

Gedanken eines faseranwendungserfahrenen Ingenieurs zum Umgang mit Faser-Mikrobruchstücken und Feinstäuben bei Herstellung und Recycling faserverstärkter Bauteile.

Composites United (CU) deckt die faserverstärkten Composites FRP, FRC, CMC ab!

Autor: Ralf Cuntze, Prof. Dr.-Ing. habil, VDI, Composites United construction (CU Bau)
Affiliation: Retired from MAN-Technologie, Augsburg, Germany and Composites United CU

Diese 'non-funded' Unterlage wurde nicht geschrieben, weil den Autor die öffentliche Darstellung und Kritik bei vorhandenen Ereignissen stört, sondern die häufig nicht sehr fundierte und damit wenig problemlösungshilfreiche Berichterstattung. Unsinnige Furcht vor einer Gefährdung wird damit leider automatisch geschürt.

Die vorliegende Ausarbeitung gibt den generellen Blick eines Statikers, der seit 1970 Bauteile mit Carbon- und anderen Fasern ausgelegt hat, auf die Anwendung von Bewehrungsfasern mit dem Schwerpunkt Carbon-Fasern (CF) wieder. Dabei ist er konfrontiert mit in Einzelfällen möglicher gesundheitsgefährdender (toxischer) Wirkung. Diese kann erfolgen durch das Einatmen zu großer Staubmengen, sowie durch Faser-Mikrobruchstücke der Größen HAR-FOs und WHO-‘Fasern‘ (FO = FiberObjects, Definitionen *siehe Glossar* hinten). Insgesamt zu beachten sind also:

- * Staub: ‘Übergroße‘ Staubmengen, die in die Lunge und auch die kleinen Lungenbläschen (kleinste Partikel) eindringen können (auch inhaliertes Partikelstaub kann gesundheitliche Schäden verursachen)
- * WHO-‘Faser‘ (eigentlich ein Bruchstück von CF oder von CFRP, CFRC): Maßgebliche Größen dieses Partikels sind Geometrie und Bio-Beständigkeit. CF ist *per se* nicht toxisch. Zu unterscheiden sind dabei lange Fasern, Bruchstücke von Fasern wie z.B. die WHO-‘Faser‘-Größe, sowie Bruchstücke von Composites d.h. hier von faserverstärkten Polymeren oder faserverstärktem Beton. Bei den Composites ist zusätzlich zur Faser noch die Matrix nebst dem Interphase-Material im Faser-Matrix Interface zu betrachten.
- * Bio-Beständigkeit: Nicht-Löslichkeit von Werkstoffen in Lebewesen, wobei wenig Biolöslichkeit als ein Hinweis für mögliche Kanzerogenität spricht.

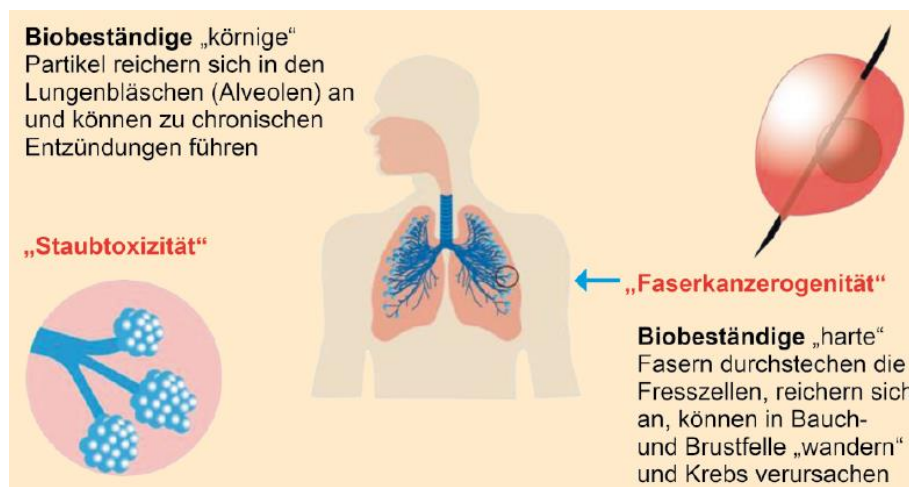


Fig. 1: Gesundheitliche Auswirkungen eingeatmeter schwerlöslicher Partikel. (Grafik: Brandau-Pollak), [CarboBreak].

Spezielle Betrachtung erfahren Lungenbläschen, CF-WHO-‘Fasern‘, CarbonBeton und angepasste Vorgehensweisen am Arbeitsplatz und bei in der Regel seltenen Unfall-Ereignissen.

Gezielte Arbeitsplatzverordnungen treten immer dem Auftreten zu hoher Belastungen der Lunge entgegen.

1	Einführung in Fasern, Matrices und Verbundwerkstoffe mit Blick auf Arbeitsplatzsicherheit	4
1.1	Vorspann zum Verständnis im Rahmen ‘Fokus Carbonfasern‘	4
1.2	Befürchtungen bei abgerissenem Windrotor-Blatt in Alfstedt – Beispiel	5
1.3	Erfahrungen mit Fasern	6
1.4	Suche eines die Gefährdung durch WHO-CF-Splitter kennzeichnenden Parameters	7
1.5	Carbon-Faser-Typen und vorläufige Gefährdungsbetrachtung (Hazard Assessment)	7
1.6	WHO-‘Faser’(particle)-Kriterium und Partikel-Größe	9
1.7	Lungenbläschen und WHO-‘Faser‘, Makrophagen.....	11
1.8	Lunge und Stäube	13
1.9	Aufzählung der zu betrachtenden Strukturwerkstoffe/Baustoffe	15
2	Charakterisierung von Fasern inklusiv vorliegender WHO-Bewertung	16
2.1	Einführung zu einigen Strukturwerkstoffen inklusive Fasern	16
2.2	PAN-Carbonfasern	17
2.3	Pech-Carbonfasern (Pitch-CF)	22
2.4	Glasfasern	22
2.5	Alkalibeständige Fasern für den Beton	23
2.6	Keramikfasern	23
2.7	Basaltfaser	23
2.8	Asbest’faser‘	24
2.9	Carbon-NanoTubes CNT (Stäube)	26
2.10	Composites oder matrix-eingebettete CF	27
2.11	Polymerfaser.....	27
2.12	Matrices	27
3	Exposition, Toxizität und Risiko bei CF-Fragmenten.....	29
3.1	Bruchstücke beim Bearbeiten während Herstellung und Bauteil-Recycling	29
3.2	Exposition von Staub und WHO-’Fasern‘ am Arbeitsplatz	29
3.3	Toxizität (toxicity).....	30
3.4	Risiko (risk)	30
3.5	Auftretenshäufigkeit of WHO-critical particle sizes	30
3.6	Ermittlung der Schweregrads (severity) S.....	31
3.7	Schema zur Bewertung des menschlichen Risikos mit Risikotabellen-Vorschlag.....	32
4	Versagensmechanismen mit Suche eines aufsplitterung-kennzeichnenden Parameters	34
4.1	Versagensmechanismen von Fasern, Matrices und Verbundwerkstoffen verstehen.....	34
4.2	Ideen und zugehörige Versuche zur CF-Aufsplitterung sowie Testdaten-Auswertung	36

5	Sicht des Autors bezüglich der CF-‘Anwendungsproblematik‘	43
5.1	Generell gesammelte Erfahrungen (Lessons Learned).....	43
5.2	Aktuell mögliche Aussagen zum Gefährdungspotential von PAN-CF und Pech-CF	44
5.3	Aussagen Gefährdungspotential von CFK aus PAN-CF, Pech-CF sowie Matrixpartikel	44
5.4	Zielgruppenorientierte Anregungen	45
5.5	Vorgehensweisen bei zufälligen Ereignissen analog zu ‘Abgerissenes Blatt in Alfstedt‘	46
6	ANNEX Von Carbonfaser-Vorstufen zu Einzelfasern (Filaments)	48
6.1	Einführung.....	48
6.2	PAN-basierte Precursor und ihre Mikrostruktur	50
6.3	Pitch based precursors and their Structure	50
7	ANNEX CarboBreak - Voraussetzungen und Mechanismen einer Freisetzung alveolen-gängiger CF-Bruchstücke	54
7.1	CarboBreak Projekt	54
7.2	Durchgeführte Versuche in M2	55
7.3	Meilensteinbericht CarboBreak.....	58
7.4	Ausblick Neue Faern	60
8	ANNEX Anwendungsbeispiele von CFK im Bauwesen	61
9	ANNEX Recycling von Fasern und Composites	65
9.1	Carbonfaser-Markt	65
9.2	Generell zu Material-Recycling und Recycling zu Bauteilen von reduzierter Größe	67
9.3	Mechanisches Recycling von CarbonBeton (Polymermatrix und mineralische Matrix)	68
9.4	Gesundheitsbetrachtungen beim Recycling.....	71
10	ANNEX CF-Werkstoff-Datenblätter von Firmen	74
11	References	76
12	Glossar.....	80
12.1	Begriffsdefinitionen.....	80
12.2	Abkürzungen	88

Der Autor kann kein Spezialist in allen hier zu betrachtenden Bereichen sein, aber er versuchte sein Bestes zu geben, und dies wurde durch die hervorragenden Kommentare von Lesern mit einem anderen Hintergrund unterstützt.

Diese Zusammenstellung mit eigenen Ideen und Untersuchungen eines nicht in einem Verdienstverhältnis stehenden Rentners (Ausgaben: Freizeit + Bürokosten) kann erst einmal nur ein ‘Living Document‘ für Ingenieure sein, das zu Ergänzungen und Korrekturen durch die Leserinnen & Leser einlädt.

Eine ganzheitliche Betrachtung (holistic view) wurde angestrebt, um eine ganzheitliche anwenderbezogene Bewertung besser ermöglichen zu können.
Dies betrifft: Einschließung aller wesentlichen Struktur-Werkstoffe/ Baustoffe nebst Komponenten.

1 Einführung in Fasern, Matrices und Verbundwerkstoffe mit Blick auf Arbeitsplatzsicherheit

Das folgende Bild soll erst einmal aufmerksam machen, aus welchen Composite-Materialien Bauteile generell bestehen können. Es enthält eine Einteilung, die sowohl verstärkungs-material- als auch matrixmaterial-basiert ist. Dies ist von Interesse für den Recyclingprozess am Ende des Bauteillebens, wo ja auch entsprechende Gesundheitsvorsorgemaßnahmen am Arbeitsplatz zu treffen sind.

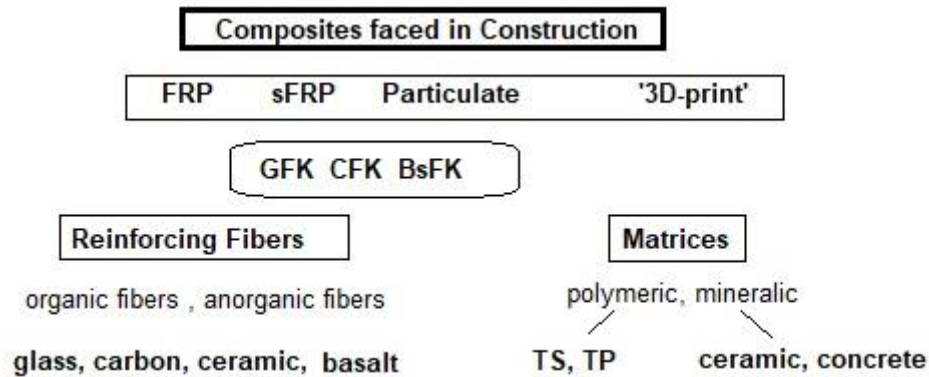


Fig. 1-1: Überblick Composite-Materialien (BasaltFaserKunststoff BsFK, ThermoSet (TS, epoxy), ThermoPlastic (TP))

1.1 Vorspann zum Verständnis im Rahmen 'Fokus Carbonfasern'

Im Folgenden geht es um Carbon-Faser-Feinstaubteilchen, also um CF-(mikro-)Partikel oder CF-Bruchstücke, die bei der Herstellung von Bauteilen und beim Recycling zur Schaffung von Restwertstoffen entstehen könnten. Die CF selbst ist bio-kompatibel, aber nicht bio-löslich und wird z. B. auch als CFRP-Hüftprothese implantiert.

