

2024-09-23, Fachdialog Recycling von Windenergieanlagen

---

# **RECYCLING VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN**

Gerhard Kalinka, Volker Trappe, Florian Loose

BAM 5.3 Polymer Matrix Composites

BAM 4.4 Thermochemical Residues Treatment

---

and Resource Recovery

- Herausforderung Recycling Polymerwerkstoffe, CFK
- Herausforderung Trennung Faser-Matrix
  - **Aktivitäten BAM**
- Herausforderung bei der Wiederverwendung der Matrix
  - **Aktivitäten BAM**
- Herausforderung Wiederverwendung der Carbonfasern
  - Einfluss Recyclingverfahren auf Fasereigenschaften
  - **Aktivitäten BAM**
  - Konzepte zum Erhalt von Faserorientierung und -länge
  - **Aktivitäten BAM**

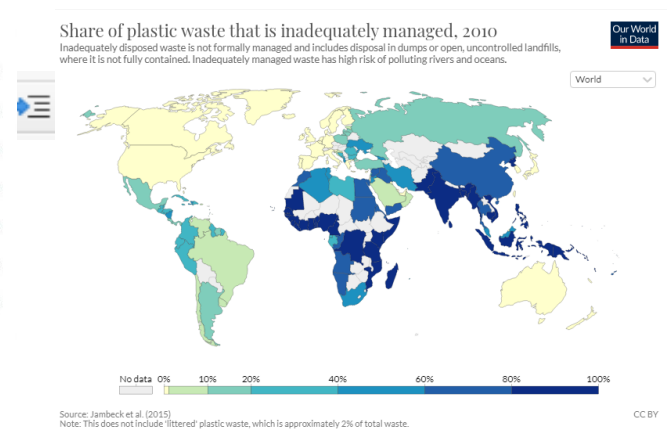
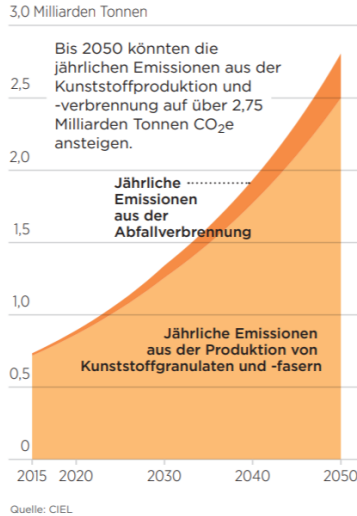
# Herausforderung Recycling Polymerwerkstoffe

Polymer sind Teil des CO<sub>2</sub>-Problems,

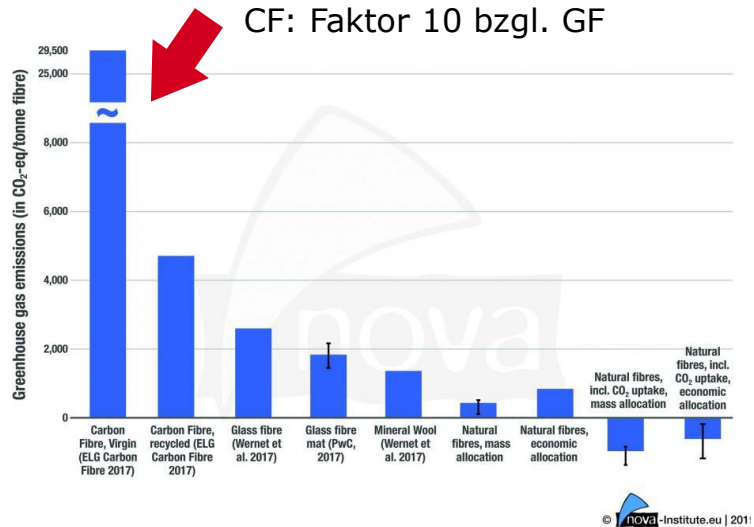
werden nach wie vor ungebremst produziert

