



Recycling Carbonfaser-verstärkter Betonteile

Konsequenzen für die Deponiefähigkeit von Produkten des Bauschuttrecyclings

Dr. H.-G. Jäckel; MSc. D. Hamann, MSc. A. Nazaret; TU Bergakademie Freiberg, IAM-RM

Dr. Th. Krampitz; Prof. H. Lieberwirth, TU Bergakademie Freiberg, IAM



Übersicht:

- **Gefährdungspotentiale** durch CFK (Umweltrelevanz)
- **Tendenzen** der CFK-Anwendung im Bauwesen (CFK-Quellen, Aufkommen an Bauabfällen – unbelastet/CF-belastet)
- **V Versuchsergebnisse** Carbonbeton-Aufbereitung am IAM
 - + Vergleich Backenbrecher/Hammermühle (konventionelle Technik)
 - + Vergleich alternative CFK-Bewehrungsmaterialien
- **CF-/CFK-Bilanz** in Produkten des klassischen Bauschutt-Recyclings
 - Beispielrechnung *MA Nazaret*: **CFK-verstärkte Betonteile des Bauwesens**
- **Zusammenfassung/Schlussfolgerungen**
(hinsichtlich Deponierbarkeit der Brechsande $< 1 \text{ mm}$)

1. Gefährdungspotentiale durch CFK (Umweltrelevanz)

a) Allgemein

- Fertigung (CF-Staubentwicklung bei mechanischer Bearbeitung)
kritisch: Kurzschlüsse bei EMSR-Technik; Exposition der Mitarbeiter; Abfallentsorgung
- Nutzung (CF-Staubentwicklung bei mechanischer Beanspruchung)
kritisch: Bearbeitung CF-haltiger Bauteile, Crash-Fall, Brände
- Recycling/Aufbereitung (CF-Staubentwicklung über die gesamte Prozesskette)
kritisch: Logistik (CF-staubfreier Transport !), Hauptaggregate/FÖT (gekapselt !); Betrieb (EMSR-Schutz); Produktlagerung (nicht offen !); Produkte (garantiert CF-frei !!);

b) Reaktionen potentieller Verwerter

- Weigerung/Preissteigerung **CF-haltiger Bauabfälle** durch **RC-Unternehmen** (CF-Beton; CF-Verunreinigungen)
- Weigerung **CF-haltiger EBS** bei **Verbrennern** (Problematik EMSR-Technik; E-Filter; Deponie CF-haltiger Aschen + Schlacken)
- Weigerung der **Deponie CF-haltiger Feingüter** (z.B. mineral. FG < 2mm aus SLF)
- Letztendlich: **Weigerung CF-Recyclateinsatz** (Absatzprobleme)

1. Gefährdungspotentiale durch CFK (Umweltrelevanz)

c) medizinische Beurteilung der CF

[Quellen: [3] Brandschutz 6/14; [4] Bayrisches Landesamt für Umwelt 2008.]

Kritische C-Fasern:

- lungengängige Fasern
(Def.: Länge < 250 µm, Durchmesser < 3 µm)

besonders kritisch: CF-Bruchstücke

- Abmessungen:
 - $L_{CF} > 5 \mu\text{m}$
 - $D_{CF} < 3 \mu\text{m}$
 - $L/D\text{-Verhältnis} > 3$
- Entstehung (nach [5] 2012): bei Bränden durch CF-Oxidation (bei $T > 600 \text{ °C}$ → D_{CF} -Reduzierung > 25 %)
- WHO-Klassifikation: PM10 (particulate matter < 10 µm)
(Masseanteil von Partikeln mit aerodynamischem Durchmesser < 10 µm
→ schwierige Messbarkeit !!)
- Zusätzlich Rußanlagerungen an CF (Atemtrakt-reizungen) und andere Brandprodukte (CO, CO₂)

Allgemeine gesundheitliche Probleme:

- Hautreizungen (Augen, Schleimhäute)
- C-Fasern wirken entzündungsfördernd
- Krebserregende Wirkung nicht auszuschließen