Für die gesundheitliche Wirkung relevant sind Eigenschaften wie Partikelgröße, geometrische Form und auf der Oberfläche anhaftende Schadstoffe. (Einige Teile des folgenden Inhalts stammen aus dem CU-Informationspapier [CU23], welches der Verfasser kommentiert hatte).

An dieser Stelle sind noch einige wesentliche Begriffe anzuführen zu:

Stäube generell

Zur Information aus [Wikipedia, März 2023] „Resultierend aus Untersuchungen zur Lungengängigkeit von Partikeln unterscheidet man Feinstäube nach ihrem aerodynamischen Partikel-Durchmesser. Dieser Durchmesser entspricht dabei dem Durchmesser einer Kugel mit einer spezifischen Dichte von 1 g/cm^3 , welche in Luft dieselbe Sinkgeschwindigkeit wie das betrachtete Partikel hat. Hierbei wird die Bezeichnung für Feinstaub aus dem englischen Sprachgebrauch 'Particulate Matter' (PM) übernommen. Feinstaub wird in folgende Größenklassen eingeteilt: [Info Umweltbundesamt, 2022]

- * Inhalierbarer Feinstaub (aerodynamischer Durchmesser $< 10 \text{ } \mu\text{m} = 0.01\text{mm}$, PM 10)
- * Lungengängiger Feinstaub (aerodynamischer Durchmesser $< 2.5 \text{ } \mu\text{m}$, PM 2.5)
- * UltraFeine Partikel (aerodynamischer Durchmesser $< 0.1 \text{ } \mu\text{m}$, UFP oder PM 0.1).“

Europaweite Grenzwerte: [bmu.de/themen/gesundheit-chemikalien/gesundheit/luftreinhaltung/feinstaub]

- * PM 10: Jahresmittelwert $< 40 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, Tagesgrenzwert $50 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ($< 35\text{mal}$ überschreitbar),
- * PM 2.5: Jahresmittelwert $< 25 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

Um eine Staub-Exposition beurteilen zu können, muss diese quantitativ beschrieben werden. Dies geschieht für Faserstäube mit der Einheit sogenannter WHO-'Fasern'(partikel), d.h in 'Fasern' F pro

Kubikmeter Luft, F/m³. Festgelegt sind eine Akzeptanzkonzentration mit 10000 Partikeln/m³ als tägliche Exposition über ein ganzes Arbeitsleben und eine maximale Konzentration von 100000 Partikeln / m³.

Faserbruchstücke

WHO-‘Fiber‘ ≡ WHO-‘Faser‘ (= Filament) -Bruchstück mit einem Durchmesser Ø von kleiner 3 µm, einer Länge L von größer 5 µm sowie einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von $L/Ø > 3:1$. Zur Klarstellung in der Ausarbeitung: Es werden hier nicht winzige Multi-Wall Carbon-Nanotubes (MWCNTs) betrachtet, sondern vorgenannte größere CF-WHO-Partikel, auch CF-WHO-FOs (Fiber Objects) genannt. (Mit den zu verwendenden Begriffen eines modellierenden Ingenieurs müsste es eigentlich Einzelfaser oder Filament heißen und seine Bruchstücke, Splitter).

Matrix-Bruchstücke und Composite-Bruchstücke

Die im Allgemeinen größenmäßig sehr unterschiedlichen Bruchstücke von faserverstärkten Composite-Bauteilen beinhalten an den Bruchstellen mehr oder weniger verbundene Faser-Matrix-Teile von ebenfalls wieder sehr unterschiedlicher kleiner Partikelgröße.

Wie geht man nun mit solchen sehr unterschiedlich großen Bruchstücken um?
Dies ist letztlich auch die Frage bei dem abgerissenen Rotorblatt in Alfstedt, berichtet in [*Hallo Niedersachsen vom 17.01.2023*]:

1.2 Befürchtungen bei abgerissenem Windrotor-Blatt in Alfstedt – Beispiel

(Der Autor verantwortete übrigens das 52m lange GROWIAN-Blatt, 1979, s. [Cu23]. Dieses Blatt konnte damals noch nicht – wie behördlich gewünscht - aus CFK hergestellt werden, weil die Aushärtung einer Harzmatrix von Dicken größer 30 mm an der Blattwurzel noch nicht zuverlässig möglich war).

“Landkreis setzt Frist, Stand: Ein vor Monaten abgebrochenes Rotorblatt einer Windkraftanlage in Alfstedt bei Bremervörde hat umliegende Felder verschmutzt und ist bislang nicht repariert. Nun hat der Landkreis eine Frist gesetzt. Der Flügel der Windkraftanlage war im September im Windpark Alfstedt abgebrochen. Seitdem wehen Kunststofffasern über angrenzende Felder, so dass das Milchvieh nicht mehr auf die Weide darf.

Kaputtes Rotorblatt enthält Carbon: Das abgebrochene Rotorblatt besteht aus einem Plastikgemisch. Auch Carbon sei darin enthalten, bestätigte Till Gießmann (Sprecher des Erbauers Energiekontor) gegenüber dem NDR. Carbonfasern können bei einem Brand in die Lunge von Menschen und Tieren eindringen, ähnlich wie Asbestfasern. Deshalb stehen die Fasern im Verdacht, krebserregend zu sein. Endgültig geklärt ist diese Wirkung allerdings nicht. (Was hat dies aber mit dem vorhandenen Problem und seiner Lösung zu tun?)

Landkreis sieht keine Gefahr durch Plastikteile: Der Landkreis Rotenburg/Wümme hatte nach mehreren Ortsbesichtigungen angegeben, dass "keine Gefahr für Leib und Leben" bestehe. Bei Bedarf werde ein Bodensachverständiger überprüfen, inwieweit die Ackerflächen durch die Trümmerteile belastet worden sein könnten. Vorhandene Gewässer seien nach derzeitigem Kenntnisstand nicht betroffen, hieß es. (Man spricht aber über nicht bezahlbaren Bodenaustausch).

Kein Ansprechpartner für die Landwirte, keine Klärung des Problems:

Der kaputte ‘Stumpf‘ (rechts in Fig.1-2) soll bis Mitte Februar 2023 entfernt werden.“

→ Für Probleme solcher Art wäre es schön, wenn - über das BAuA - eine problem-orientierte Vorgehensweise etabliert würde. Solche Fälle werden mehr und mehr mit zunehmendem Alter der Windkraftanlagen vorkommen.

Bemerkung zu Brüchen: Was sind aber deren Ursachen? Gutes Wissen hierüber würde zukünftig für mehr Nachhaltigkeit in Entwicklung und Bau führen. Außerdem kann man mit solchem Wissen eventuell die

Betriebsdauer der früher mit 20 Jahren (*ca. 1979 von unserem GROWIAN-Partner vom DLR Stuttgart für Deutschland angenommen*) festgelegten Zahl verlängern und damit auch nachhaltiger werden.



Fig. 1-2, Alfstedt:(links) Blatt beim Abfallen, (mittig) Bruchstelle mit CFK-Fasersträngen, (rechts) 'Stumpf' = Restanlage

Analoges, unangemessenes Verhalten zeigte sich leider auch bei der Bewertung eines brennenden Rotorblattes oder eines BMW i3 (Akkubrand).

1.3 Erfahrungen mit Fasern

Bedingt durch die schlimmen Erfahrungen mit Asbest (asbestos, deutsch 'unverträglich') ist seit einigen Jahren bei faserhaltigen Materialien zu untersuchen, ob lungengängige Faser-Mikropartikel entstehen können und weiter, ob signifikante toxikologische Wirkungen dieser Faser-Bruchstücke möglich sind [CU23]. Die Untersuchung einer potentiellen Entstehung von und einer Gefährdung durch Carbonfaser(*mikro*)partikel ist daher von immenser Bedeutung für die faserverbundbestimmte Leichtbaubranche. CF-Hauptmarkt werden derzeit die Riesen-Windrotorblätter und könnte später der nicht-rostende Carbon-Beton werden.

Dem Vorsorgeprinzip folgend ist also sowohl für Maschinenbau, Windenergiesektor, Luft- und Raumfahrt, Sportgeräte als auch für den nachhaltigen CarbonBeton im Bauwesen (*siehe im Annex gezeigte Beispiele aus dem Bauwesen*) eine fundierte Untersuchung zwingend, bezüglich:

- * Kann eine toxische Wirkung festgestellt werden? und
- * Welche Arbeitsschutzmaßnahmen sind erforderlich?

Zu betrachten sind CF-Bruchstücke also Mikro-Partikel. Solche umfassen laut allgemeiner Definition Flusen und Faserbruchstücke, flüssige oder feste Teilchen, Sand- und Feinstaubpartikel in der Luft (Aerosole) im Größenbereich von 0,5 bis 5 μm . Die noch kleineren Nanopartikel werden eher wieder ausgeatmet und größere Partikel von der Nasenschleimhaut und dem Flimmerepithel der Bronchien zurückgehalten. Da die CF-WHO-'Fasern' praktisch nicht abgebaut werden, müssen die amöbenartigen Freßzellen (Makrophagen) in den Alveolen (Lungenbläschen) das Entsorgen der Bruchstücke bewerkstelligen können, 'Herausgängigkeit' ist zu realisieren. Durch zu viele

staubbedingte Partikel kleiner als die WHO-‘Faser‘-Größe kann ebenfalls eine Gefährdung hervorgerufen werden, siehe später auch Text zu Staub im Lungengewebe.

Kernfrage nach der Asbestproblematik:

Wie schnell kann der Körper die betreffenden Faser-Bruchstücke abbauen oder entsorgen? Stellen sich die inhalierten Faser-Bruchstücke, z.B. von CF, oder die kleineren Nano-Partikel als sehr schlecht biolöslich dar, kann dies zu einer dauerhaften Entzündungsreaktion führen und eine Verdachtseinstufung nach sich ziehen. Schutzmaßnahmen sind so in Analogie zu treffen (Kategorie 1B, *CLP-Verordnung*).

1.4 Suche eines die Gefährdung durch WHO-CF-Splitter kennzeichnenden Parameters

Ziel: Aufsuchen von physikalischen Parametern, die eine Risikobewertung bei neuen Fasern zukünftig erlauben werden (die CF ist hier Hauptaugenmerk)

Fasern : CarbonF, GlasF, AramidF, Basaltfasern BsF, Kunststoff-Fasern, neue Naturfasern etc.

