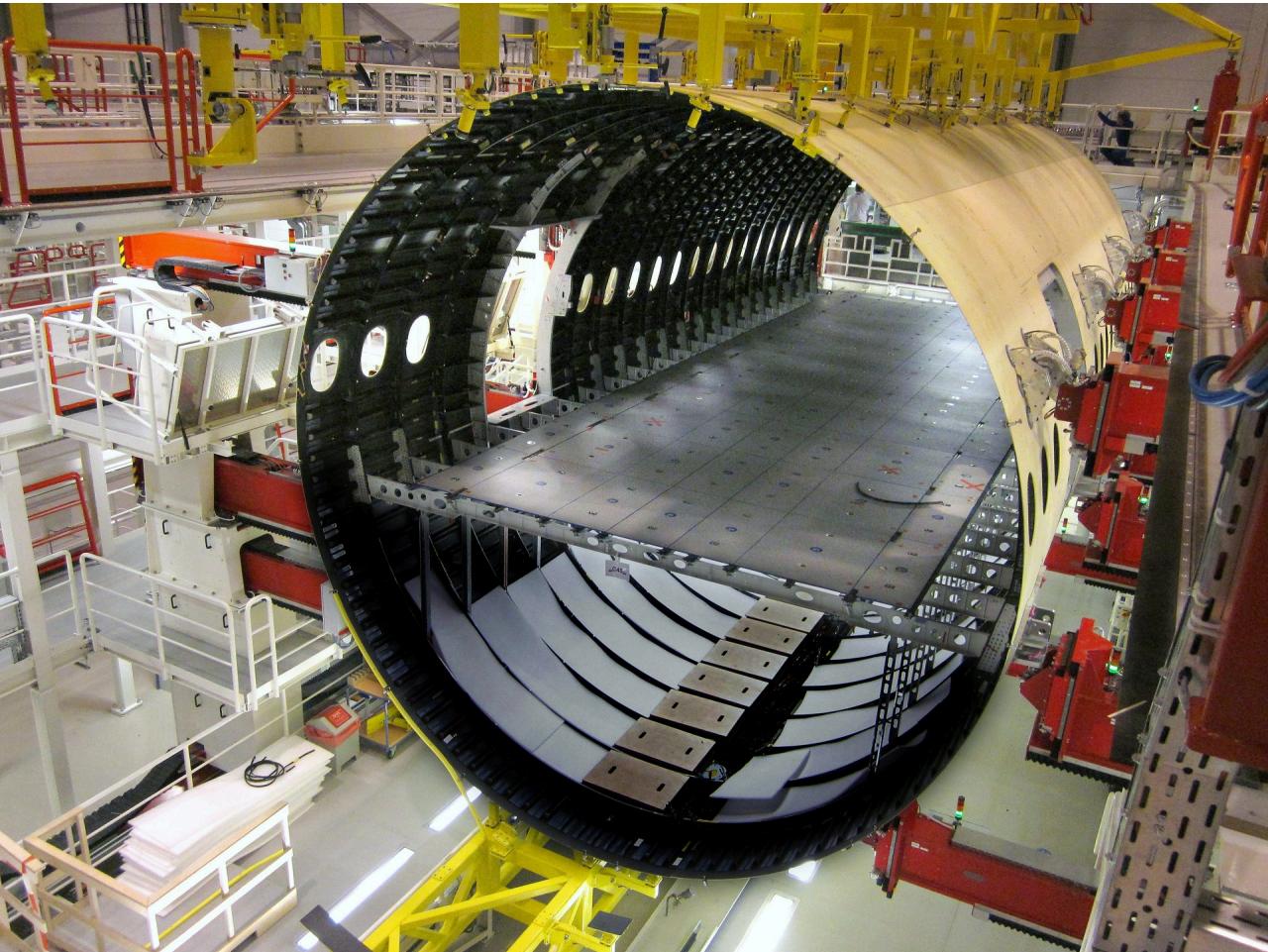


Kohlefaser (C-Faser)