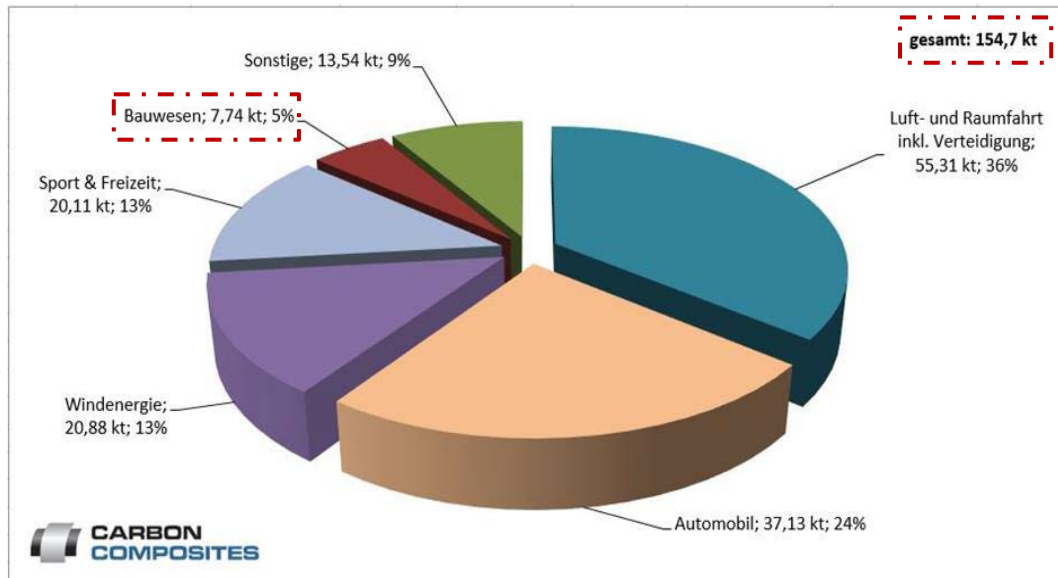
Aber: (Quelle: [6] Handbuch Faserverbundkunststoffe 2014)

- CF im Ausgangszustand ($D \approx 5 \dots 27 \mu\text{m}$) aktuell als **nicht krebserregend** eingestuft
- Fasern mit kritischen Abmessungen entstehen nur bei Szenarien mit Einfluss auf D_{CF}
- Bei mechanisch beanspruchten CFK-Bauteilen keine Stäube mit Bruchstücken $D_{CF} < 3 \mu\text{m}$ nachweisbar !
(Untersuchungen Krampitz u.a. IAM TU BA Freiberg)
- Erhöhung des Lungenkrebsrisikos durch bei rein mechanischer Bearbeitung entstehende C-Fasern aktuell **nicht** nachweisbar (Quelle: [7] 2004)
- **LAGA-Richtlinie „Faserhaltige Abfälle“** (angekündigt bis Ende 2018 - aktuell noch nicht veröffentlicht !?)

- Fazit:**
- Gefährdungspotential gegenwärtig unklar (FuE-Projekte u.a. am KIT Karlsruhe) !?
 - aber: **Personen- / Brandschutz unumgänglich !!**

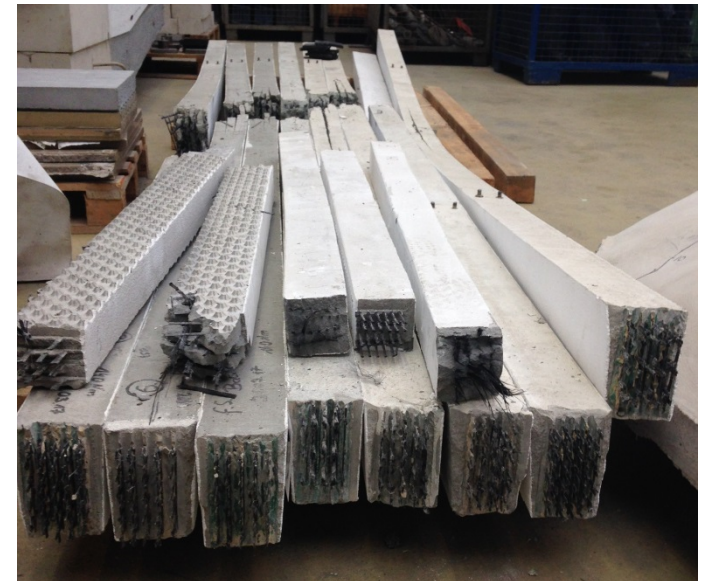
2. Tendenzen der CFK-Anwendung

a) CFK-Quellen: + Luftfahrt + Fahrzeugbau
+ Windenergie + Sportgeräte
+ Bauwesen



CFK-Einsatz 11/2018 - Mengen

([1]: Sauer/Kühnel: Carbon-Composite-Marktbericht 2018, Teil 2; aus <http://avk-tv.de> + eigene Abschätzungen)



Ges.bedarf 2018	CF		CFK		Bau-CFK Input	Bau-CFK Abfall (5%)
	t/a	%	t/a	%	t/a	t/a
Welt	78.500	100	154.700 128.000	82,7 (polymer) 100,0	7.740 6.400	320
EU	20.800	27	52.500	41,0	320	16
D	5.800	7	10.500	8,2	64	3,2

b) CFK-Aufkommen aus Bauabfällen

([1] Composite-Marktbericht 2018)