Carbon = Kohlenstoff ist an sich nicht toxisch. Er kann in bestimmten Formen gefährlich sein als Kohlenmonoxid oder die WHO-‘Faser‘größe

Komponenten im Faser-Verbund (ausgehärtet): Schlichte (Einzelfaser-Beschichtung zwecks Handhabung), Faserstrang-Durchtränkung (EP, TP, mineralische Matrix beim Carbonbeton Beschichtung des Faserstrangs (dazu Oberflächenschutz z.B. durch SBP)

Bearbeitungsverfahren: zur Erzielung der Proben

*Verfahren klar beschreiben mit ‘Faser-Output‘ und Bruchmorphologie sowie

*Häufigkeiten der Bearbeitung für die Risikobetrachtung bereitstellen

Klinische Befunde: *Stäube (Überbelastung durch in alveolen-ingedrungene Menge)* sind zu unterscheiden von *WHO-‘Faser‘größen*

Voraussetzung: Beschreibung der unterschiedlichen, grafitisierungsbedingten Gitterstruktur der betrachteten Faser

Vorschlag: Vorgehensweise für ergänzende durchzuführende *Strukturtests*. Wahrscheinlich sind einflußreich: ***Gefügestruktur + Verformungsarbeit + Sprödigkeit*** →

(1) *Ausgehärteter Roving-Zugtest:* liefert E_f , R_f und Bruchmorphologieinformation

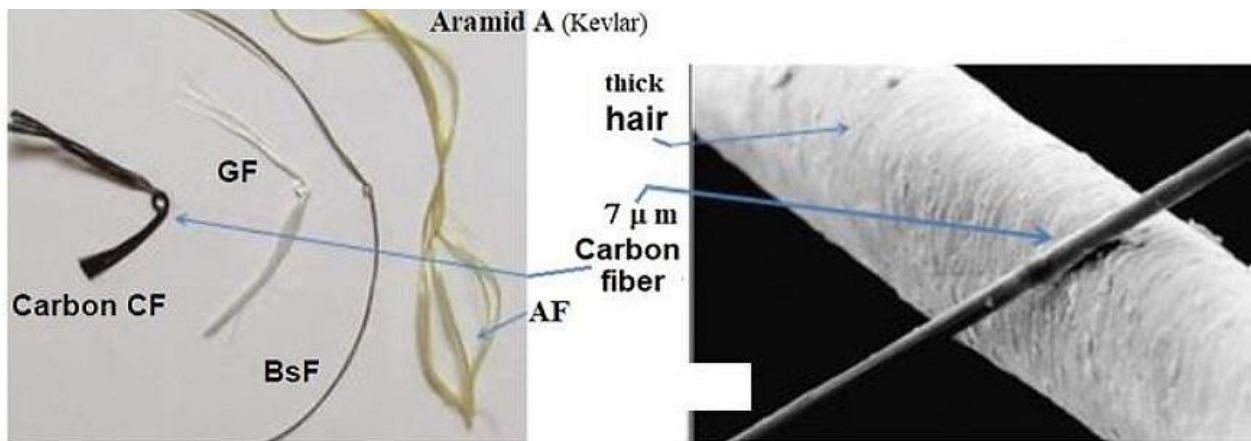
(2) *Verformungsarbeit Einzelfaser:* Anwendung ASTM D3822/D3822M-14(2020) *Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers*. Berücksichtigt die *Steifigkeit*.

(3) *Sprödigkeit Einzelfaser:* Ankerben mittels Laserstrahl. Einzelfaser-Zugversuch nach DIN durchführen. Zwar schwierig, aber bei MAN-Technologie gemacht, 1971. (falls genügend Wissen über die Grundverteilung vorliegt, könnte man mit zukünftigen Mehrwissen mit 6 gültigen Versuchsergebnissen jeweils auskommen).

(4) *Hoffnung:* Die früher durchgeführten, preiswerten Roving-Schlaufentests können als *Biegetests* zukünftig zur Vor-Klärung verwendet werden (*Fig.1-3*). Anwendung ASTM D3217/D3217M-20 *Standard Test Methods for Breaking Tenacity of Manufactured Textile Fibers in Loop or Knot Configurations*.

1.5 Carbon-Faser-Typen und vorläufige Gefährdungsbetrachtung (Hazard Assessment)

CF haben mehrere Vorteile, darunter eine hohe Steifigkeit E_f , eine hohe Zugfestigkeit R_f , eine geringe Wärmeausdehnung CTE, eine geringe Dichte ρ und damit Masse, eine hohe chemische Beständigkeit sowie eine hohe Temperaturtoleranz. Alle CFs stammen aus organischen Polymeren, die durch lange Molekülketten gekennzeichnet sind, die wiederum durch Kohlenstoffatome miteinander verbunden sind. Die Schichten in den Fasern werden durch starke kovalente Bindungen gebildet.



Glass GF (AR glass= alcali-resistant in concrete) Basalt BsF (alcali-resistant in concrete by ZrO_2)

Fig.1-3: Verschiedene Verstärkungsfasern und Vergleich CF mit menschlichem Haar

In der Industrie werden CF-Typen verwendet, die aus zwei unterschiedlichen CF-Rohmaterialien, genannt Precursor, abstammen. Der Großteil beruht auf CF, die PolyAcrylNitril-basiert sind, genannt PAN-CF. Benötigt man sehr hohe Steifigkeiten, dann kann die CF von dem Precursor Pech abstammen. Diese sogenannten multiphasenPech-CF = (m)PitchCF sind erheblich teurer und werden allein schon deswegen selten und im Carbonbeton gar nicht verwendet. Damit wird automatisch einer vielleicht möglichen Gefährdung vorgebeugt.

Das Preisverhältnis für üblicherweise verwendete Originalfasern PAN-CF der T300-Klasse / multiphasen Pech-CF ist für das kg Fasern derzeit ungefähr $15 \text{ €} / 50 \text{ €} > 3$.

Ein Pech-CF kann isotrop (iPitch) sein, kann aber – wie gewünscht – durch Wärmebehandlung anisotrop (mPitch) gemacht werden, wodurch Mesophasen Pech-CF entstehen.

<http://www.exelcomposites.com/en-us/english/composites/rawmaterials/reinforcements.aspx>.

Die Verarbeitung hochmoduliger CF ist generell sehr anspruchsvoll, da Fasern mit einem Elastizitätsmodul von z. B. 950 GPa extrem spröde sind. Beim Verarbeiten muss auf die Vermeidung von Reibung geachtet werden, was durch unterschiedliches Sizing und ‘Schmierung’ zu erzielen ist.

Als Indikatoren für Alveolen-‘Hineingängigkeit’ nebst Alveolen-‘Herausgängigkeit’ (Abreinigung) von CF-Partikeln sind folgende mechanischen Größen zu betrachten:

- (1) Biegesteifigkeit E-I,
- (2) Verhältnis L/\emptyset und eventuell
- (3) ‘Lagerungsbedingungen’ der CF-Bruchstückbehafteten Makrophagen innerhalb der Alveole.

Durchmesser (\emptyset) derzeit gängiger Fasern sind die folgenden:

- * Standard PAN-CF: Toray T300, T 700; Toho Tenax HTA, HTS oder Sigrafil (7 μm);
- * Hochmodulig HM: PAN-CF Toray T 800, M55. (7 μm);
- * Pech-CF = Pitch-CF: (7, 10 μm).

Standardfasern sind zu über 90% die PAN-CF. Aus Steifigkeitsgründen verwendete Pech-CF (Marktanteil < 10%, mPitch) gehen hauptsächlich in Weltraumbauteile und bleiben dort oder Verglühen beim Wiedereintritt in die Atmosphäre. Pechfasern haben einen kombinierten Vorteil: Sehr hoher E-Modul, praktisch Null-Wärmeausdehnungskoeffizient und relativ hohe Wärmeleitfähigkeit, was allerdings anderen Einsatz als den üblicher lasttragender PAN-CF bedeutet

und z. B. für den Wärmehaushalt (*min ΔT der optischen Bänke*) in einem Satelliten oder der Tragstruktur von großen Teleskopen essentiell ist. Was den Wunsch nach relativ hohem Elastizitätsmodul angeht, so gibt es seit langem aber genügend hochmodulige PAN-CF (*diese haben wir bei der Gasultrazentrifuge z. B. vor über 4 Jahrzehnten verwendet*), die zudem genügend Verformungsverhalten nebst Festigkeit besitzen..

Die im Bauwesen benötigten textilen Armierungsmatten wären mit der teuren Pech-CF auch schwerer herzustellen als mit PAN-CF, eine spezielle *Beschichtung* zum Verarbeiten wäre weiterhin notwendig, um Flusen zu vermeiden, und eine besonders zu entwickelnde *Beschichtung* der Matte für die Baustelle wäre außerdem gefragt.

Tabelle 1-1 zeigt eine übliche Einteilung für die PAN-CTF Elastizitätsmodul und Festigkeit an..

Tabelle 1-1: Faserklassen mit typischen Eigenschaften von PAN-CF []

Designation		Tensile Modulus E_f GPa	Tensile Strength R_f MPa
HT	(high tensile)	225 - 265	4000 - 5000
IM	(intermediate modulus)	270 - 320	5400 - 6500
HM	(high modulus)	330 - 400	3200 - 4700
UHM	(ultra high modulus)	430 - 590	3800 - 4700

Diese Einteilung möchte der Autor, entsprechend den wahrscheinlichen Grafitisierungs-Unterschieden, die die UHM-CF wohl in Richtung Pech-CF-Aufsplitterungsverhalten bringt, später abändern und die UHM bei 380 GPa beginnen lassen.

1.6 WHO-‘Faser’(particle)-Kriterium und Partikel-Größe

1.6.1 WHO-‘Faser‘

Das WHO-Kriterium für lungengängige Faserpartikel, bezeichnet als WHO-‘Fasern‘, definiert diese als Faser-Mikropartikel mit einem Durchmesser \emptyset von kleiner 3 μm , einer Länge L von größer 5 μm sowie einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von größer 3:1. (Info: Das sehr kleine Covid-Virus besitzt etwa 1% des WHO-‘Faser‘-Volumens \rightarrow also kein Inhalationsproblem, wirkt wie Staub PM 2.5.

Auch Langfasern können bereits toxisch (giftig) sein. Um solche geht es hier aber nicht. .Lange CF erfüllen natürlich nicht das WHO-Kriterium. In wieweit inhalierbare CF-Mikro-Bruchstücke (Mikropartikel) auftreten, die das Kriterium erfüllen, ist also generell zu klären.

1.6.2 Stäube

Feinstaub der Partikelgröße PM2.5 kann bis in die Lungenbläschen vordringen und die ultrafeinen Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1 μm sogar bis in das Lungengewebe. Je nach Größe und Eindringtiefe der Teilchen sind die gesundheitlichen Wirkungen von Feinstaub verschieden. Sie reichen von Schleimhautreizungen und lokalen Entzündungen im Rachen und können bei langfristiger Belastung zu Lungenkrebs führen.

Tabelle 1-2 zeigt die derzeit gültige Tabelle des Bundesumweltamtes.

Grenzwert ‘Ständige Feinstaubbelastung’: 6mg/m³.

Tabelle 1-2:: Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub[Quelle Umweltbundesamt], 2010

Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub (PM10)

Bezeichnung	Mitteilungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, ab dem der Grenzwert einzuhalten ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	24 Stunden	50 µg/m³ PM10 dürfen nicht öfter als 35mal im Jahr überschritten werden	seit 1.1.2005 einzuhalten
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	40 µg/m³ PM10	seit 1.1.2005 einzuhalten

Grenzwerte für den Schadstoff Feinstaub (PM2,5)

Bezeichnung	Mitteilungszeitraum	Grenzwert	Zeitpunkt, ab dem der Grenzwert einzuhalten ist
Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit	Kalenderjahr	25 µg/m³ PM2,5	seit 1.1.2015 einzuhalten

Deposition und Gesundheitsgefährdung durch Stäube nach [Diss. Keßeler 2019]:

„Bei Stäuben handelt es sich um „disperse Verteilungen fester Stoffe in Luft, entstanden durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelung“ (TRGS 900, 2006). Inhalierter Stäube können zu schwerwiegenden Erkrankungen des Lungen- und Bronchialgewebes, wie Lungenfibrose, Asthma bronchiale, chronisch obstruktive Bronchitis (COPD) oder Lungenkrebs führen (TRGS 504, 2016). Je nach ihren physikalischen bzw. biologisch-toxischen Eigenschaften führen sie zu unterschiedlichen Gesundheitsschäden beim Menschen (siehe Fig.1-4). Für die Gefährdungsbeurteilung von Stäuben spielt neben den physikalischen und biologisch-toxischen Eigenschaften vor allem auch die Teilchengröße und Form (Partikel- oder Faserstäube), sowie die eingeatmete Dosis und Expositionsdauer eine entscheidende Rolle, da sie das Abscheidungsverhalten im Respirationstrakt maßgeblich beeinflussen“.