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



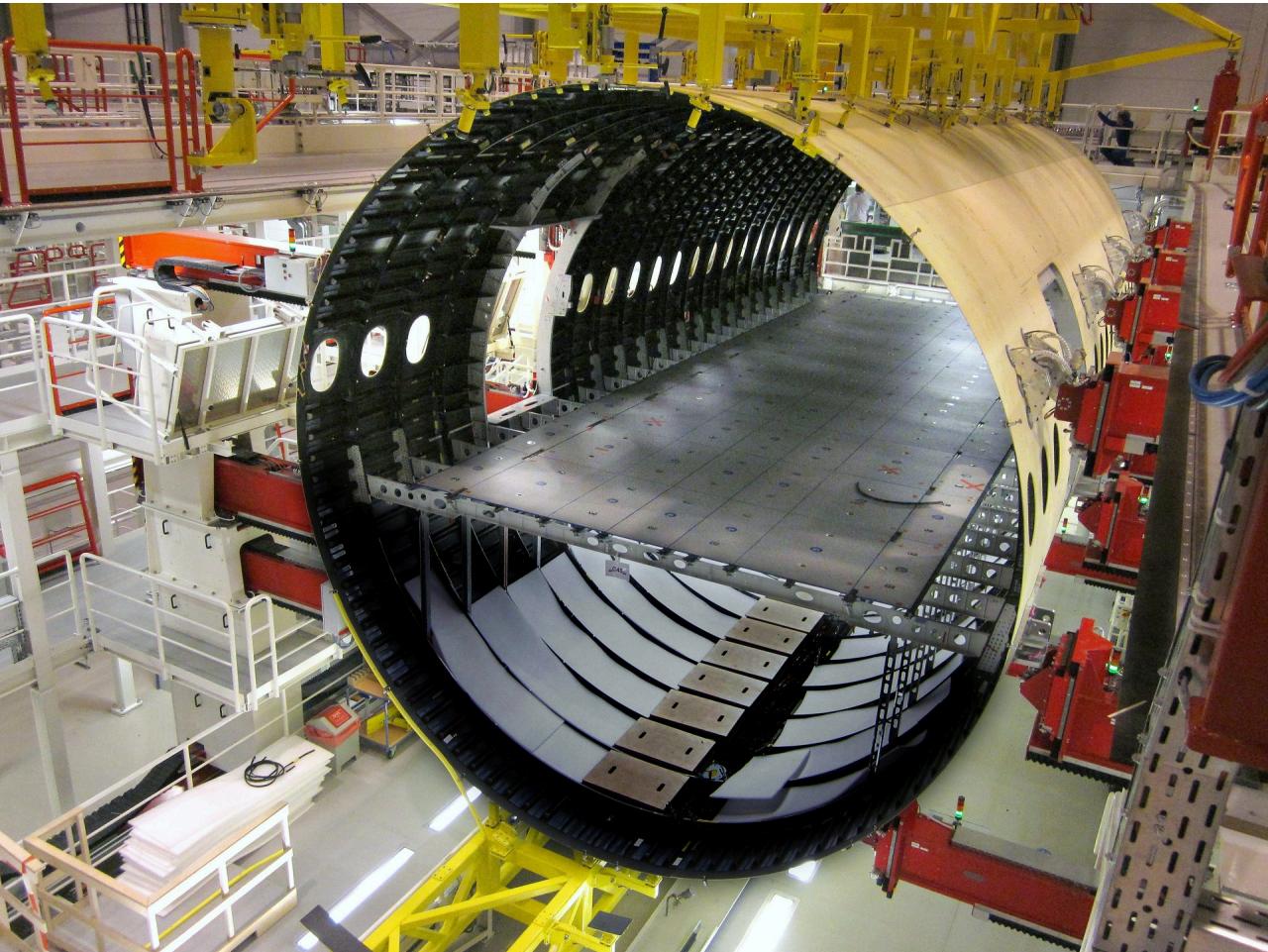
Nachteile

Geringere Druckfestigkeit in Faserrichtung

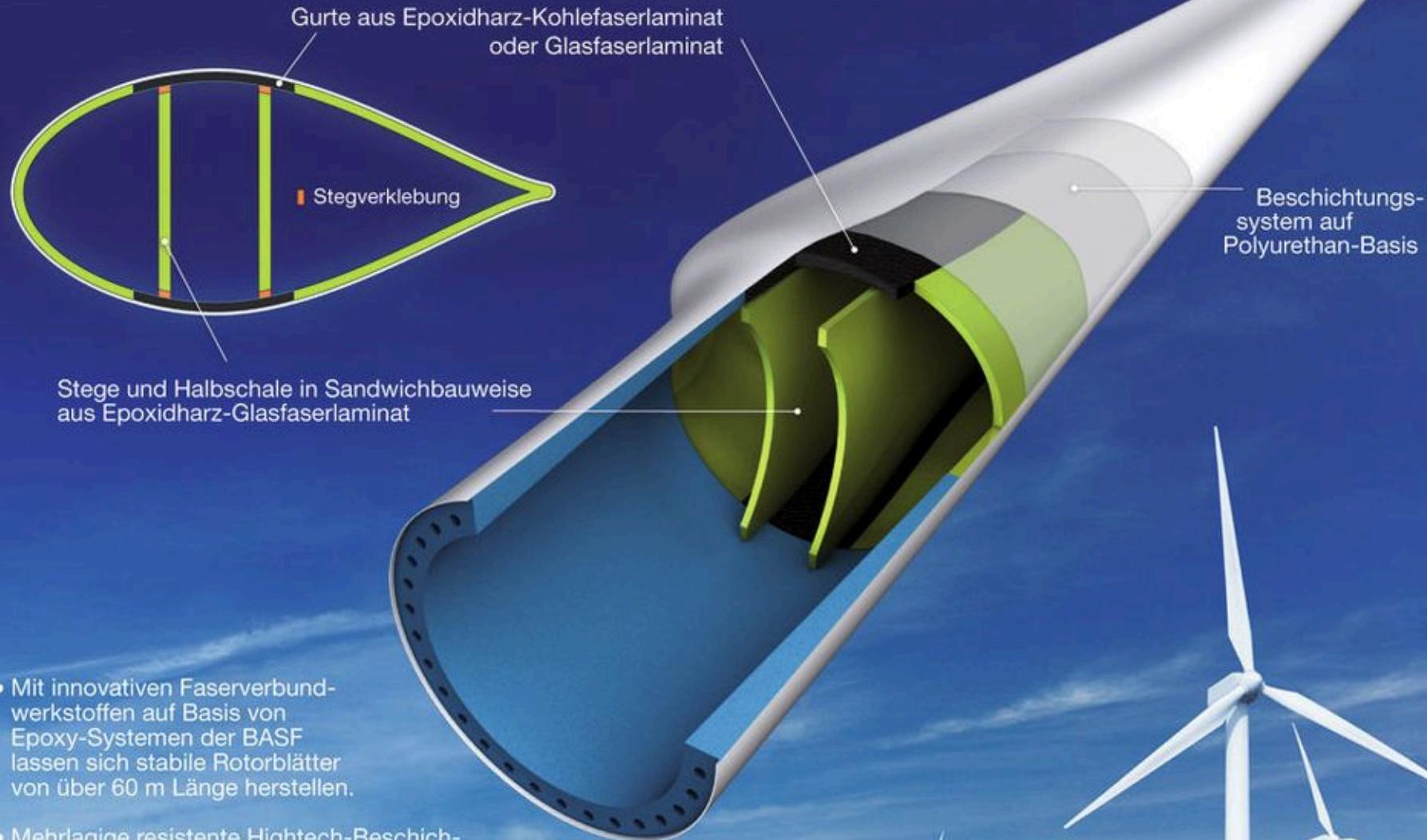
Schlechtere Drapierbarkeit

Kosten

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



Aufbau eines Rotorblattes von Windkraftanlagen



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

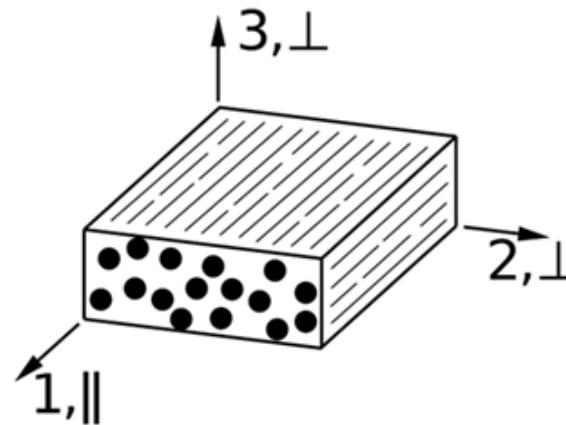
Faservolumenanteil φ

Errechnet sich aus

Mischungsregel

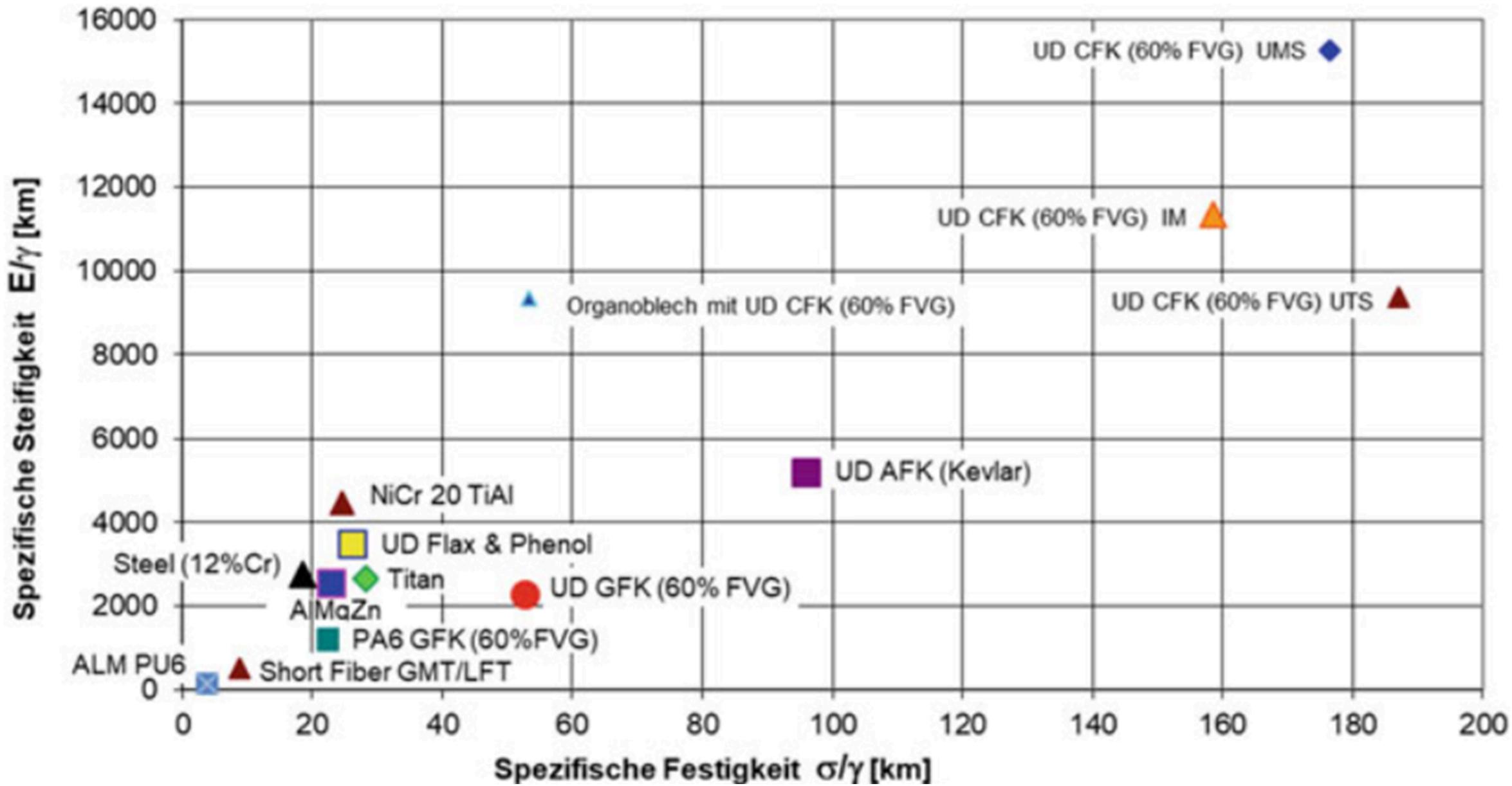