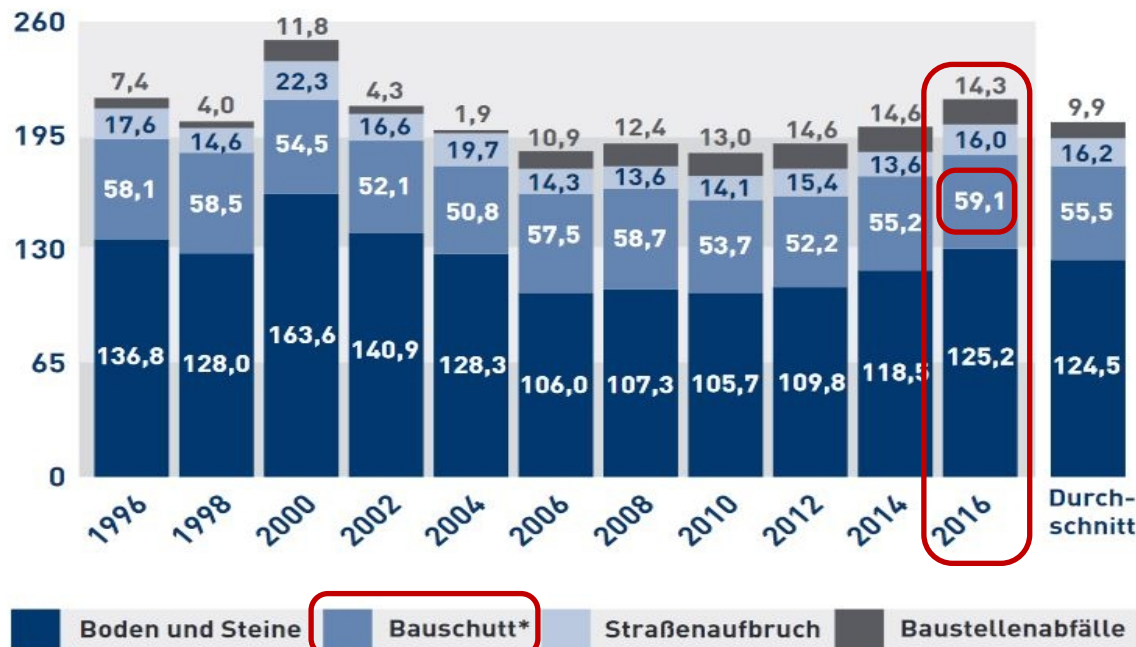
2. Tendenzen der CFK-Anwendung

→ **CFK-bewehrte Betonbauteile** (Substitution Stahl durch CFK)

c) Aufkommen an Bauabfällen:

→ **D 2016 in Σ = 215 Mio t, davon 59 Mio t Beton**

Statistisch erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle (in Mio. t)



Anmerkung: * inklusive Bauabfälle auf Gipsbasis

Bauabfallaufkommen (D 2016)

([2] Monitoring-Bericht D 2016)

b) CFK-Aufkommen aus Bauabfällen (2018):

([1] Composite-Marktbericht 2018)

D 2016: ca. 3,2 t/a

→ bei $c_{CF} = 1\%$: in ca. 320 t/a Bauschutt

Zukünftig:

→ Aufkommen an Altbauteilen ↑↑↑

→ Vielfalt der Bewehrungen ↑↑↑
(Gelege, Stäbe, Bänder, Kurzfasern)

Problem:

→ 320 t CFK-haltige Bauabfälle kontaminieren ca. 59 Mio t/a Bauschutt

→ **Identifizierung und Abtrennung erforderlich !**

Frage: Was passiert mit CFK-Bewehrungen bei konventioneller Aufbereitung ??

3. IAM-Aufbereitungsuntersuchungen (Vergleich verschiedener Zerkleinerungstechniken)

a) Aufgabematerial → künstliche Betonformate:

- ohne Bewehrung (BoB)
- mit 1-facher Bewehrung (BKF)
- mit 2-facher Bewehrung (B2M)

→ **Matrix:** Feinbeton (Pagel Tudalit)