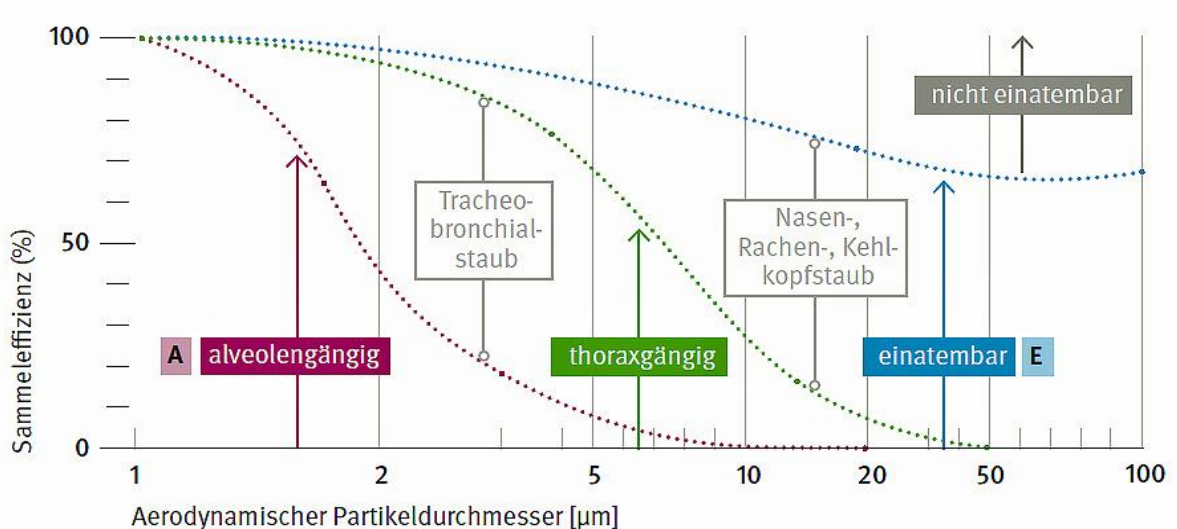


Fig. 1-4: Teilchengrößenverteilung nach DIN EN 481 [VBG, Sachgebiet Glas und Keramik]. Wirkung von inhaliertem Staub auf den Menschen (nach VBG-Information, 2011)

Zu einer eventuellen Gefährdungsanalyse durch CFK wird in [[Wes19](#)]berichtet:

„Mögliche Gesundheitsgefährdungen durch Staubexpositionen aus der Herstellung und Verarbeitung von CF und CFK sind bislang nur unzureichend untersucht. Die Toxizität von Stäuben wird vor allem durch deren Entzündungswirkung und ihre Biobeständigkeit bestimmt. Für eine erste Bewertung entzündlicher Wirkungen wurden im IPA Stäube von CF und CFK in zwei Zellkulturmodellen im Vergleich zu Partikeln und Fasern bekannter Toxizität untersucht. Gesundheitsgefährdungen durch biobeständige Partikel einschließlich Fasern beruhen in der Regel auf deren entzündlichen Eigenschaften. Eine andauernde hohe Exposition kann so zu schweren Erkrankungen der Lungen, wie einer chronisch-obstruktiven Bronchitis (COPD), einer Fibrose oder auch zu Krebserkrankungen führen. Dies gilt grundsätzlich auch für granuläre biobeständige Partikel ohne spezifisch toxische Wirkungen (GBS), die deswegen auch als humankanzerogen mit einem Schwellenwert der Kategorie 4 eingestuft sind (DFG 2012, DFG 2000). Während aber GBS erst bei dauerhafter Überladung der Lunge eine chronische Entzündung verursachen, können biobeständige Partikel mit spezifischen toxischen Eigenschaften – wie beispielsweise Quarz und Asbest – auch unterhalb dieser Überladungsschwelle entzündlich wirken. Solche Partikel werden daher mit Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW) unterhalb des GBS-Grenzwertes belegt (TRGS 900) oder es bestehen sogar Herstellungs- und Verwendungsverbote, beispielsweise für Asbest“.

Fazit:

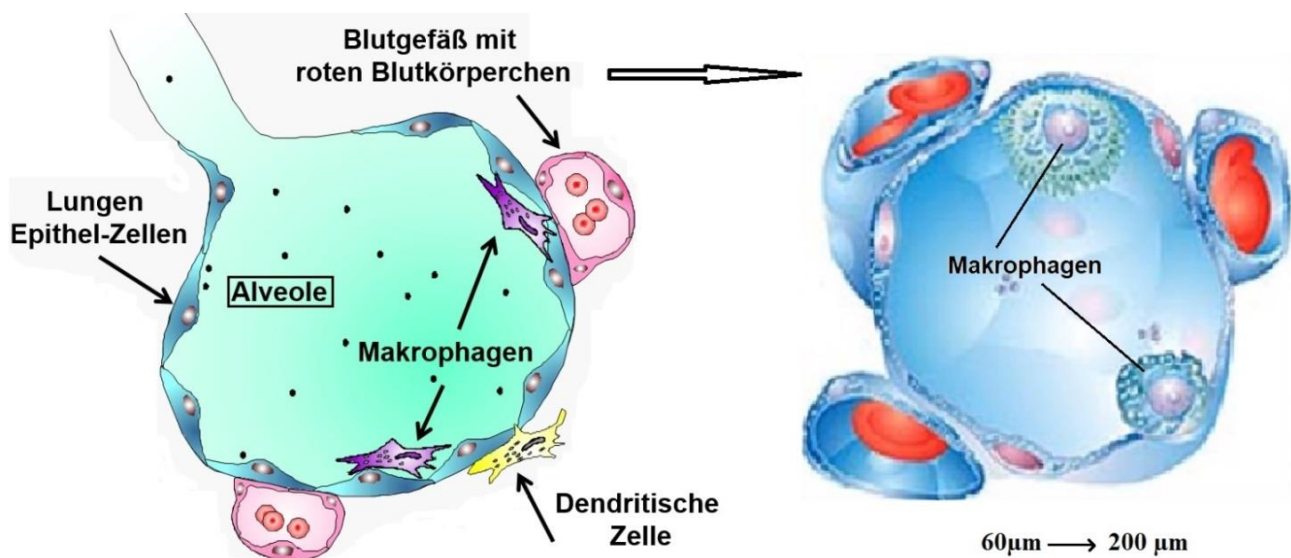
- Da die WHO-Größe kleiner als der Durchmesser üblicher CF ist, muss das Faserbruchstück den Durchmesser verringern. Dies kann geschehen durch Aufsplitterung oder durch Abbrand.
- Wann kann ein Faserbruchstück, also eine WHO-‘Faser‘, eine gesundheitsgefährdende Wirkung haben, also toxisch sein? Zwei Größen sind im Wesentlichen dafür maßgebend:
 - Geometrie
 - Um tief in die Lunge eindringen zu können, muß für Bruchstücke gelten $\varnothing < 5\mu\text{m}$, $L < 50\mu\text{m}$.
 - Kritische Bruchstücke sind die bereits definierte WHO-‘Faser‘
 - Dies trifft weiter auf Stäube und Fasern mit $\varnothing < 3\mu\text{m}$, die direkt in Lungenbläschen und Lungengewebe eindringen.
 - Bio-Beständigkeit
 - Hohe Bio-Beständigkeit bewirken starke Toxizität
 - Bruchstücke mit kurzen Verweilzeiten, die schnell aufgelöst oder abtransportiert werden, sind weniger risikobehaftet.

1.7 Lungenbläschen und WHO-‘Faser‘, Makrophagen

In den etwa 0.3 Milliarden Lungenbläschen (Alveolen) findet der Gasaustausch von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid statt. Alveolen sind dodekaederförmige Bläschen am Ende der Bronchien von der Größe 60 bis 200 μm . Das Blut wird in den Kapillaren ausgetauscht, die die Alveolen überziehen. In der Alveole ist eine höhere Konzentration an Sauerstoff, so dass Sauerstoff in die roten Blutkörperchen wechselt. Laut [[Facharztwissen](#)] spielen Makrophagen (*engl: macrophages*) als Fresszellen (*Phago-zyten*) eine wesentliche Rolle bei der Sofortabwehr des Körpers von Bakterien und bei Abräumvorgängen, [Fig.1-5](#) und [6](#). Sie entwickeln sich unter dem Einfluss von Entzündungsmediatoren aus sogenannten Monozyten (*eingewandert oder lokal vorhanden*) und sind in allen Geweben und Organen des Körpers, gehäuft aber in Entzündungsarealen zu finden. Makrophagen sind amöboid bewegliche Zellen des Immunsystems. Sie „fressen“ Bakterien, andere Fremdpartikel sowie alternde Körperzellen, Tumorzellen und Teile abgestorbener Zellen des Körpers und verdauen und entsorgen sie. Makrophagen sind große rundkernige Zellen mit unregelmäßiger Oberfläche. Sie übernehmen die Immunabwehr des Lungengewebes gegenüber

allen Partikeln, welche das Transportsystem der Atemwege überwunden haben. Nasen-inhalierte Partikel können über den Schleimfilm abgehustet werden. Da das Heraustransportieren von Partikeln durch die Makrophagen viele Wochen benötigt, kann sogar Partikelakkumulation im Lungenbläschen auftreten.

Laut [Wikipedia, Feb. 2023] kommen Alveola-Makrophagen auf der Oberfläche der Lungenbläschen (Alveolen) vor, *Fig. 1-5*. Sie stammen von Monozyten aus dem Knochenmark ab (die ständig im Blut zirkulieren), wandern über die Blutgefäße in die Lunge ein und haften sich am Endothel der Lungenkapillaren an. Bei Auftreten von Fremdpartikeln wandern sie in die Lungenbläschen ein. Wenn die Monozyten körperfremde oder körperschädigende Strukturen entdecken, wandern sie in das Gewebe ein. Erst dort bilden sie sich um und werden zu Makrophagen, quasi gepanzerte Kampfzellen, die andere Zellen "fressen", das heißt in ihr Zellinneres aufnehmen (Phagozytose), wo sie durch hochgiftige (toxische) Stoffe zerstört werden. Makrophagen sind deutlich größer als die Monozyten, aus denen sie hervorgehen. Diese Größe brauchen sie vor allem auch deshalb, weil sie andere Zellen in sich aufnehmen müssen. Nach dem Umschließen werden die Eindringlinge mithilfe verschiedener Enzyme und toxischer Stoffe abgetötet und zerstört. Die Makrophagen im Zellgewebe können eine Lebensdauer von mehreren Wochen haben. Makrophagen können natürlich auch WHO-‘Fasern‘ aufgrund ihrer Größe nicht immer vollständig umschließen und entsorgen, nebst abtransportieren. Durchstochene Makrophagen sterben in der Regel ab. Der Makrophagen-Tod ist mit einer Ausschüttung von Botenstoffen verbunden, die auf Dauer zu Entzündungsreaktionen führen können und damit als gesundheitsschädlich gelten. Außerdem ist ja auch noch der Mikro-Splitter darin vorhanden.



Verändert mit Erlaubnis von Krug H.F., Wick P. (2011). Nanotoxikologie - eine interdisziplinäre Herausforderung. Angew Chem, 123(6): 1294-1314. Copyright © 2016 John Wiley and Sons.

SlidePlayer.org

Fig. 1-5: Alveolen (60µm→200 µm) mit Makrophagen und Aktionen

„Eine ganzheitliche Betrachtung, die Fasern, Schlichte, Tränkung und eventuell eine Beschichtung mit einbezieht, ist zu bevorzugen, da dann weniger Regeln insgesamt notwendig sind. Bei der Verarbeitung von Epoxidharzen haben wir ja eine gesundheitsschädliche Substanz vorliegen, für die entsprechende Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz (Absaugung, Schutzausrüstung etc.) getroffen werden, bevor man mit der Verarbeitung beginnt. Diese Schutzmaßnahmen **sollten** für die Fasern auch ausreichend sein und damit die weitere Ver- und Bearbeitung als Verbundwerkstoff anders

bewerten helfen. Sobald der FKV in der Nutzungsphase ist, haben diese Themen eigentlich keinen Einfluss mehr. Das würde bedeuten, dass die möglichen gefährdeten Personen (Fachpersonal!) im Umgang mit den Materialien geschult sein müssen und entsprechende Vorkehrungen in den Fachbetrieben vorgenommen wurden“ [B. Güttler, IVW].