$$\rho = \varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_m$$

Steifigkeiten und Festigkeiten



[CC BY-SA 3.0 de](#)

| | $E_{\text{f}\parallel}$ in N/mm ² | E_m in N/mm ² | E_{\parallel} in N/mm ² |
|-----------------------------|--|----------------------------|--------------------------------------|
| 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

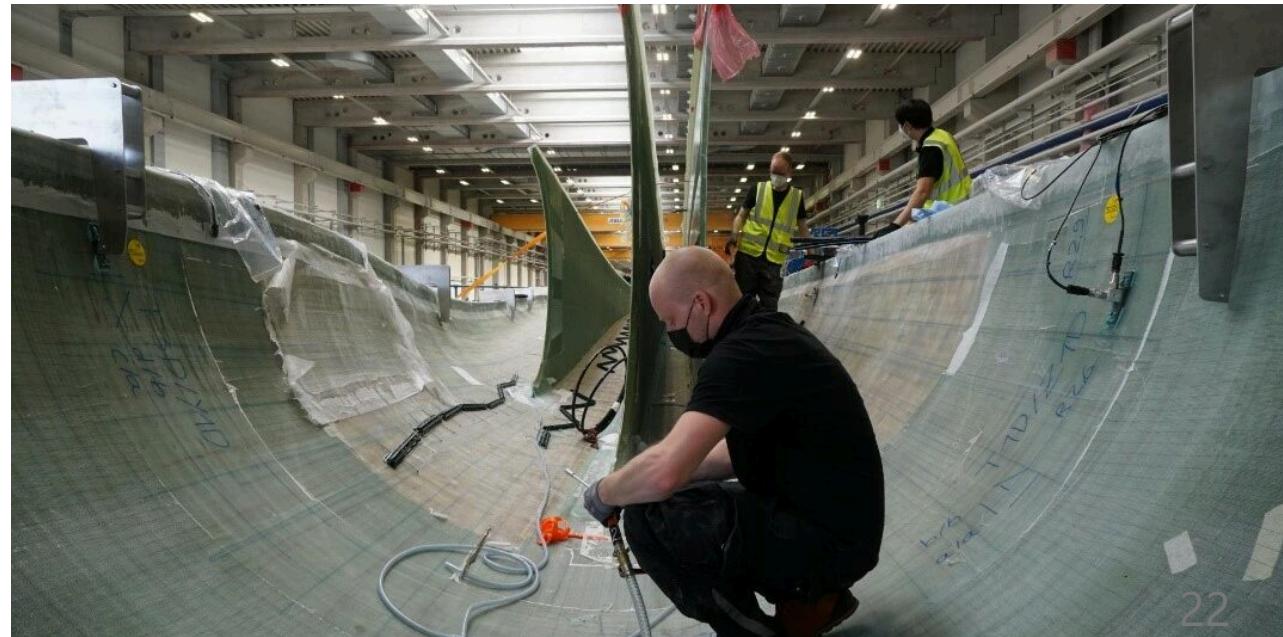
- Der konkreten Anwendung
- Einsatzbedingungen
- Grundmaterial (Faser, Matrix)
- Stückzahl
- Kosten
- Betriebsicherheit
- ...