→ **Gelege:** TEN CF800 / SGL C30 T050 EPY

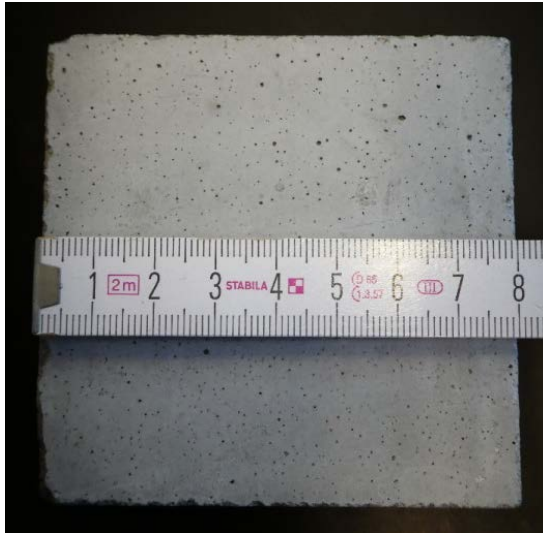
→ **CFK-Gehalte** $c_{CFK} = 0,8 - 1,6 \%$

Probekörperprogramm

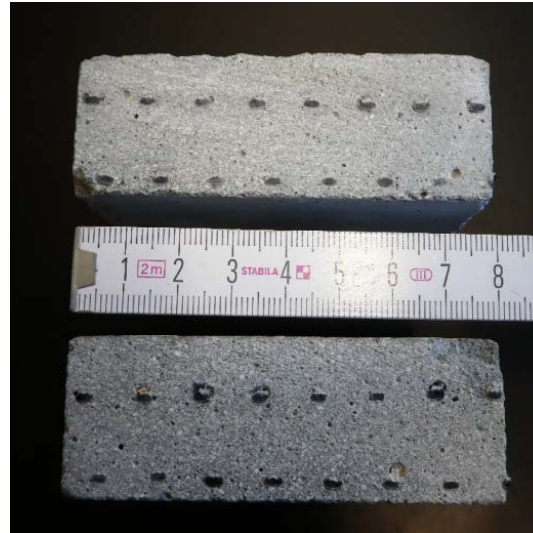
BoB
BKF
B2M



([3] MA Nazaret 2018; TU BAF/IMB-RM)



Betonformat
(80 x 80 x 28) mm³
ca. 60 kg/m²



Beton-Querschnitt
(80 x 80 x 28) mm³
2 Lagen Verstärkung (B2M)



Carbon-Bewehrung
ca. 428 g/m²

3. IAM-Aufbereitungsuntersuchungen (Vergleich verschiedener Zerkleinerungstechniken)

b) Zerkleinerungstechnik - konventionell



Beanspruchungsart:

→ **Druckbeanspruchung**

Parameter:

→ Spaltweite s_{Bbr} [mm]

Einsatz: für Verbunde (spröd- und zähbrechende Komponenten)

(im **Pilot-** bzw. **großtechnischen Maßstab**)

Aufschluss:

→ selektiv (an Phasenübergängen)



1. Kleintechnischer Backenbrecher

Bbr 300 x 400 (Krupp-Gruson, Brechmaul-Weite $w=300$ mm, Breite $b=400$ mm, Spaltweite s ca. 40 mm)

2. Laborbackenbrecher Bbr 110 x 150

(Bauart SKET Magdeburg, $w = 110$ mm, $b = 150$ mm, $s = 25$ mm)

Laborhammermühle HM340

(Fa. Jehmlich/Nossen)



Beanspruchungsart:

→ **Schlag-/ Prallbeanspruchung**

Parameter:

→ Beanspruchungsdauer t_B [s]

→ Energie w_B [kWh/t]

3. IAM-Aufbereitungsuntersuchungen (Vergleich verschiedener Zerkleinerungstechniken)

c) Zerkleinerungsergebnisse – Backenbrecher ([3] MA Nazaret 2018; TU BAF/IMB-RM)

Zerkleinerungsprodukt **Bbr 110x150 mm**

Probekörper: 80x80x28 B2M / $s_{Bbr} = 25 \text{ mm}$

Masseanteile:

$R_{m, \text{Beton, frei}} = 61,7 \% \text{ (freie Matrix)}$

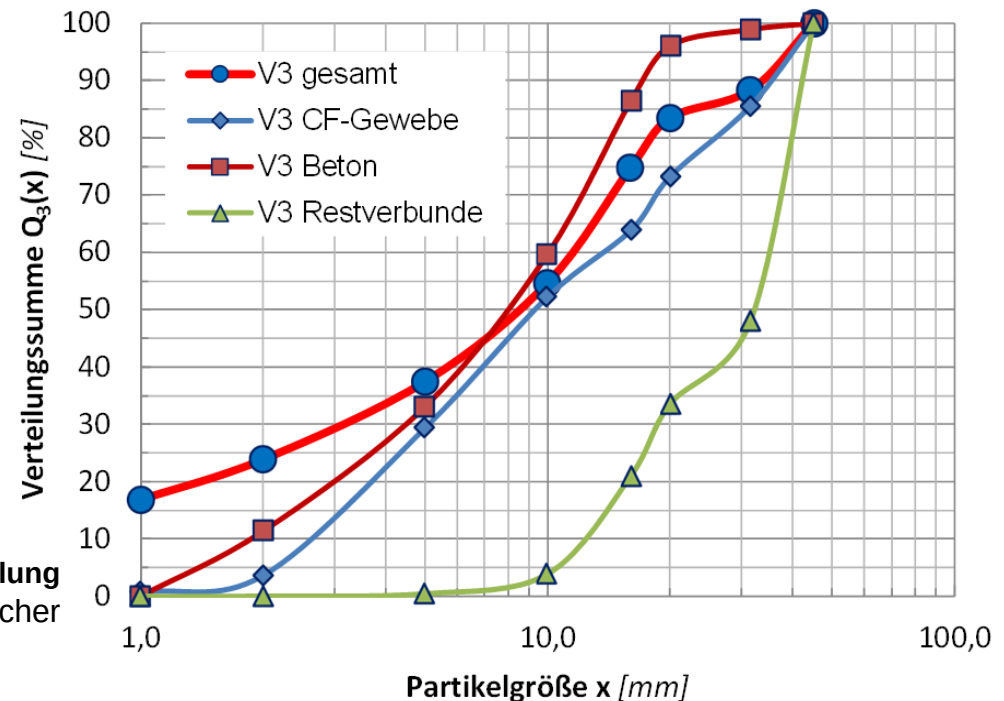
$R_{m, \text{CF, frei}} = 0,4 \% \text{ (freies Gelege)}$

$R_{m, \text{RV}} = 21,1 \% \text{ (Restverbunde)}$

$R_{m, <1\text{mm}} = 16,8 \% \text{ (Feinanteil <1 mm)}$



CFK-Beton-
Restverbund aus Bbr



Fazit: 4 Aufbereitungsprodukte (+ Staubprodukt)

- verstärkte Bbr-Verstopfungsneigung
- schlechter Verbundaufschluss (viele Restverbunde)
- Komponenten durch Siebung nicht sauber trennbar
- **alle Mineralprodukte mit CF-Inhalten** (Kontaminationen)

3. IAM-Aufbereitungsuntersuchungen (Vergleich verschiedener Zerkleinerungstechniken)

c) Zerkleinerungsergebnisse – Hammermühle ([3] MA Nazaret 2018; TU BAF/IMB-RM)

Betonfraktion Feingut < 1mm aus **HM 340**

Parameterabhängigkeiten:

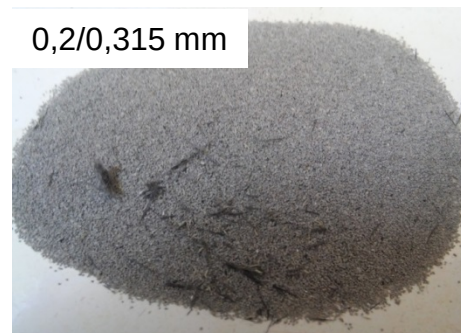
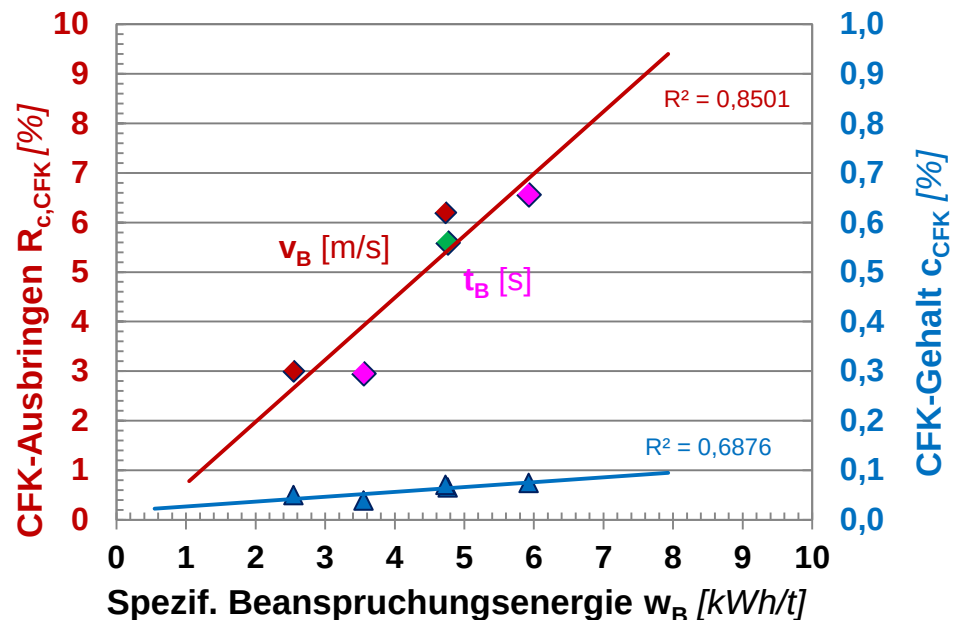
$$R_{c,CFK}; c_{CFK} = f(t_B; v_B; w_B)$$