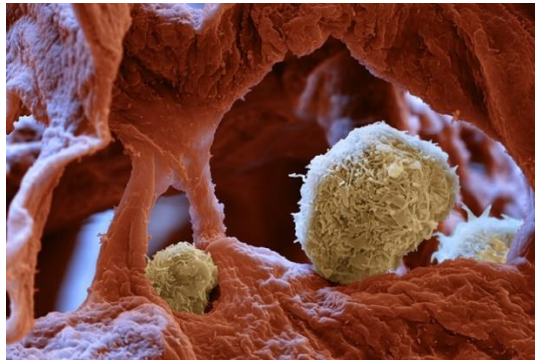


Fig. 1-6: Alveoläre Makrophagen (beige) sorgen im Lungengewebe (rot) dafür, dass die Atmung trotz Angriff durch Grippeviren sicher-gestellt ist. (ETH Zürich, Copyright: Eye of Science)

„Abgabe einer Empfehlung durch Composites United zusammen mit der BAuA zum Arbeiten allgemein mit CFRP und zu PAN-CF-Carbonbeton inklusiv sinnvollem Recycling.“ Wäre schön

„Es ist sinnvoll, die Materialkreisläufe in den unterschiedlichen Anwendungen durchzuspielen und sich auf die Anwendungen mit den höchsten FKV-Volumina zu konzentrieren wie Automobil, Luftfahrt, Energie. Dies hätte zur Folge, dass eine Entsorgung über den grünen Punkt nicht zu diskutieren ist, da es für diese Anlagen bestehende Entsorgungswege gibt, die jedoch noch nicht auf FKV ausgelegt sind. Hier muss man genauer hinschauen“ [B. Güttler, IVW].

1.8 Lunge und Stäube

Eine Reihe von Arbeitsbereichen fällt jedoch dadurch auf, dass zum einen die Spanne der Exposition vergleichsweise klein ist und auch die maximalen bis dahin gemessenen Expositionen unter 50 000 Fasern/m³ (F/m³) liegen. Es handelt sich dabei um das Bohren, die Teile-Herstellung und die Spinnerei/Weberei.

„Die Bestimmung der Konzentration von WHO-Fasern aus CF in der Luft an Arbeitsplätzen geschieht mit dem Verfahren nach der DGUV Information 215-546 [4]. Das rasterelektronenmikroskopische Verfahren erlaubt neben der Bestimmung der Gesamtfaserkonzentration durch eine semiquantitative Elementanalyse eine Unterscheidung verschiedener anorganischer Faserarten. Alle sonstigen anorganischen Fasern werden zusammengefasst. Anhand eines Referenzmaterials aus dem untersuchten Arbeitsbereich können auch weitere Faserarten differenziert werden. Die Identifizierung von CF-WHO-Splittern ist jedoch nicht eindeutig möglich, wenn nicht eindeutige morphologische Kriterien vorliegen - z. B. der gebogene Verlauf einer Faser. Da an einer nicht unerheblichen Zahl der Splitter jedoch morphologische Kriterien zu erkennen sind, die typisch für CF sind, ist auszuschließen, dass die Faserkonzentrationen, die bei der Herstellung oder Bearbeitung von CFK gemessen wurden, lediglich auf die Matrix oder andere Stoffe zurückzuführen sind. WHO-‘Fasern‘ stellen nur einen sehr kleinen Anteil der freigesetzten Stäube aus CF und GF dar, < 0.1%-Masse-%. Da bei üblichen CF die Faserdurchmessern $\varnothing > 5\mu\text{m}$ sind, besteht für diese keine Einstufung. Erst durch

mechanische Bearbeitung können lungengängige Splitter mit CF-WHO-Abmessungen entstehen oder durch den seltenen Fall Abbrand eines CFRP-Bauteils“. Auszug aus [Mat19].

„Die lange und/oder hohe Inhalation von unlöslichem oder schwerlöslichem Staub kann zu einem Versagen der respiratorischen Clearancemechanismen führen, sodass eingeatmete Partikel im Lungengewebe akkumulieren (Morrow, 1988; Muhle et al., 1990; Oberdörster, 1995). In diesem Zusammenhang wird auch von der sog. „Überladungshypothese“ gesprochen (sog. „Overload“; Morrow, 1988; Muhle et al., 1990; Oberdörster, 1995). Kommt es zu einem Overload, sind die Alveolarmakrophagen (AM) nicht mehr in der Lage, die in den Alveolen deponierten Partikel suffizient zu entsorgen, da sie durch die massive Überladung immobil werden und aggregieren (Morrow, 1992, 1988). Nach Untersuchungen von Morrow (1988) an Ratten ist vor allem das phagozytierte Volumen dabei entscheidend: Ab einem Phagozytose-Volumen von $60 \mu\text{m}^3/\text{AM}$ werden erste Overload-Effekte beobachtet (Morrow, 1988). Bei einem durchschnittlichen Makrophagenvolumen der Ratte von ca. $1000 \mu\text{m}^3$ (Krombach et al., 1997) entspricht dies einem Anteil von etwa 6%. Erreicht das Phagozytosevolumen der Partikel $600 \mu\text{m}^3/\text{AM}$ (60% des Makrophagenvolumens), kommt es nach Morrow (1988) zum gänzlichen Versagen der alveolären Clearance. Die Untersuchungen von Morrow (1988) stellen damit einen guten Orientierungspunkt dar, ab wann Overloadeffekte zu erwarten sind. Bei einem Partikel-Overload können selbst schwach toxische und inerte Stäube – sog. granuläre biobeständige Stäube (GBS) (MAK, 2012) - eine Gesundheitsgefahr darstellen, da die retinierten Partikel zu einer inflammatorischen Reaktion im Lungengewebe führen (siehe Kapitel 1.3.3).ten sind. Dennoch sollten sie nicht als starre Grenzwerte betrachtet werden (Morrow, 1992). Zum Schutz der Arbeitnehmer ist daher durch den Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) ein „Allgemeiner Staubgrenzwert“ (ASGW) definiert worden. Er ist als Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) anzuwenden und gilt für schwerlösliche, bzw. unlösliche Stäube, für die eine spezifische Toxizität (erbgutverändernde, krebserzeugende, fibrinogene oder sensibilisierende Wirkung) nicht nachgewiesen ist (TRGS 900, 2006). Der ASGW gilt also für GBS (MAK, 2012). Die aktuellen ASGW betragen für die A-Fraktion $1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$ und für die E-Fraktion $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ (TRGS 900, 2006)“.

In Fig.1-7 wird aufgezeigt, wie sich kürzere und längere faserartige Partikel in der Lunge verhalten.

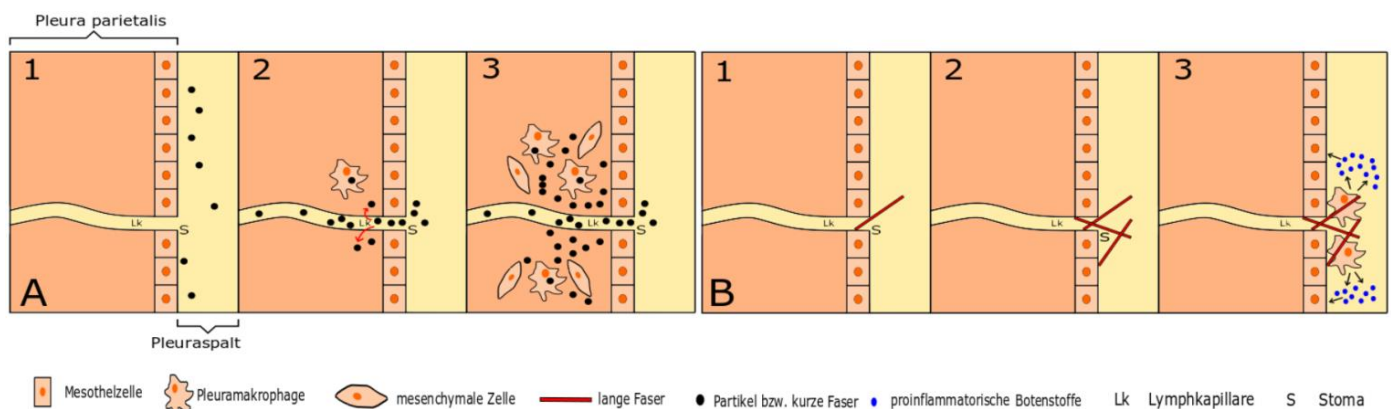


Fig.1-7: Black spots und frustrierte Phagozytose im Pleuraspalt (aus [Leß20], modifiziert nach [Don10])

Die Pleura (Brustfell) ist eine dünne Haut und besteht aus zwei Blättern, das eine (Lungenfell) umgibt die Lungen, das andere liegt darüber (Rippenfell). Dazwischen befindet sich der sogenannte Pleuraspalt. Die Mesothelzelle ist eine pluripotente Zelle, die bei entzündlichen Reaktionen enorme Formvariationen zeigt. Sie kann alle im Körper vorkommenden Zellen

Eine Beschreibung von Fig.1-7 nach Donaldson et al. in [Don10] sieht zwei Bereiche:

- A Partikel und kurze 'Fasern': A1: Partikel/kurze 'Fasern' befinden sich im Pleuraspalt. A2: Sie verlassen den Pleuraspalt durch die Stoma (S, Körperöffnung). Einige Partikel/kurze 'Fasern' lagern sich während der Passage durch die Lymphkapillaren (Lk) durch das lockere Kapillarendothel (Schicht aus Epithelzellen, welche das Innere eines Blutgefäßes auskleiden) im Zwischenraum ab und akkumulieren. Durch Akkumulation von migrierten Makrophagen und weiteren Partikeln/kurzen 'Fasern' bilden sich sog. „**Black spots**“ aus. Je nach Art und Toxizität der deponierten Partikel/kurzen 'Fasern' kommt es u.a. zur mesenchymalen (Vorläuferzellen) Zellaktivierung mit entsprechenden pleuralen Veränderungen (z.B. Bildung von pleura Plaques im Fall der Asbest'fasern').
- B lange 'Fasern': B1: Eine lange 'Fasern' im Pleuraspalt kann die Stoma (S) nicht passieren und hängt sich dort fest. B2: Weitere 'Fasern' verhaken sich und bleiben im Bereich der ersten Faser hängen. B3: Makrophagen versuchen die 'Fasern' zu phagozytieren, doch scheitern aufgrund der 'Faser'länge. Es kommt zur Entzündungsgefahr (*frustrierten Phagozytose mit Initiation einer proinflammatorischen Reaktion*).

Die Verweildauer von 'Fasern' ist für das Ausmaß möglicher Gesundheitsgefahren von Bedeutung. 1994 wurde vom 'Ausschuss für Gefahrstoffe' ein Bewertungsschema für künstliche Mineralfasern vorgeschlagen. Danach sind nicht mehr nur die geometrischen Verhältnisse von Faserlänge zu Faserdurchmesser, sondern die Beständigkeit der Fasern im menschlichen Körper entscheidend. Je schneller sich Fasern in der Lunge auflösen, desto geringer ist die Gefahr von gesundheitlichen Schäden. Grundsätzlich bezieht sich die Biolöslichkeit der 'Fasern' auf die Fähigkeit eines biologischen Organismus, die Faser anzugreifen, zu schwächen und aus dem Körper abzustößen. Dieses geschieht durch Makrophagen und Lungenflüssigkeit (pH 7,4), welche die Fasern chemisch angreifen, anschließend werden diese durch Makrophagen (innerer pH ca. 4,5) abtransportiert.

1.9 Aufzählung der zu betrachtenden Strukturwerkstoffe/Baustoffe

- Fasern: PAN-CF, Pech-CF, Glas, Aramid, Basalt, Naturfasern (Lignin), ...
- Asbest'faser' (*Beispiel nur noch*)
- Composites, Composite-Bruchstücke und Composite-Stäube: EP, TP, Mörtel.
- Matrices, Matrix-Bruchstücke und -Stäube: polymer, mineralisch .