Fertigung - Verfahrensschritte

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

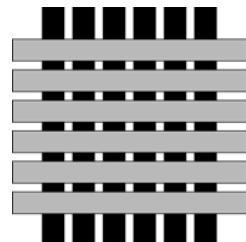
Formwerkzeug / Faserablage

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

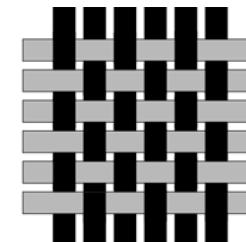


Halbzeuge

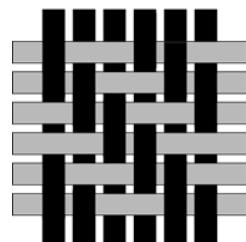
- Handhabbarkeit
- Verringerung der Fertigungstiefe
- Erhöhung der Qualität
- Beispiele:
 - Gewebe
 - Gelege
 - Fliese, Matten
 - Kernmaterialien
 - Flechtschläuche
 - ...



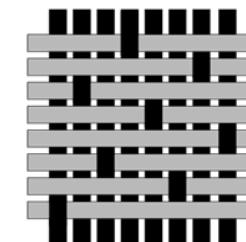
Gelege



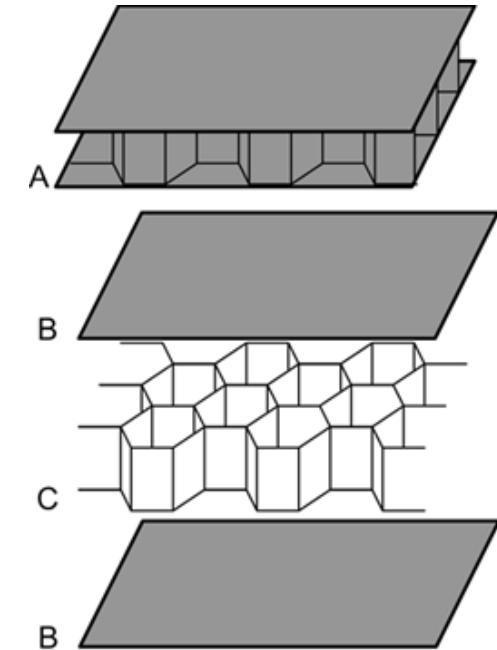
Leinengewebe



Köpergewebe



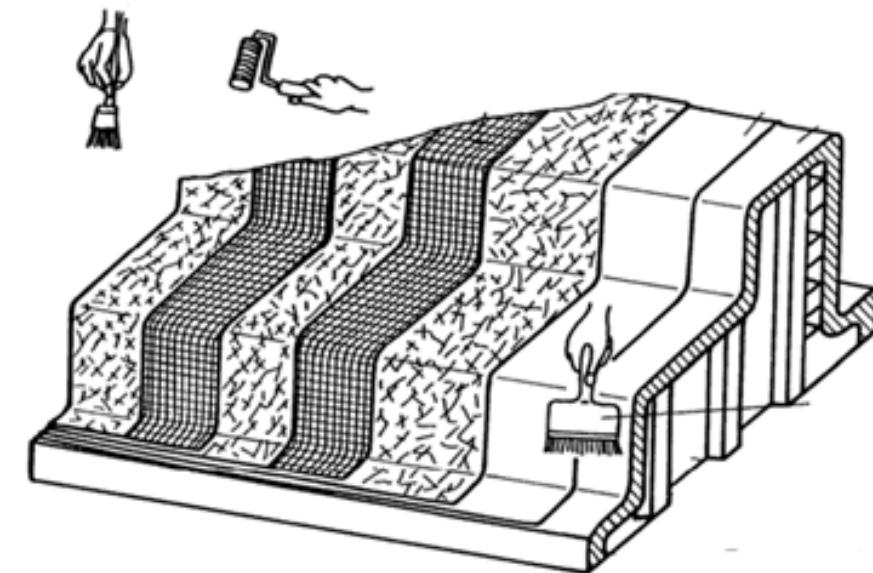
Atlasgewebe



[CC BY-SA 2.5](#)