Fazit:

- mit Beanspruchungsenergie $w_B \uparrow$ (t_B, v_B):
- $R_{m,RV} \downarrow + R_{m,<1\text{ mm}} \uparrow$ (Verbundaufschluss $\uparrow$)
- c_{CFK} im FG < 1 mm $\uparrow$
- $R_{c,CFK}$ im FG < 1 mm $\uparrow \uparrow \uparrow$

→ **alle Mineralfraktionen mit CF-Inhalten**
(CF-Kontaminationen)

→ **Brechsande so nicht marktfähig** (als
Deponiebaustoff ungeeignet ?)



CF-Verunreinigungen
ausgewählter Sieb-
fraktionen des Fein-
gutes < 1 mm

3. IAM-Aufbereitungsuntersuchungen (Vergleich verschiedener Zerkleinerungstechniken)

c) Zerkleinerungsergebnisse – Hammermühle HM 340 ([4] PA Knott/Tödter/Krampitz 2019; TU BAF, IAM)

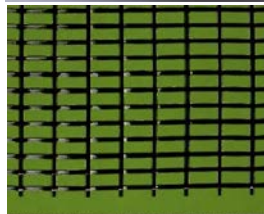
Alternative Bewehrungsmaterialien



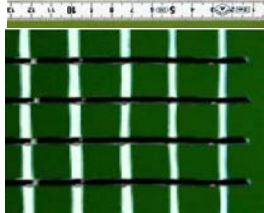
Gelege mit CFK-EP-Ummantelung
(C3-Typ 202; 650 g/m²;
63 M% C-Faser)



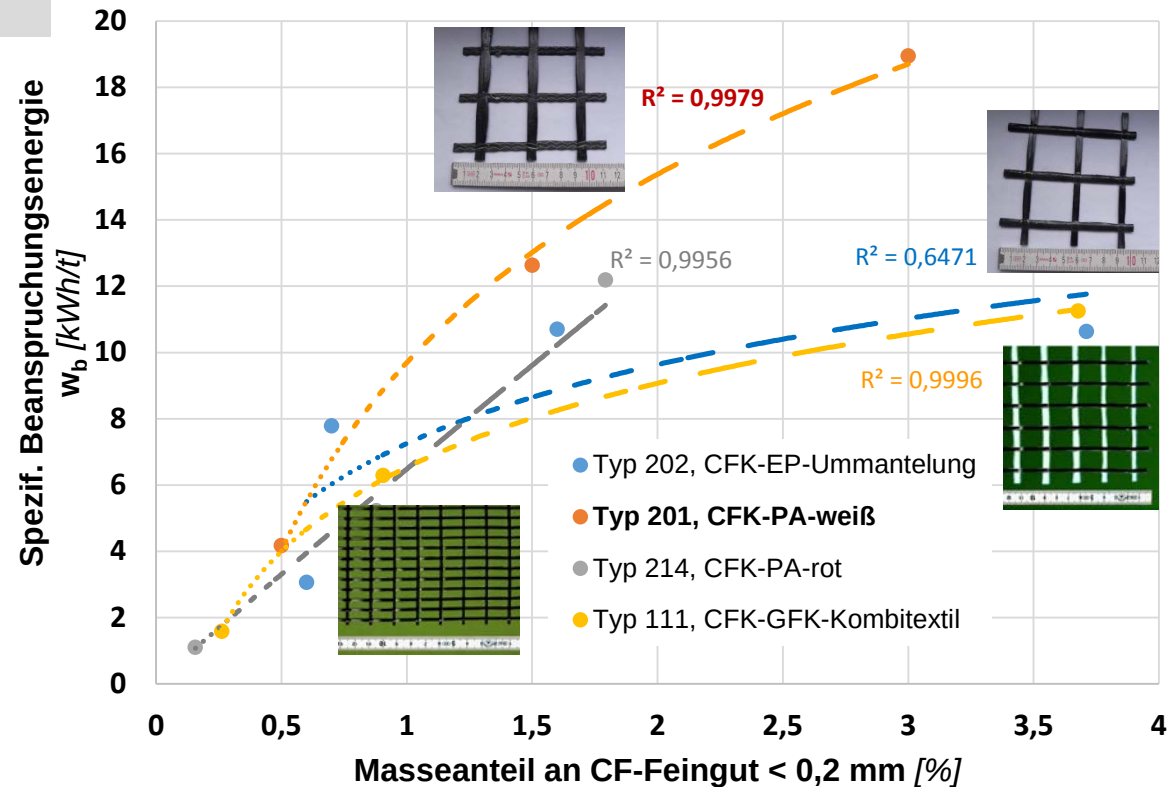
**Gelege mit CFK-EP
+ PA-Faden weiß**
(C3-Typ 201; 910 g/m²;
55 M% C-Faser)