und massenhaft unkontrolliert in die Umwelt eingetragen

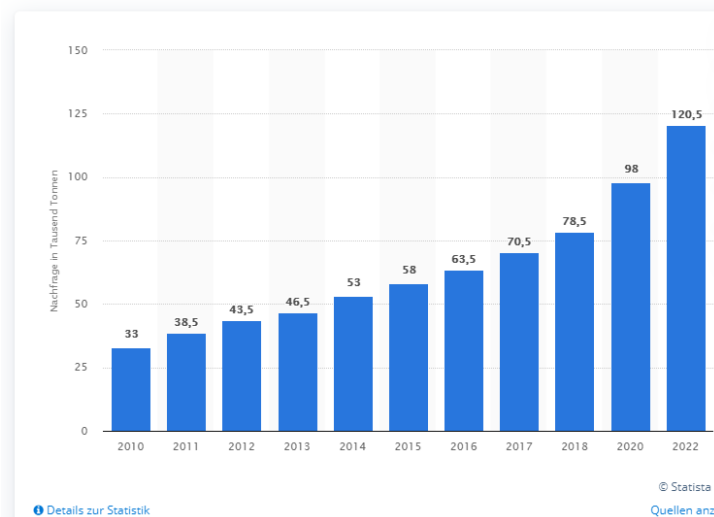
## Jährliche Kunststoffemissionen bis 2050



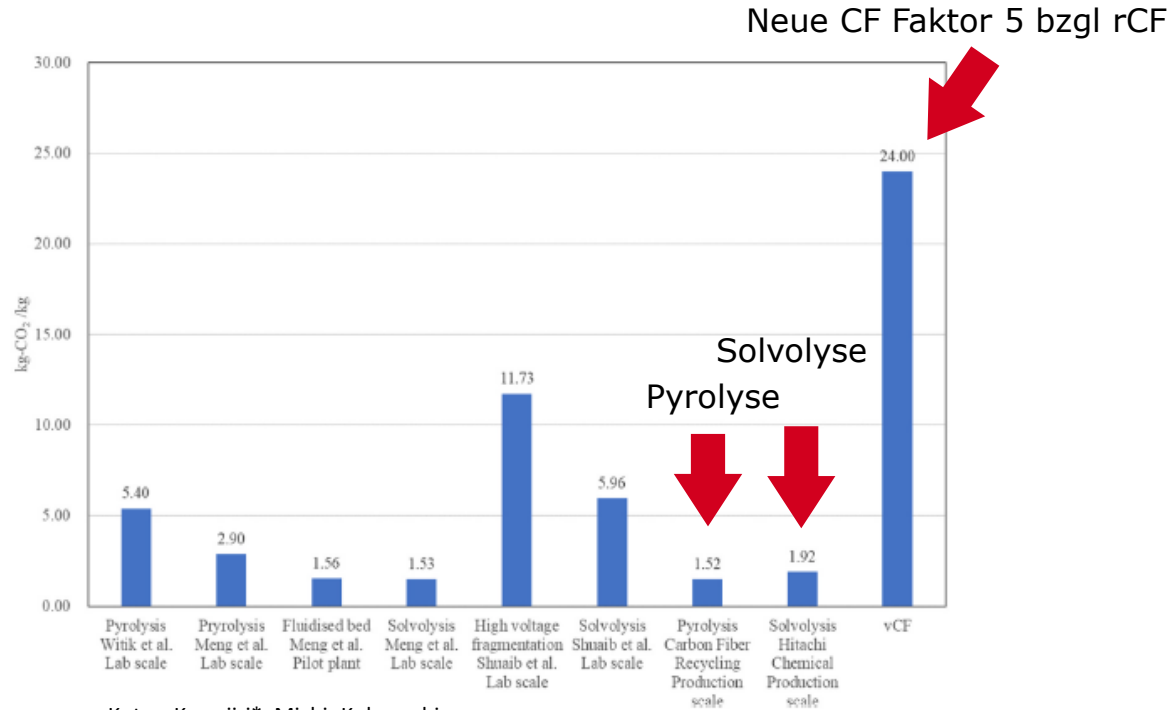
## Carbon footprint of different fibre materials