Fertigung

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





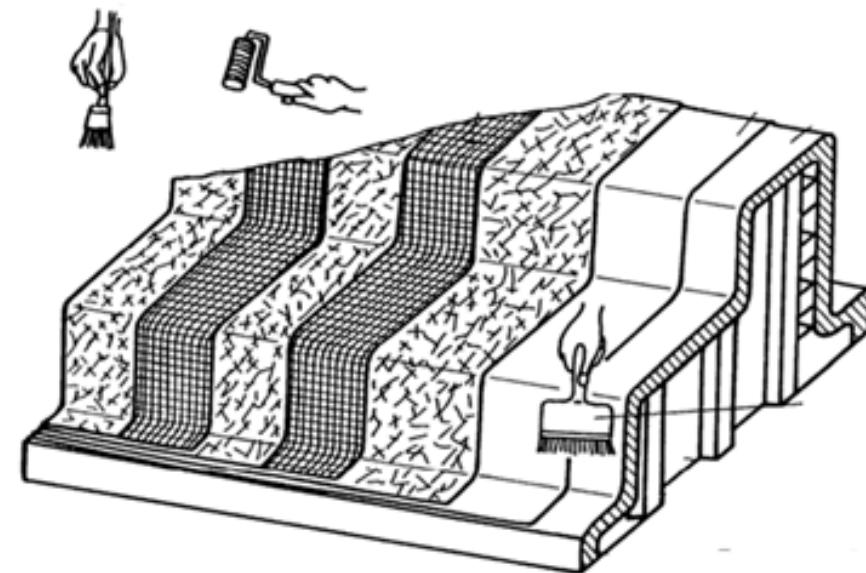
Fertigung

Manuell

Faserablage

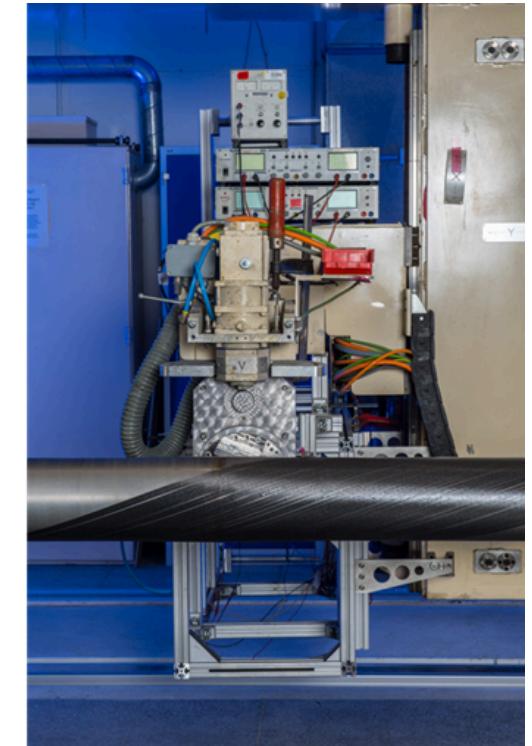
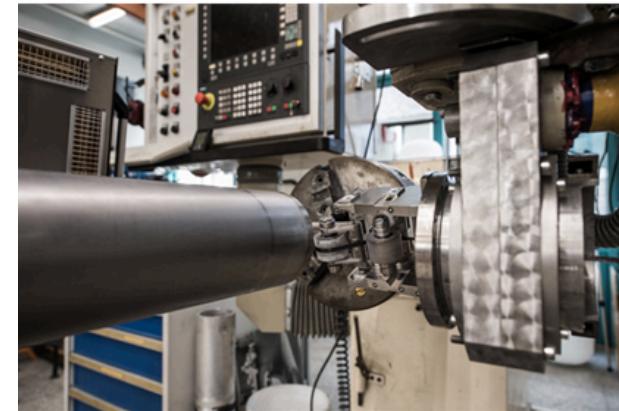
Handlaminieren

...



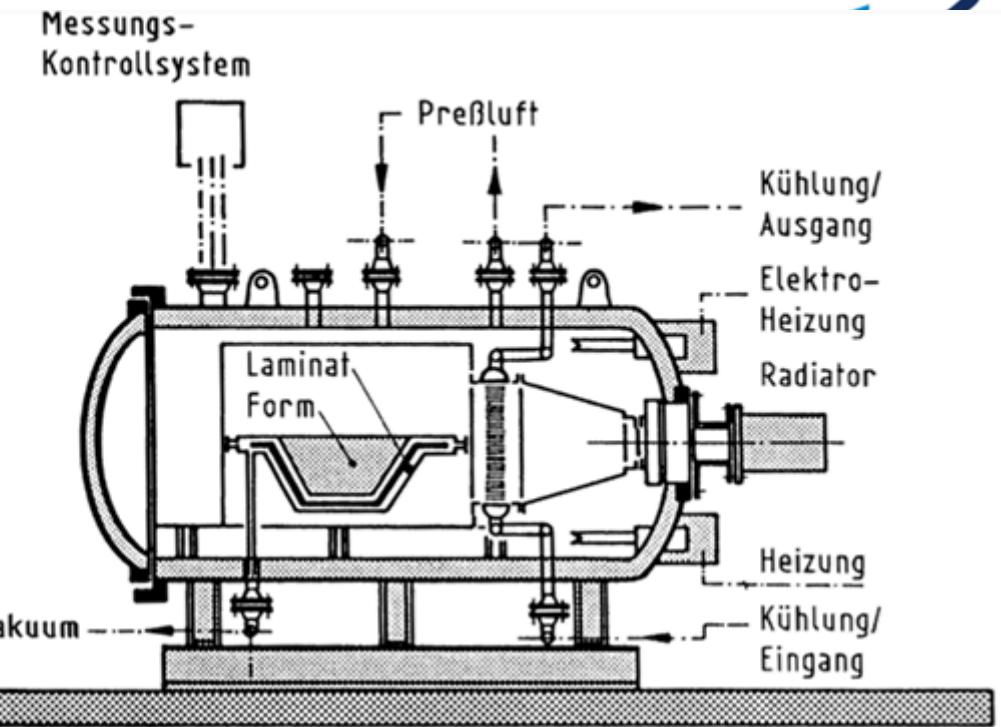
Fertigung

Manuell
Faserablage
Handlaminieren
Wickeln
Spritzverfahren
Pultrusion
Pressen
...