**Gelege CFK-EP
+ PA-Faden rot**
(Mörtelshop, Typ 214;
350 g/m²)



**Gelege mit CFK-
GFK-Kombitextil**
(Mörtelshop; Typ 111;
210 g/m²)

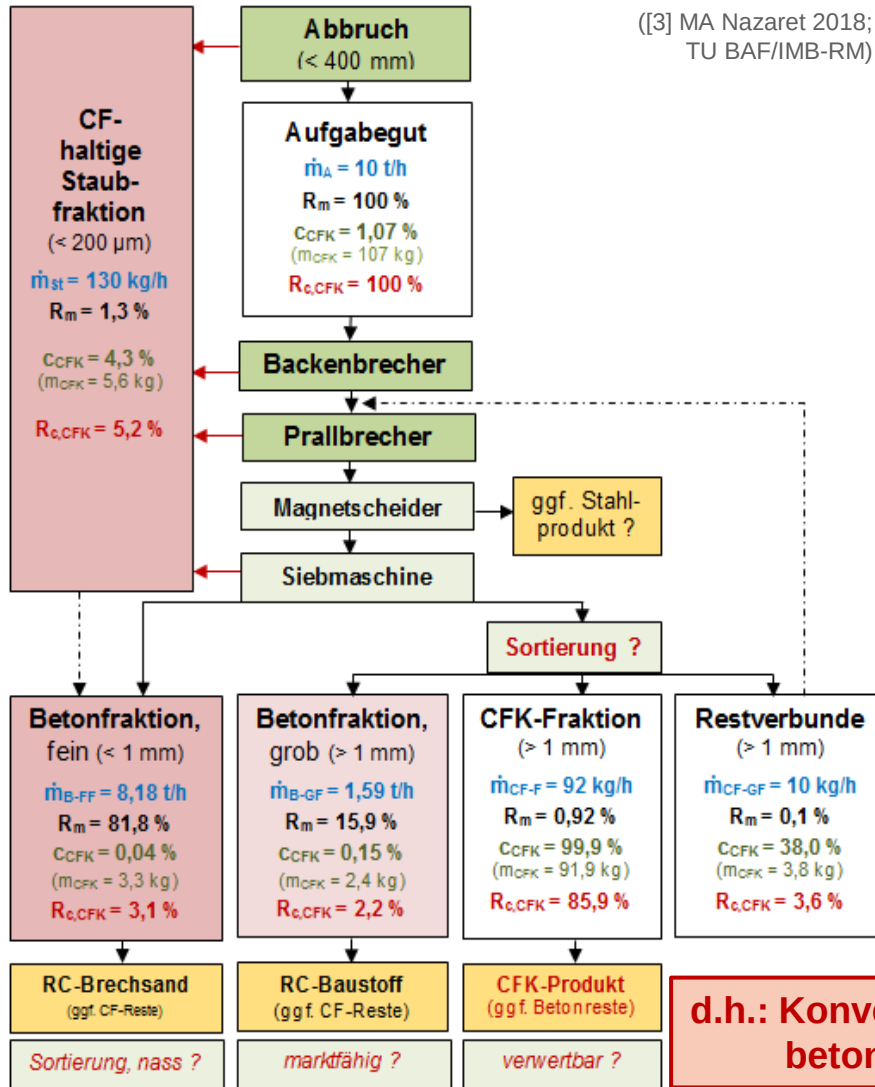


Fazit: mit Beanspruchungsenergie $w_B \uparrow$ (t_B , v_B):

- Masseanteil an CF-Feingut < 0,2 mm zunehmend
- Zunahme abhängig vom Bewehrungstyp (EP-Gehalt)