## Prognose zur Nachfrage von Kohlenstofffasern weltweit (in 1.000 Tonnen)

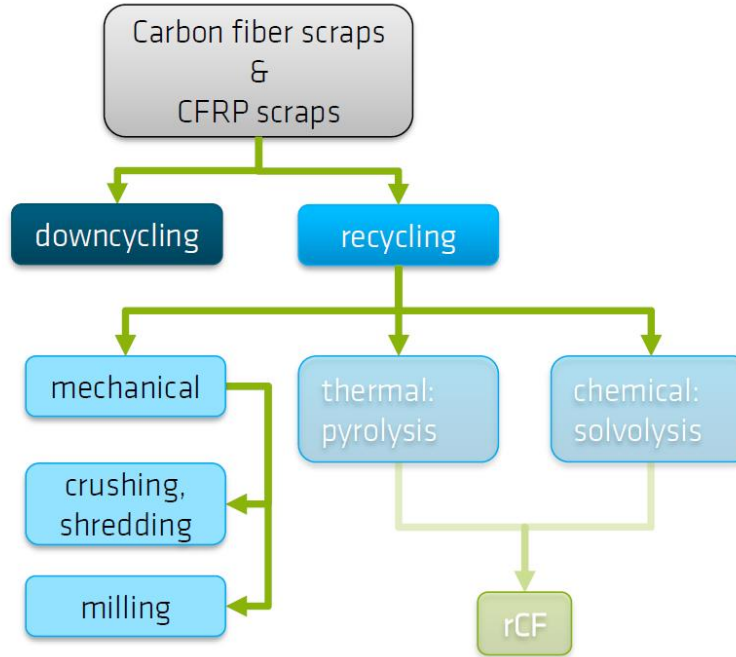


# CO2-Äquivalent neue und recycelte Carbonfasern



KotaroKawajiri\*, MichioKobayashi ;  
Cradle-to-Gate life cycle assessment of recycling processes for carbon fibers  
Journal of Cleaner Production 378 (2022) 134581

# Downcycling vs. Recycling von Carbonfasern



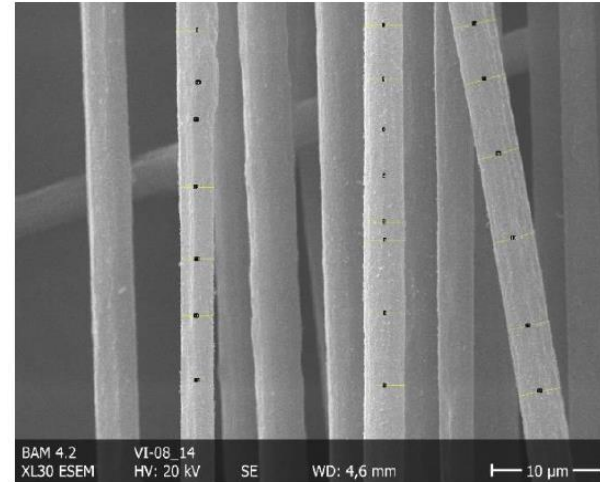
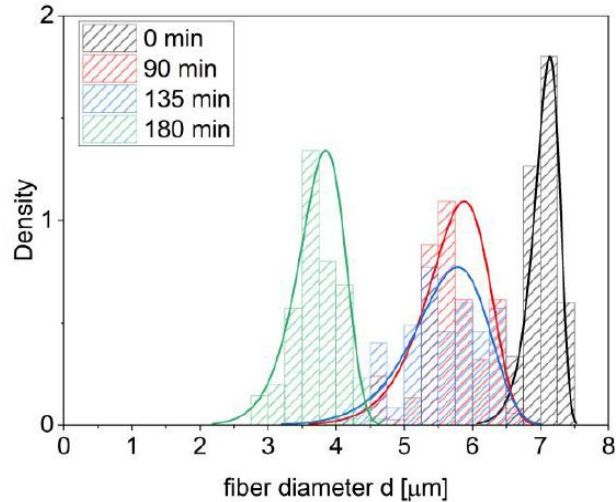
---

Herausforderung:

- Das Trennverfahren soll
  - die Fasereigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit, Kopplung zur Matrix/Interface) möglichst wenig vermindern.
  - Und die Faserlänge möglichst erhalten

## BAM Aktivitäten – Trennung Faser-Matrix

- **Pyrolyse**: Matrix oxidieren, entweder zu gasförmigen Produkten oder zu „Öl“, das ggf. thermisch oder chemisch wiederverwendet werden kann
- **Solvolyse**: Matrix auflösen, ggf. reinigen und wiederverwenden (PMMA, Polyurethane, Vitrimere)