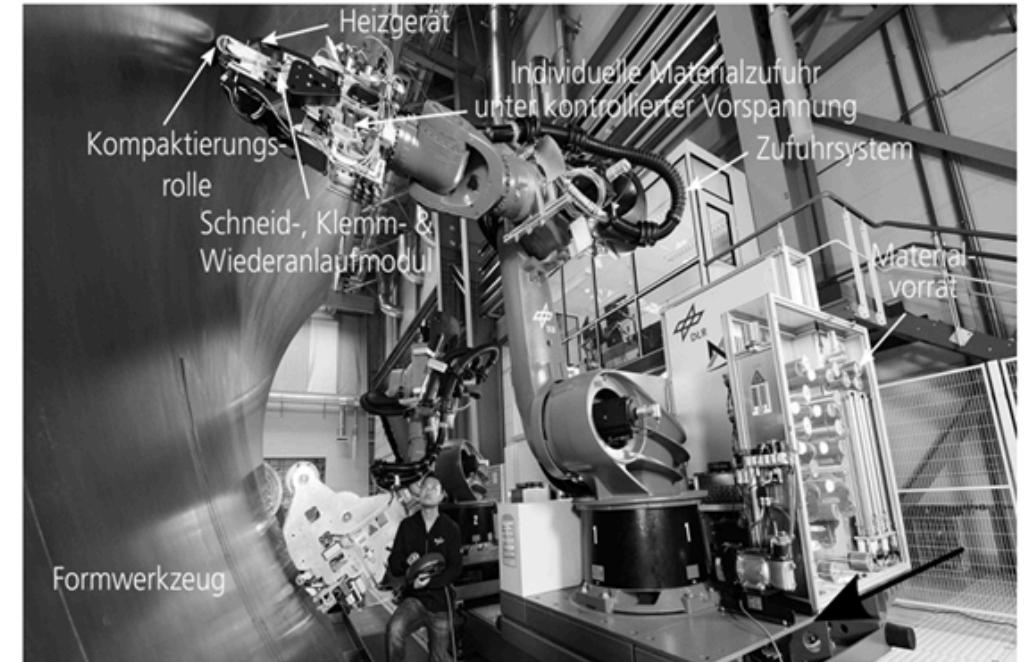
Fertigung

- 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).

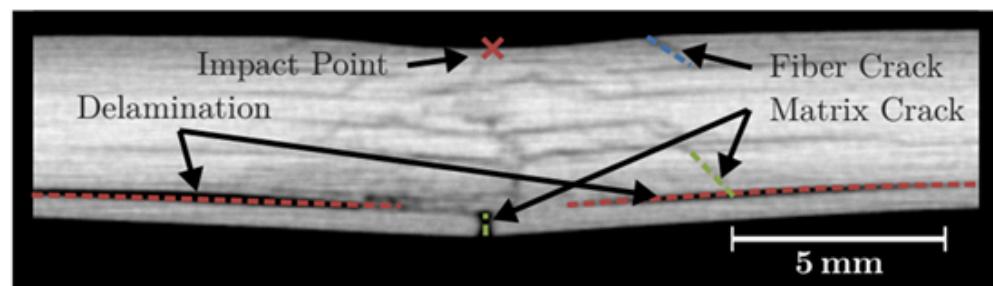
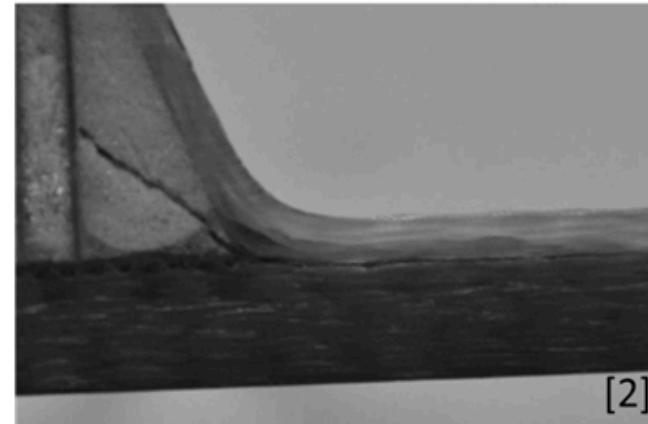
Schäden in Faserverbunden

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

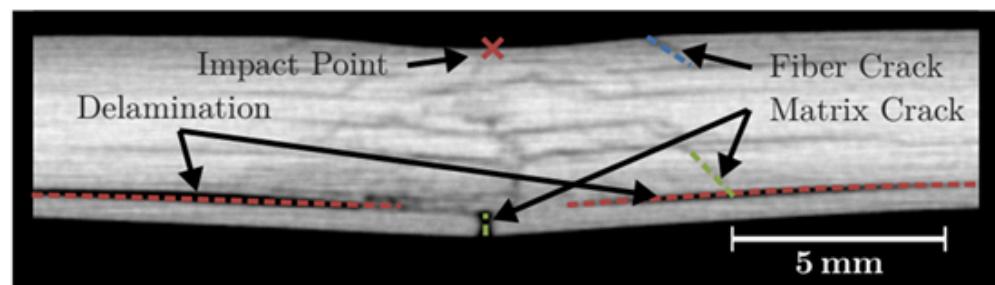
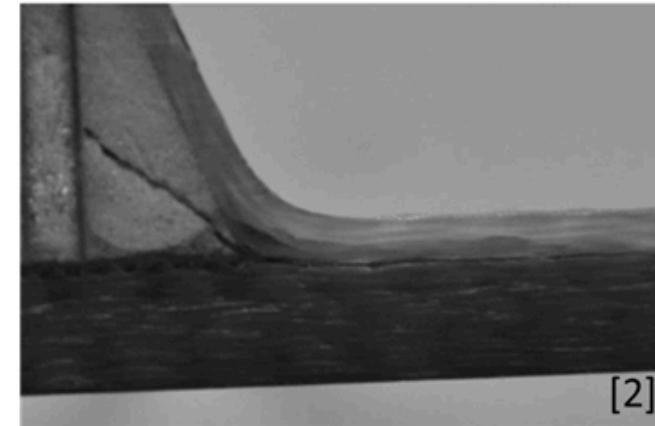
- eine der häufigsten Schädigungen
- hohe interlaminare Spannungen durch
- Querkontraktionseffekte
- Unterschiedliche Wärmedehnungen
- Kanten (Geometrie, Mikrorisse, Poren)
- Trennfolien