4. CFK-Verteilung in Produkten des Bauschutt-Recyclings

→ **Bilanzbasis:** Modellfall Betonbauteile mit CFK-Bewehrung (B2M)



Annahmen (Modellrechnung):

→ **CFK-Input** (bei CFK-Mattenanteil: ca. 1,07 %): **107 kg**

CFK-Verteilung in den Produkten:

	Ausbringen $R_{C,CFK}$
+ Staubfraktion (< 200 µm)	ca. 5 %
+ Betonfraktion (0,2-1 mm)	ca. 3 %
+ Betonfraktion (> 1 mm)	ca. 2 %
+ Restverbunde (> 1 mm)	ca. 4 %
+ CFK-Produkt (> 1 mm)	ca. 86 %

Probleme (zukünftig):

Aufbereitung: ca. 8% des CFK-Inputs im Feingut < 1 mm

+ deutlich aufwändiger (CF-Abtrennung aus Mischungen ungeklärt – u.U. Nass-Sortierung ??)

Produktabsatz/Vermarktung: **kostenpflichtig !**

- + Staubprodukt, CF-haltig: **Untertagedeponie ?**
- + Brechsand, CF-haltig: **Untertagedeponie ?**
- + RC-Split, schwach CF-haltig: **Deponiebaustoff ?**
- + CFK/CF-Fein-/Feinstfraktion: **ungeklärt** (ggf. Pyrolyse)
- + CFK-Bewehrung (grob/mittel): **ungeklärt** (ggf. Pyrolyse)

d.h.: Konvent. Bauschuttrecycling mit Carbonbeton nicht mehr wirtschaftlich betreibbar

5. Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

1. Tendenzen der CFK-Anwendung

- **Aufkommen** CFK-haltiger Bauteile bisher insgesamt gering, aber Tendenz zunehmend
- **Einschleusung großer CF-Recyclatmengen in Bauprodukte problematisch** („Deponie im Bestand“)

2. CF-/CFK-Verteilung in Produkten der konventionellen Aufbereitung

- **Hohes Kontaminierungspotential** bei Verarbeitung CF-haltiger Bauelemente im konventionellen Bauschuttrecycling (CF-Staubemissionen; alle Produkte CF-haltig)
- **Identifizierung von CFK/CF** im Input von Recyclinganlagen aktuell **ungeklärt** (Forschungsbedarf)
- **CFK**-Detektion/Ausschleusung sensorgestützt **möglich** (große Mengen, daher aufwändig + teuer !)
- **CF**-Detektion/Ausschleusung aus Feingütern, z.B. Brechsanden **ungeklärt**
- **Wirtschaftliches Bauschuttrecycling** zukünftig noch stärker eingeschränkt !
(je nach CF-Grenzwert: Deponiegebühren $\uparrow\uparrow\uparrow$; Wirtschaftlichkeit $\downarrow\downarrow\downarrow$)

3. Einsatz-Voraussetzungen für Brechsande als Deponiebaustoffe

- **Entstaubungsprodukte $< 200 \mu\text{m}$ mit $c_{\text{CFK}} > 4 \%$ für Deponiezwecke ungeeignet** ($\rightarrow$ UT-Dep.) !
- **Brechsande $0,2/1 \text{ mm}$ mit $c_{\text{CFK}} < 0,1 \%$ ggf. als Deponiebaustoff geeignet** (sonst UT-Dep.) !?
- **Beton-Splittfraktion $> 1 \text{ mm}$ mit $c_{\text{CFK}} > 0,1 \%$ nicht deponierbar** ($\rightarrow$ weitere Aufber. erforderlich) !

4. Lösung des Identifizierungsproblems: Markierung von CFK-Verstärkungen

(z.B. Tracer-Based-Sorting $\rightarrow$ TBS s.a. Fa. Polysecure/Freiburg)

5. **Horrorvision:** Zulassung kurzfaserverstärkte Betonbauteile (Kontaminationspotential $\uparrow\uparrow$)

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !

Literatur:

- [1] Witten u.a.: Composite-Marktbericht 2018, Carbon Composites und verstärkte Kunststoffe AVK aus <http://avk-tv.de>
- [2] Monitoring-Bericht D 2016 - Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016; Kreislaufwirtschaft Bau; Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. Mineralische Bauabfälle)
- [3] Nazaret, A.: Untersuchungen zur Aufbereitung kohlefaserverstärkter Betonelemente; Masterarbeit TU Bergakademie Freiberg; IMB-RM 2018
- [4] Knott, P.; Tödter, H.; Krampitz, Th.: Zerkleinerung von CFK-Verstärkungen aus Carbonbeton; Projektarbeit TU Bergakademie Freiberg; IAM 2019