2 Charakterisierung von Fasern inklusiv vorliegender WHO-Bewertung

2.1 Einführung zu einigen Strukturwerkstoffen inklusive Fasern

Fig.2-1 gibt einen Überblick zu Strukturwerkstoffen, speziell Fasern.

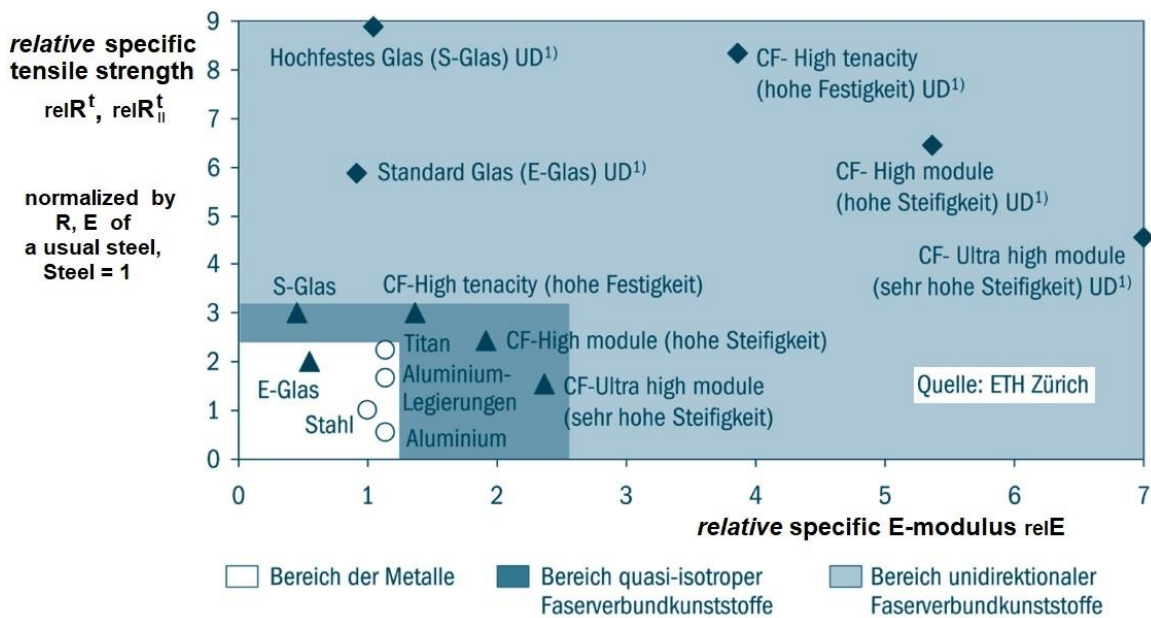


Fig.2-1: Eigenschaften von Werkstoffen inklusiv Faserverbundwerkstoffe (normalized by steel). ¹⁾ uni-directional [ETH Zürich]. Bi-axial sinkt der Wert, da ein Blech zweiachsigen Zug trägt, ein offenes Gitter oder eine dichte Lamelle aber zweiachsig zu bewehren sind

Eine Überblicksdarstellung von Fasern und Matrices wurde 2020 erarbeitet in der Studie: „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen - Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau“ von Roland Berger Strategy Consultants mit VDMA. Fig. 2-2 zeigt die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten auf, wie Composites gebildet werden können.

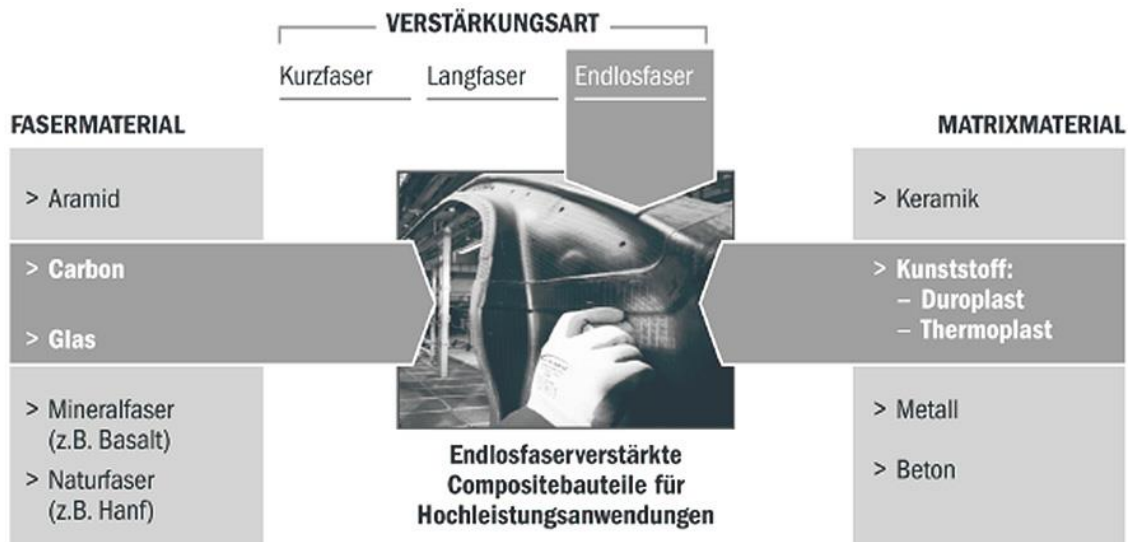


Fig. 2-2 : Composites im Überblick [VDMA, Roland Berger]

From [H. Hu, Y. Liu, in Technical Textile Yarns, 2010] can be cited:

“High Modulus, High Tenacity rovings (yarns) are those made from HM-HT fibers, having both tenacity above 3 GPa and modulus above 50 GPa. HM-HT fibers in practical applications have a modulus above 50 GPa, but their (tenacity strength) is normally under 3 GPa. HM-HT fibers can be classified into three categories: inorganic fibers, quasi-organic fibers and polymeric fibers. For inorganic fibers, the high strength and modulus are achieved from their inorganic 3-D networks. CFs may be described as quasi-organic fibers, because they result from organic chemistry. The turbostratic form of the hexagonal planar network of carbon atoms would give the high strength and stiffness. HM-HT polymeric fibers are formed with high orientation of macromolecular chains along the fiber axis.”

2.2 PAN-Carbonfasern

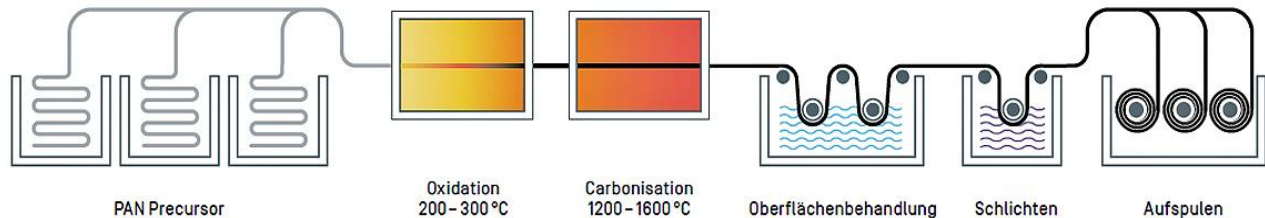


Fig. 2-3 : Herstellprozess von der SIGRAFIL-PAN-CF von SGL

Auszug aus [Keß20], dort modifiziert nach AVK, 2010:

„Durch verschiedene Schlichtetypen wird eine optimale Anpassung der CF an unterschiedliche Matrixsysteme möglich. Dabei sind verwendungsspezifische Versionen möglich. Matrix-Kompatibilität zu Epoxid, Polyurethan, Phenol, Vinylester, Polyester, ungesättigtes Polyester, Polyurethan, Polycarbonat, Polysulfon, Cyanatester, Polyamid, BMI, PESU, PEEK, PEKK, PVC, Polyimid, Polypropylen, Polyamid.

PAN-Precursoren werden durch einen sog. Lösungsmittelspinnprozess hergestellt (AVK, 2014). Da PAN nicht schmelzbar ist, wird es zur Faserbildung zunächst in verschiedenen organischen oder anorganischen Lösungsmitteln gelöst (AVK, 2014). Das gelöste PAN wird daraufhin durch eine Spinnrüse mit bis zu 500.000 Kapillaren gesponnen, wodurch PAN-Fäden entstehen (AVK, 2014). Anschließend wird das Lösungsmittel in Waschbädern entfernt und die Fasern werden getrocknet (AVK, 2014). Die folgende Weiterverarbeitung der PAN-Precursoren in 14 Carbonfasern ist sehr energieintensiv, da hohe Temperaturen erforderlich sind. In der sog. Stabilisierungsphase wird durch verschiedene Oxidationsprozesse aus der PAN-Faser zwischen 200-300 °C zunächst eine unschmelzbare Faser hergestellt (AVK, 2014; Eickenbusch und Krauss, 2014). Anschließend erfolgt die sog. „Carbonisierung“ bzw. „Graphitierung“ der Fasern, die bei Temperaturen bis 1800 °C bzw. 3000 °C erfolgt (AVK, 2014). Je nach gewählter Temperatur können somit verschiedene Faserklassen synthetisiert werden (siehe Abbildung 5): hochfeste Fasern (HT), Zwischenmodulfasern (IM), Hochmodulfasern (HM) und Ultrahochmodulfasern (UHM) (AVK, 2014; Eickenbusch und Krauss, 2014). Hochmodulfasern (HM) und Ultrahochmodulfasern (UHM) werden einem zusätzlichen Graphitierungsschritt unterzogen, bei dem die hohen Temperaturen bis 3000°C erreicht werden (AVK, 2014). Abschließend erfolgt eine Oberflächenmodifikation der Fasern durch verschiedene oxidative und nichtoxidative Verfahren, sowie eine Zugabe von weiteren „Hilfsstoffen“ auf die Carbonfaseroberfläche (sog. Präparation bzw. Sizing) (AVK, 2014). Hierdurch werden unter anderem die mechanischen Eigenschaften der Fasern weiter optimiert und die spätere Verarbeitbarkeit verbessert (AVK, 2014). Der Herstellungsprozess von Carbonfasern aus PAN ist in Fig. 2-4.

Für die Synthese von Carbonfasern aus Pech-Precursoren kommen als Ausgangsrohstoffe Steinkohleteer oder Petroleumpech zum Einsatz (Eickenbusch und Krauss, 2014). Pech zeigt eine gute Thermoplastizität und kann im Gegensatz zu PAN daher direkt aus der Schmelze gesponnen werden (AVK, 2014). Aus den Ausgangsrohstoffen wird zunächst eine sog. Mesopechphase erzeugt, die einen hohen flüssigkristallinen

Anteil besitzt (Eickenbusch und Krauss, 2014). Durch einen Spinnprozess entstehen aus den Flüssigkristallen dann Fasern (Eickenbusch und Krauss, 2014). Die anschließenden Syntheseschritte sind analog zur PAN-CF-synthese (AVK, 2014). Es erfolgt eine stabilisierende Oxidation, sowie eine Carbonisierung bzw. Graphitierung zu HM-Fasern (Temperatur > 1600 °C) oder UHM-Fasern (> 2200°C) (AVK, 2010; Eickenbusch und Krauss, 2014)“.