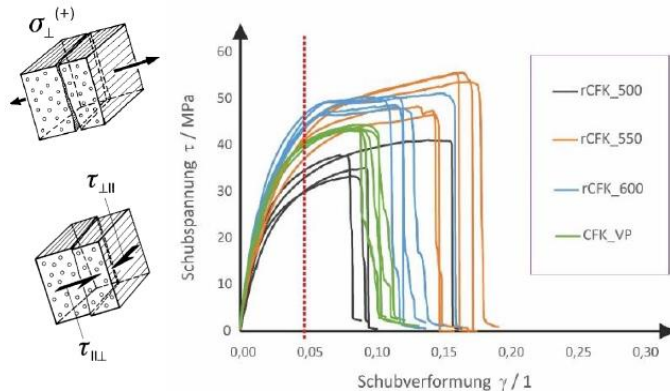
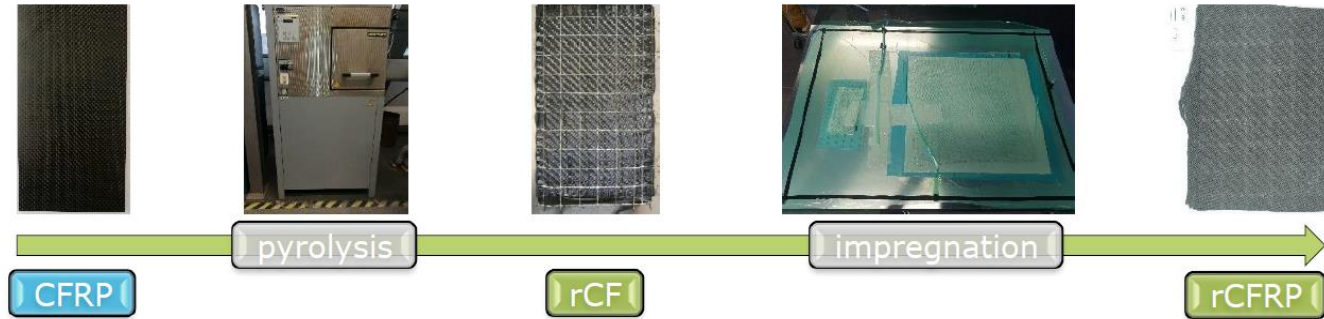


Fiber diameters were measured by SEM imaging:

- 3 different samples for each time and temperature; 4 to 6 fibers for each sample; 10 measurements of the diameter on each fiber.
- rCF diameter depends strongly on the pyrolysis conditions (time, temperature). Tensile strength decreases with the fibre diameter.



# Schubverformung und –festigkeit von rCF in einem recycelten Verbund



Promising results:

- Inter fibre failure strength depends on pyrolysis temperature and tension shear strength (ISO 14129) is enhanced up to 12% compared to virgin CFRP.
- CF not necessarily need a sizing for the bonding to the EP-Matrix, it is required for textile processing.

---

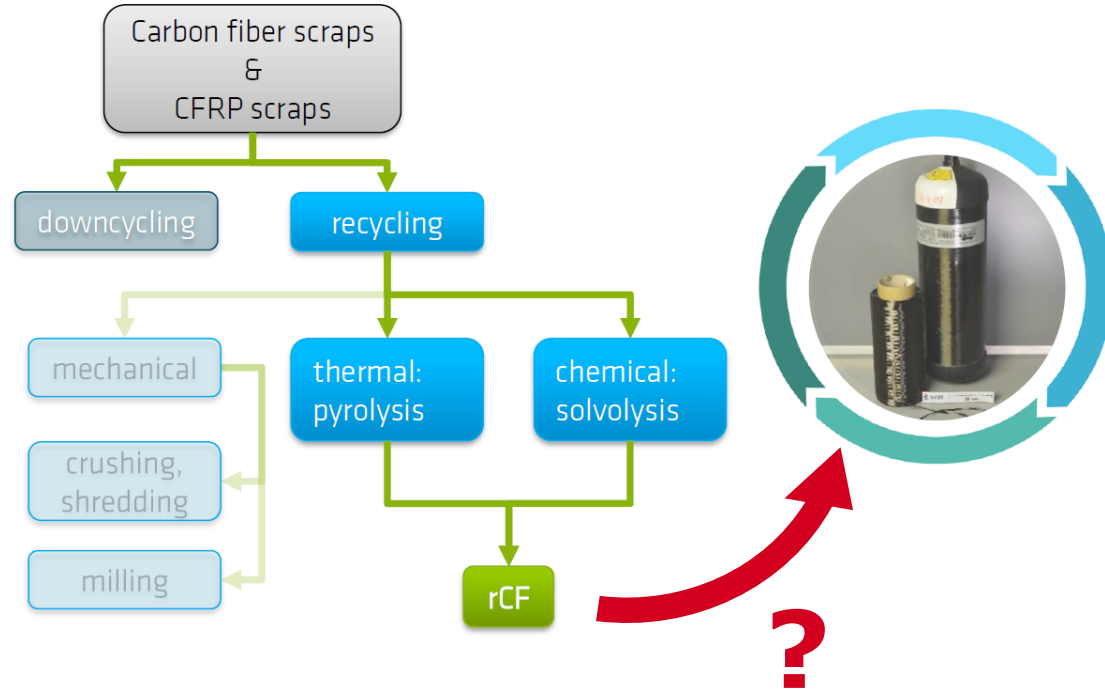
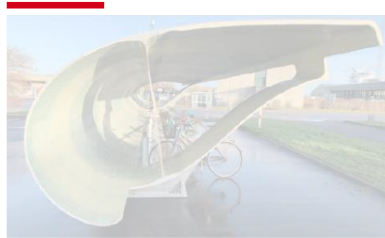
Herausforderung:

- Auch das **Matrixmaterial** soll in ihren Eigenschaften (Festigkeit, Steifigkeit, Kopplung zur Matrix/Interface) erhalten bleiben und/oder wiederverwendet werden können

## BAM Aktivitäten – Wiederverwendbare Matrix

- Solvolyse: Matrix in definierte Einheiten zerlegen, reinigen, wiederverwenden
- Untersuchung der Matrix Elium© (ein PMMA-Derivat), das in Aceton aufgelöst werden kann.
- Vergleiche von Epoxid- und Elium-basierten CFK (Festigkeit, Steifigkeit, Ermüdungsverhalten, Interface)

# Herausforderung Erhalt von Faserlänge und -orientierung



# Herausforderung Erhalt von Faserlänge und -orientierung

---

Herausforderung:

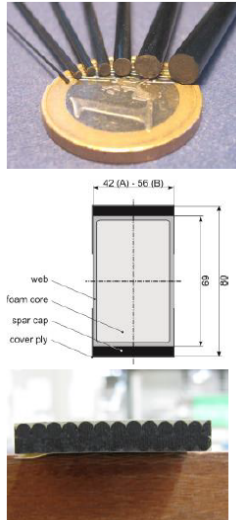
- Nach der Entfernung der Matrix verlieren die Carbonfasern ihre Orientierung.
- Doch nur mit definierter Orientierung in Richtung der Kraftachsen entfalten die Fasern ihr volles Potenzial.

## BAM Aktivitäten - Recycling by Design

- Konzept: Die Fasern werden in Primär-Elementen (Stäbe, Plättchen, Tapes) hochorientiert eingebettet, die beim Recyclen **nicht aufgelöst** werden.
- Die Primär-Elementen werden entsprechend der Lastrichtung ausgerichtet und mit einer **auflösbaren** Matrix verbunden.
- Solche hierarchischen Struktur können die unter Erhalt der Faserorientierung und -länge mehrfach zerlegt und wieder aufgebaut werden.

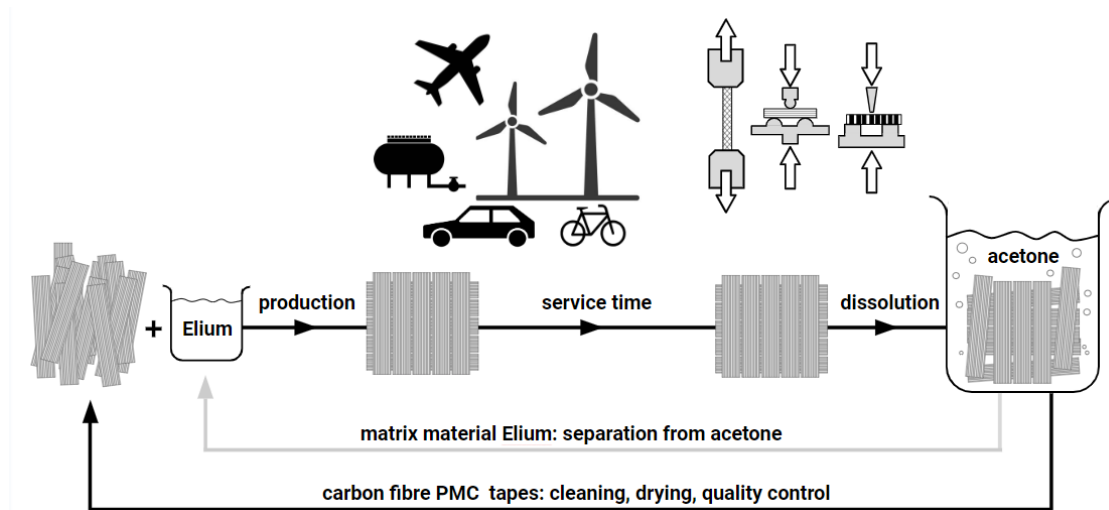
# Hierarchische Verbundwerkstoffe erhalten Faserlänge und -orientierung