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

Delaminationen

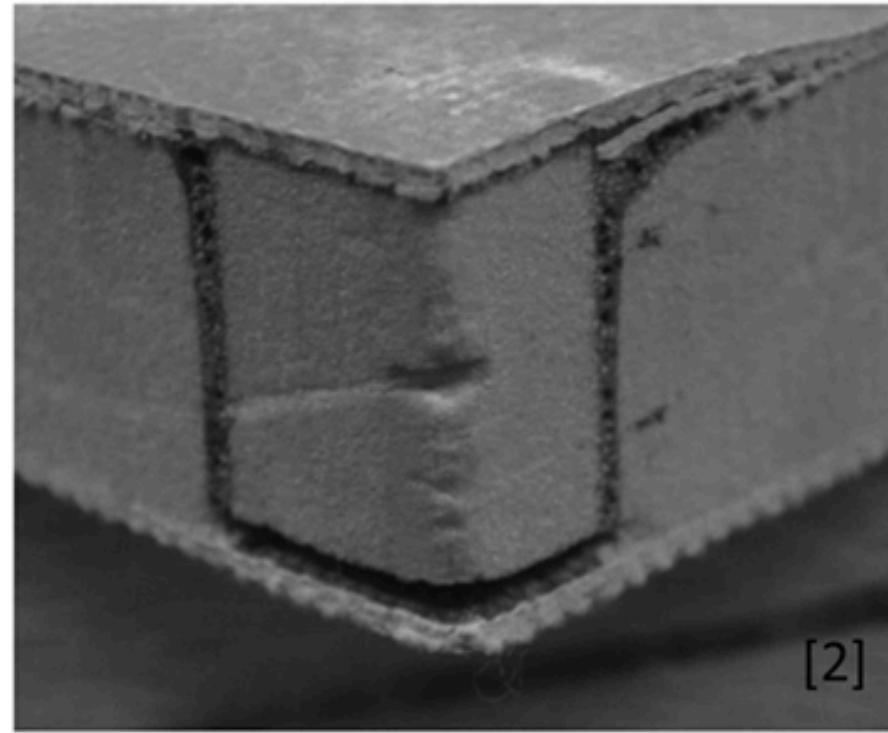
- Verschmutzungen
- Trennung zwischen zwei Lagen – interlaminarer Riss
- Feuchteeintritt
- Lebensdauerreduktion
- Stabilität



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

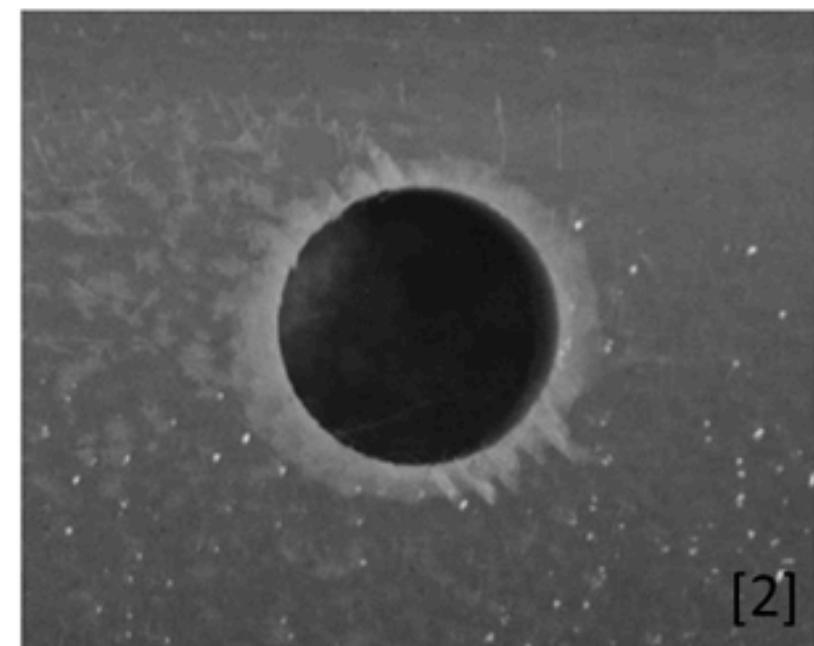
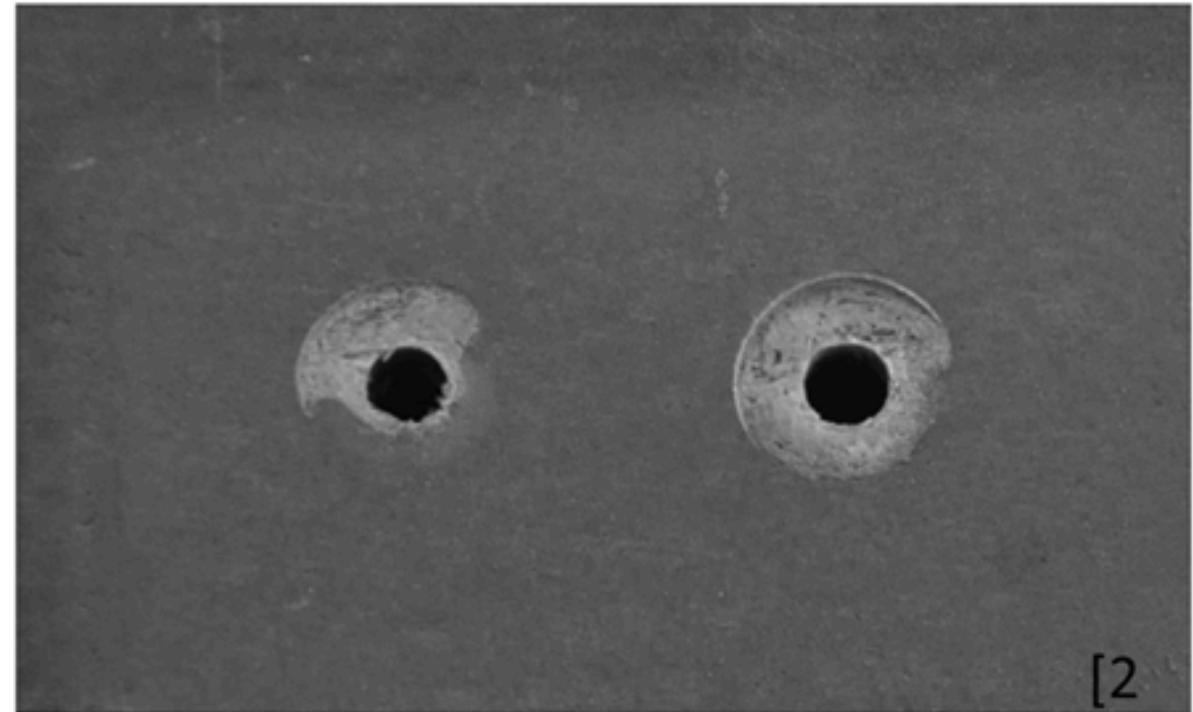
Ablösungen