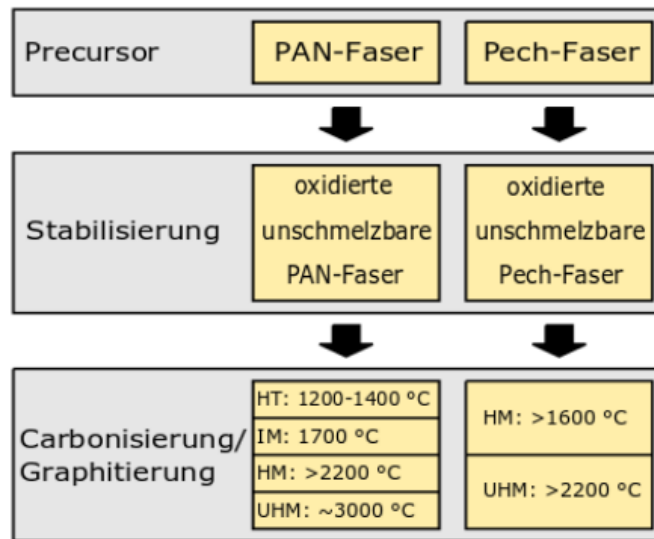


Fig. 2-4: Prozess-Schritte der CF-Synthese aus PAN (Keß20, modifiziert nach AVK, 2010) (Pech hinten ausführlicher)

Verwendete Proben [Keß20]:

„Das Mahlen der Proben erfolgte mittels einer Kugelmühle („CryoMill“) bei einer Frequenz von 30 Hz. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Endfeinheiten hergestellt, die im Folgenden mit CFK-1 und CFK-2 bezeichnet werden. Aus der Automobilindustrie war es eine Staubprobe, die beim Schleifen von CFK-Bauteilen entstand, bezeichnet mit CFK-3. Die Partikelgrößenverteilung wurde gemessen“.

Leider gibt es in Tabelle 2-1 keine detaillierten CF-Angaben für diese CFK-Stäube. **Info einzuholen**

Tabelle 2-1: Übersicht der verwendeten CFK-Proben Probe Durchmesser Verteilung

Probe	Durchmesser	Verteilungsmaximum bei	Herkunft
CFK-1	2-40 µm	10 µm	Universität Paderborn Lehrstuhl für Kunststofftechnologie Mahlen durch Retsch® GmbH
CFK-2	3-100 µm	10 µm; 60 µm	Universität Paderborn Lehrstuhl für Kunststofftechnologie Mahlen durch Retsch® GmbH
CFK-3	< 10 µm	-	Schleifstaubproben aus der Automobilindustrie

„Die in den Zellkulturen zu verwendenden Makrophagen wurden gewonnen, wie in [Keß20] detailliert. Das inflammatorische (entzündliche) Potential der CFK wurde mittels des Particle-Induced Cell Migration Assay (PICMA) untersucht und das toxische Potential mit dem Realtime Cell Analyser (Echtzeit-Zellanalysator, RTCA). Die CFK lassen sich nach den ersten Ergebnissen im PICMA mit einer schwachen Inflammationsreaktion zwischen inertem Bariumsulfat und den stark inflammatorischen Stäuben (Asbest, Quarz, MWCNT) einordnen.“

Das folgende Bild fasst ergänzend die Auswirkungen nach einer 'Faser'exposition zusammen.

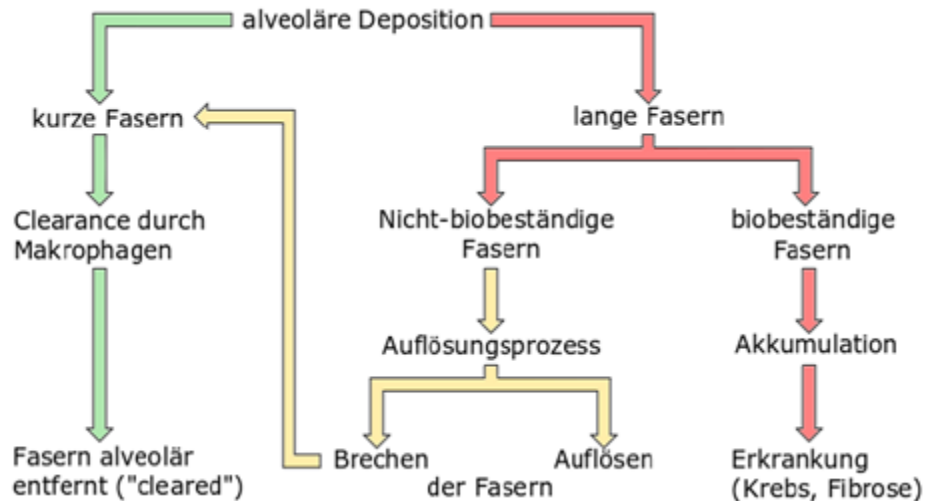


Fig. 2-5: Auswirkungen der 'Faser'exposition (modifiziert nach Donaldson, 2009 [Keß20])

Fazit [Keß20]: „Zusammengefasst konnte bei den untersuchten CFK eine schwache bis mäßige Inflammationsreaktion im PICMA beobachtet werden. Auch die zytotoxischen Ergebnisse aus dem RTCA sind eher als schwach toxisch zu bewerten“.

Nach Untersuchungen vom Institut für Arbeitsschutz (IFA) können teilweise auch Matrixbestandteile aus den Zwischenräumen der Carbonfasern derart herausbrechen, dass sie selbst eine faserförmige Geometrie mit kritischen Abmessungen annehmen (siehe Fig.2-6).

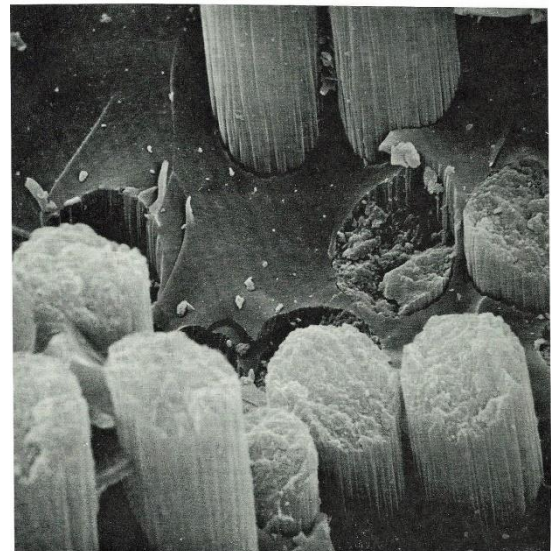
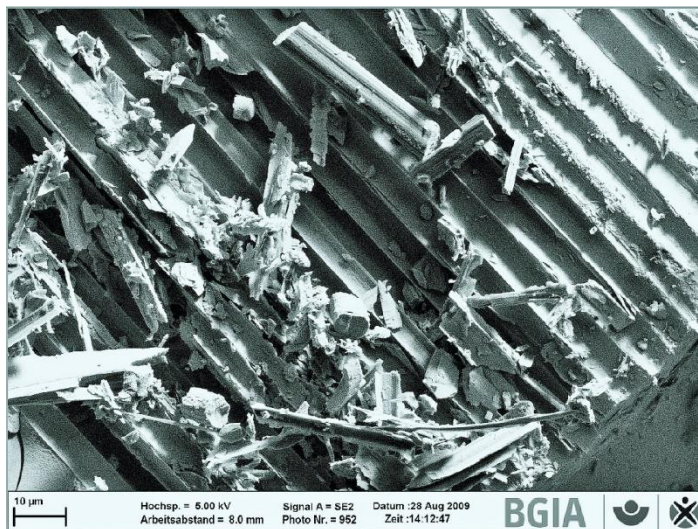


Fig.2-6 : REM-Aufnahme von CFK nach mechanischer Bearbeitung. (links) Aufgenommen und freundlicherweise zur Verfügung gestellt vom Institut für Arbeitsschutz (IFA) der DGUV, Dr. Markus Mattenklott. Man erkennt, wie gebrochene Matrixbestandteile faserförmige Gestalt annehmen können. (rechts) MAN-Technologie (1975)

Anhand der Vielfalt von PAN-CF, angewandt im Design, soll Toray exemplarisch genommen werden, Fig.2-7. Zu den TORAYCA®PAN-basierten CFs gehören Fasern mit Standardmodul, mittlerem Modul und hohem Modul mit einer Vielzahl von Eigenschaften. CF auf höchstem Niveau basiert normalerweise auf dem Zugmodul E_f und der Zugfestigkeit R_f der Faser. Die CFs der T-Serie von Toray haben in der Regel eine hohe Zugfestigkeit und werden nach dem Zugmodul in

Standardmodul- und Zwischenmodulkategorien eingeteilt. Die CF der M-Serie haben einen hohen Modul, während die MJ-Serie der zweiten Generation eine verbesserte Zugfestigkeit aufweist. CF sind elektrisch und thermisch sehr leitfähig. Bei gleicher Masse hat CFK eine mehrfache Zugfestigkeit und Steifigkeit von Stahl mit dem Effekt 1 kg CFK kann 5 kg Stahl ersetzen.

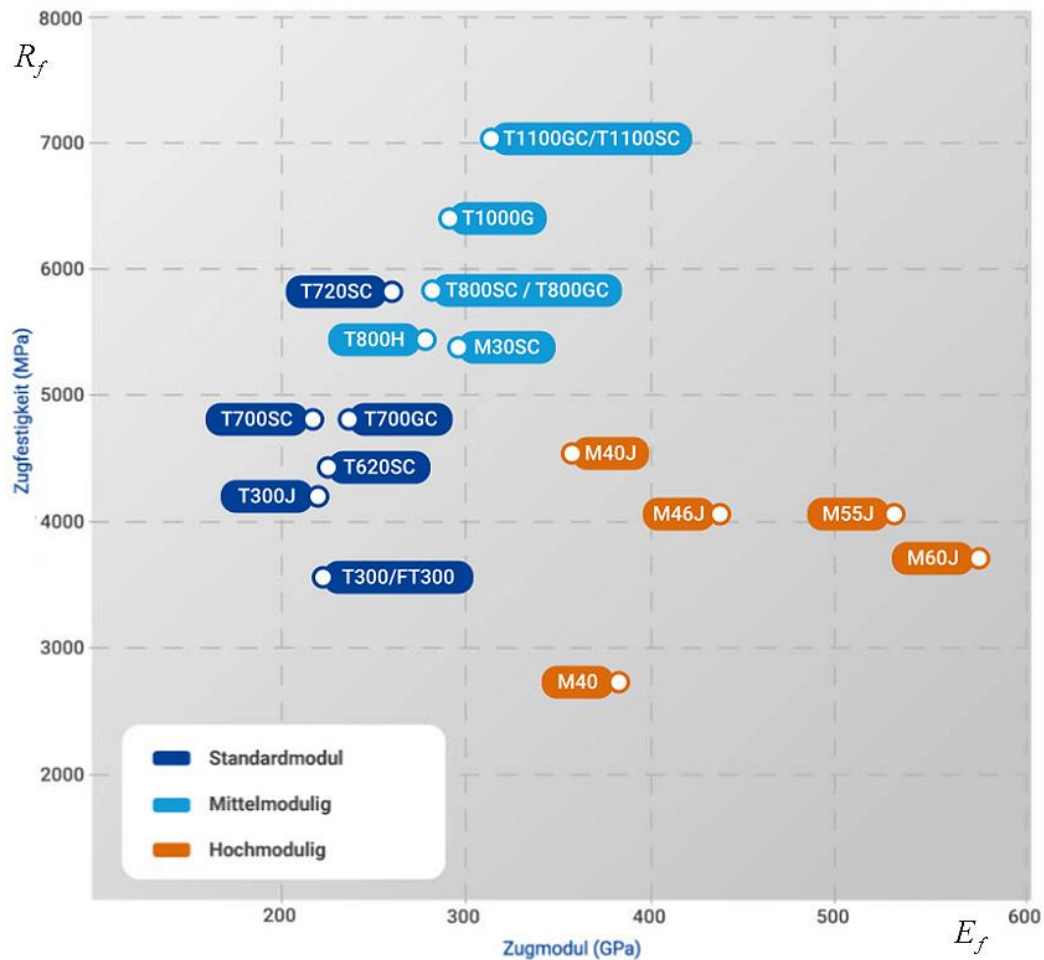


Fig. 2-7: Toray's Klassifizierung ihrer Fasern $R_f(E_f)$, Zug

Abschließend zeigt Fig.2-8 noch 'dicke' Rovings (Heavy Tows) von SGL für das Bauwesen.