Primäre Elemente:  
Stäbe aus UD CFK



Lit. Trappe et al. ICCM20 2015

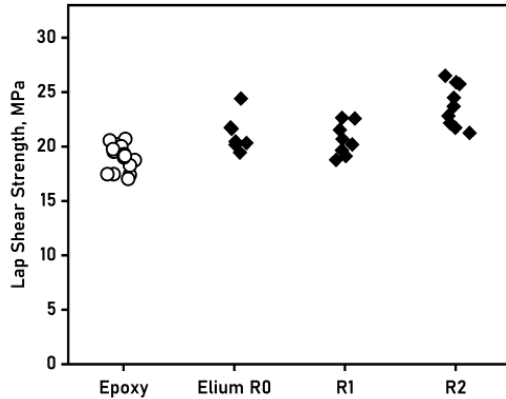
Primäre Elemente:  
Tapes aus UD CFK



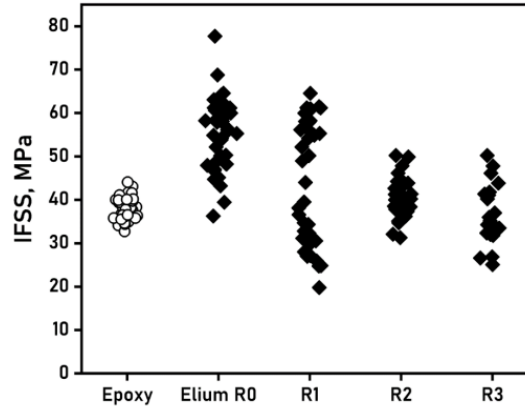
Prockat, Rodricks, Kalinka, Trappe: Mechanical properties of a new recyclable hierarchical carbon fibre reinforced epoxy using Elium® as a secondary matrix that preserves fibre length and orientation, Composites Part C, under review

# Die Eigenschaften hierarchischer CFK bleiben auch nach mehrfachem Recycling hoch

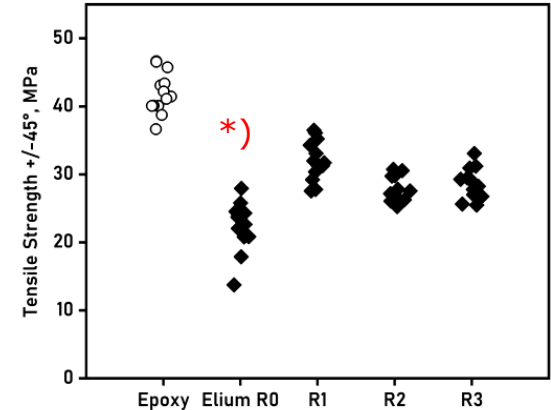
Verbindung primär-  
sekundäre Elemente



Verbindung Faser-Matrix



Zugfestigkeit der  
Gesamtstruktur unter +/- 45°



Leere Symbole: konventionelles CFK mit Epoxid-Matrix, Referenz, kein Recycling  
Volle Symbole: hierarchisches CFK mit Elium als sekundärer Matrix, 1-3x recycelt

\*) Herstellungsfehler, Trennmittel nicht entfernt

- 
- CFK-Recycling ist auf mehreren Ebenen herausfordernd
  - BAM-Aktivitäten
    - Erhalt der **Faser-Eigenschaften** nach Faser-Matrix-Trennung (Pyrolyse, Solvolyse)
    - Erhalt der **Faser-Matrix-Kopplung** nach Faser-Matrix-Trennung
    - Potenzial von **wiederverwendbaren Matrixsystemen** (z.B. Elium©) im Vergleich zu konventionellen Matrixmaterialien
    - **Erhalt der Faserlänge und Orientierung** auch bei mehrfachem Recycling durch hierarchischen Aufbau von CFK-Strukturen
  - Ausblick
    - Vergleich Ermüdung unter Betriebsbedingungen
    - Vergleich Temperaturabhängigkeit

# **VIELEN DANK!**

---

gerhard.kalinka@bam.de

volker.trappe@bam.de

florian.loose@bam.de

BAM 5.3 und 4.4

---

[www.bam.de](http://www.bam.de)