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



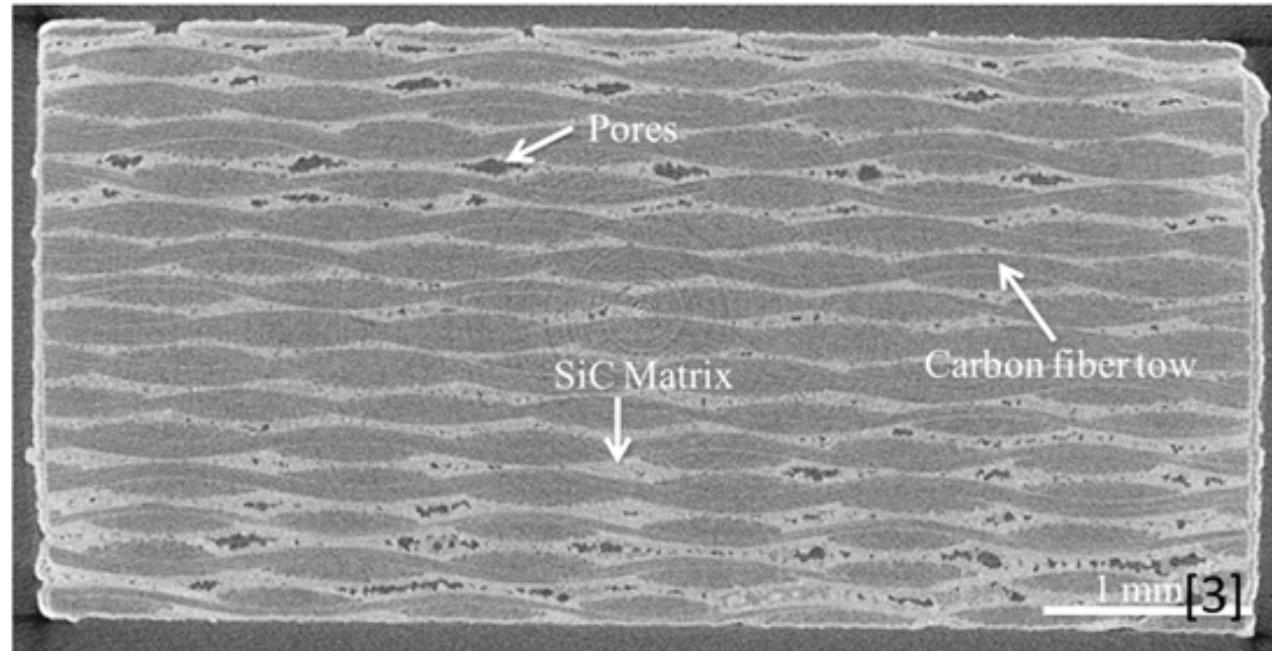
Fehler an Verbindungsbohrungen

- 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



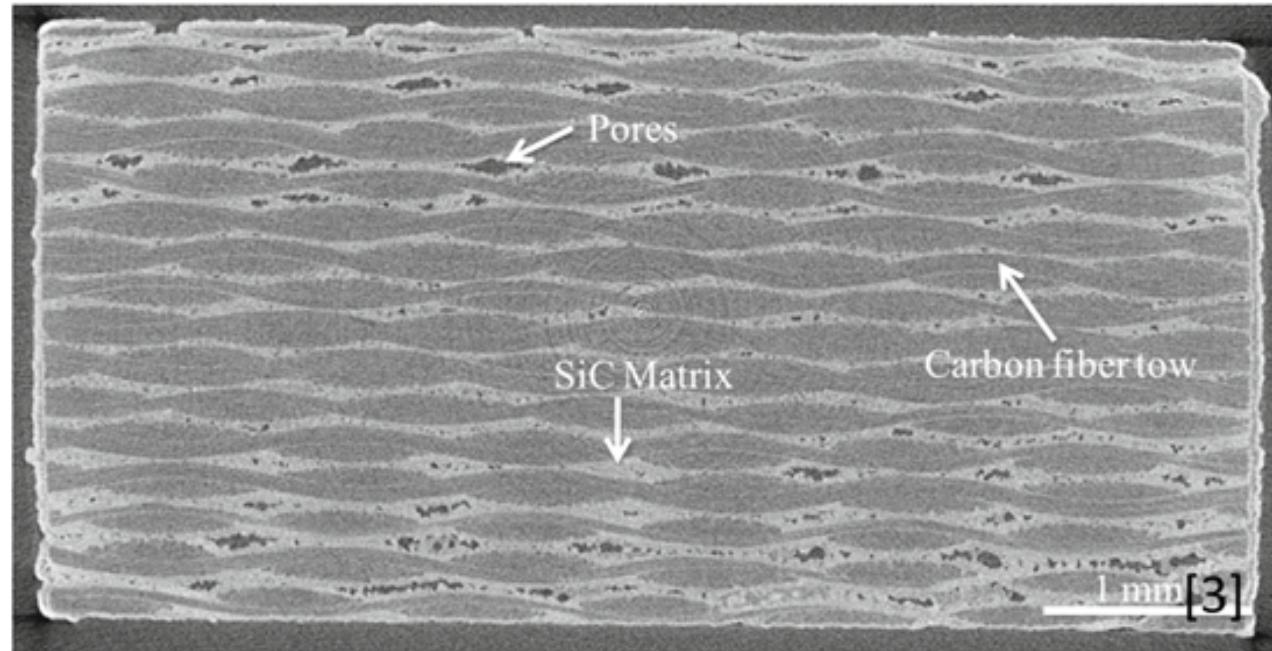
Porosität

- 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