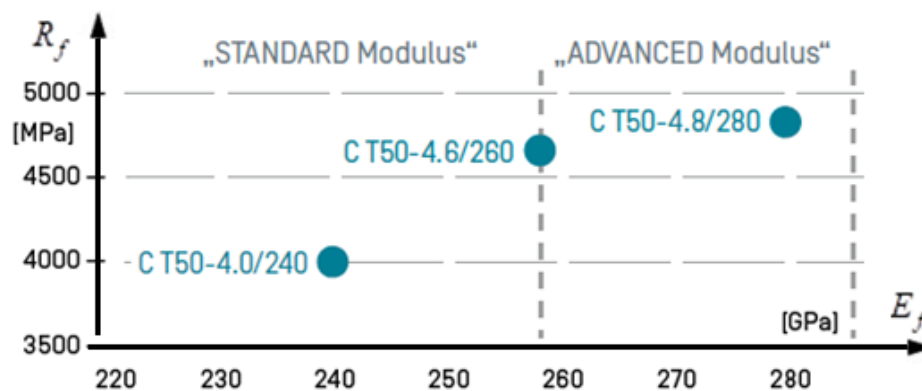


Fig. 2-8: Zugfestigkeit (E-Modul) von Sigrafil-Fasern [SGL] für das Bauwesen, 50k-HeavyTows. ($T =$ Tenacity (Zug-Festigkeit von Filamenten), $50 = 50k$, $4.0 = 4000MPa R_f$, $240 = 240 GPa E_f$). Neu: CT50-4.9/235, $\epsilon_{fracture} = 2\%$!

PAN-CF-Kosten-Entwicklung: Fig.2-9

- Seit 1970 -2020 ein Faktor 100 für einen 2k-Roving
- Derzeitiger Preis: ca. 16 €/kg CF-Roving, 30€/kg Bewehrungs-CF-Matte. Nur mit einem energie-optimaleren Herstellprozess sind zukünftig noch Preisreduktionen zu erwarten
- Ergänzend zeigt Fig.2-9 links die Aufteilung des derzeitigen Marktes und die noch relativ geringe Bedeutung des Bauwesens-Anteils.
- Fig.2-9 rechts zeigt die Preisentwicklung der dicker werdenden Rovings (tows) hin zu Heavy Tows über 48k.

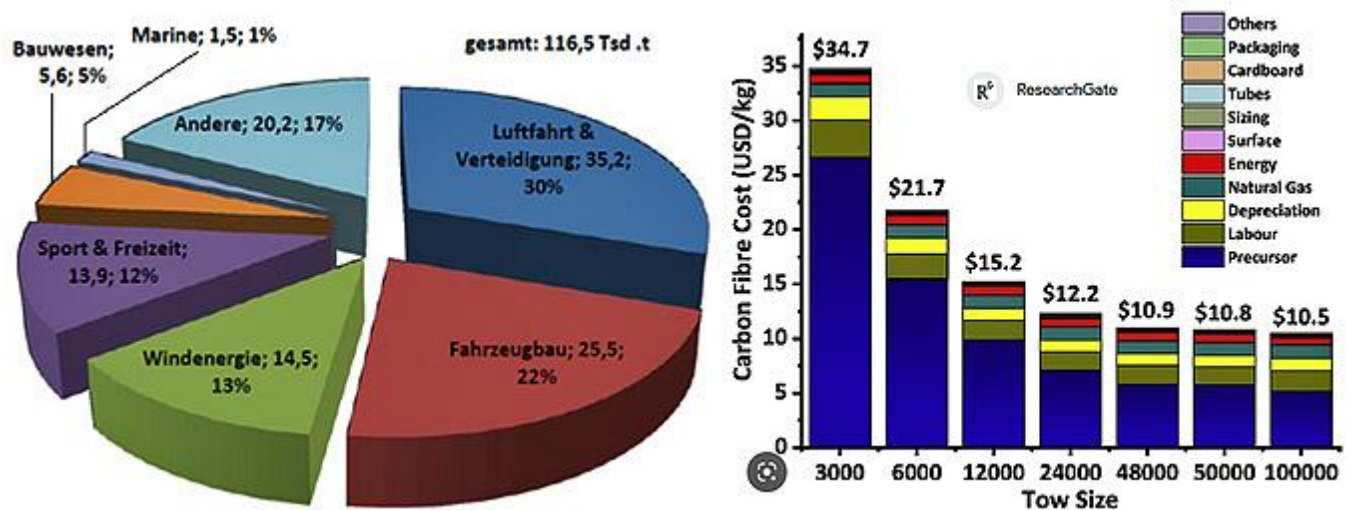


Fig.2-9: (links) Verteilung des CF-Verbrauchs. [WIKI file, 25. März 2023] Sauer und Kühnel, 2017)

(rechts) Entwicklung des CF-Preises in Abhängigkeit von der Filamentanzahl im Roving (tow); [Srinivas NunnaSrinivas NunnaPatrick BlanchardDerek Buckmaster Development of a cost model for the production of carbon fibres DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02698, LicenseCC BY-NC-ND]

Allgemeiner Markt: Relevant sind Carbonfasern von 1k bis 48k (heavy tow), hierzu zählen CF mit erhöhter Festigkeit (UTS, ITS) und mit erhöhtem E-Modul (IMS, UMS). [S. Beverungen]

Bauwesen: Teijin Fasern aus der STS und HTS Produktreihe; Toyo Tenax die STS Fasern 50k, meist mit 3200 tex, Zoltek PX35 50k.

Microstruktureller Bau von PAN-CF und

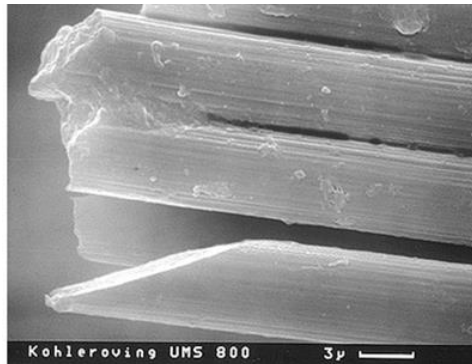
„Pech ist ein viskoelastisches Material, das aus aromatischen Kohlenwasserstoffen besteht. Pech wird durch die Destillation von kohlenstoffbasierten Materialien wie Pflanzen, Rohöl und Kohle hergestellt. Das Pech ist isotrop, kann aber durch den Einsatz von Wärmebehandlungen anisotrop gemacht werden“ laut ACS Omega 2020, 5, 34, 21948-21960.

Die Mikrostruktur der unschmelzbaren, anisotropen CF ist für beide Typen unterschiedlich. Pech-CF zeigen gegenüber PAN-CF z. B. ein Aufsplittern beim Brechen. Pech-CF sind nämlich nicht nur

mehrfach steifer als Standard-PAN-CF (diese *Faser hat Stahllevel*) sondern auch spröder. PAN-UHM-CF sind im Übergangsbereich einzuordnen.

WHO-Bewertung:

Transversal-isotrope CF haben eine höhere Festigkeit und deutlich höhere Steifigkeit als Glasfasern und Asbestfasern bei gleichzeitig etwas geringerem spezifischem Gewicht. CF weisen nur eine begrenzte thermische Stabilität auf. Bei Temperaturen oberhalb von 600 °C tritt unter atmosphärischen Bedingungen ein thermischer Abbau auf (*isotrope Glasfasern verschmelzen hingegen beim Brand*).



<https://www.r-g.de/wiki/index.php?cuid=179>

Fig. 2-10, Bruchmorphologie: (links) PAN-basierte CF, (rechts) Pech-basierte CF

Falls eine Faser nicht eingestuft ist, gibt es eine Verdachtseinstufung aus Gründen der Vorsorgepflicht, diese lautet Kategorie 1B. Orientierungshilfen für die Herstellung und Bearbeitung von CFK bieten Informationen der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung DGUV.

2.3 Pech-Carbonfasern (Pitch-CF)

WHO-Bewertung:

2.4 Glasfasern

($\rho \cong 2.6 \text{ g/cm}^3$, $9 \mu\text{m} < \varnothing < 15 \mu\text{m}$, $\epsilon_{\text{fracture}} \cong 4 \%$)

Eine Glasfaser ist eine aus Glas bestehende lange dünne, isotrope Faser: . Bei ihrer Herstellung werden aus einer Glasschmelze dünne Fäden gezogen. Da Glasfasern sehr kerbempfindlich sind, werden sie vor dem Verweben mit einer sogenannten Schlichte versehen. Diese Schlichte (z. B. eine Silanschlichte) dient beim Weben als Schmierstoff und wird nach dem Weben chemisch entfernt. Danach wird das sog. Finish auf die Glasfasern aufgetragen, das für die Verwendung in Faserverbundwerkstoffen als Haftvermittler zwischen den Glasfasern und dem Kunstharz wirkt. Finish wird auch als haftmittelhaltige Schlichte bezeichnet. Sie kann bis zu zwei Masseprozent ausmachen, liegt jedoch meist bei 0,3 bis 0,8 Prozent. [WIKI April 2023].

E-Glas:

WHO-Bewertung der Glasstoffe:

Glaswolle ist nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft krebserregend, wenn WHO-‘Fasern‘ darin sind. Deswegen wurde das Dämmmaterial Glaswolle zunächst als krebserregend eingestuft. Heutzutage wird Glaswolle allerdings so hergestellt, dass ein krebserregendes Potenzial weitgehend ausgeschlossen werden kann. Die in Textilglaswebereien eingesetzten Glasfasern fallen nicht unter das WHO-Kriterium der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 905. Textilglasfasern können jedoch bei der Verarbeitung zu Partikeln zerbrechen oder zersplittern, die einer WHO-‘Faser‘ entsprechen. Die BG/BGIA-Empfehlungen geben praxisgerechte Hinweise, wie durch Schutzmaßnahmen in Textilglaswebereien der Stand der Technik zu erreichen ist. Beim Verarbeiten von Glasfasern gibt es keinen Arbeitsplatzgrenzwert. GFK ist gesundheitlich völlig unbedenklich laut [].

2.5 Alkalibeständige Fasern für den Beton

AR- Glas, Aramidfaser Teijinconex®, Mitsubishi Carbonfaser HMT504
alkaliresistente (Alkaline-Resistant) Glasfaser, aufgrund von ZrO_2 -Beigabe, damit im möglichen basischen Milieu (pH-Wert > 7 . Sauer: pH < 7) die Korrosion der Faser vermieden wird.

WHO-Bewertung

2.6 Keramikfasern

WHO-Bewertung:

2.7 Basaltfaser

$\cong 2.5 \text{ g/cm}^3$, $5 < \text{Ø} < 24$, $\epsilon_{\text{fracture}} < 5 \%$ Zirkondioxidzusatz (ZnO_2) wegen Alkalibeständigkeit

„Eine Basaltfaser wird durch Pultrusion von vulkanischem Basalt-Gestein hergestellt, das in Hochöfen geschmolzen wird. Dabei wird die Faser, im Gegensatz zur Extrusion, stranggezogen zu einer Endlosfaser (aus https://de.wikipedia.org/wiki/Basaltfaser#cite_note-14).

Basaltfasern (BF) sind Filamentgarne, die aus einer flüssigen Basaltschmelze durch Schmelzspinnen erzeugt werden. Sie können auch zu Stapelfaser und Kurzfasern geschnitten werden. Basaltfasern gehören zu den Chemiefasern aus Naturstoffen anorganischen Ursprungs. Für die Herstellung von Filamenten sind nur Basaltgesteine mit einem Siliziumdioxidanteil größer als 46 % geeignet.

Die Herstellung der Basaltfilaments beginnt mit dem Zerkleinern des Rohbasalts in Bruchteile von 5 bis 40 mm, dem Abtrennen von metallischen und magnetischen Verunreinigungen durch Magnettrennung, dem Auswaschen von kleinen Einlagerungen (Staub u. a.) und dem Trocknen. Die so vorbereiteten Stücke werden durch einen Trichter, der über dem Schmelzofen montiert ist, diesem zugeführt und bei ca. 1450 °C geschmolzen. Über einen Fließspeiser, ein beheiztes Rohr, wird die flüssige, gelb-rot glühende Basaltschmelze in die Düsenwanne gepresst. Aus den Düsenlöchern heraus wird die Schmelze in dünnen Filamenten gezogen (pultrudiert). Das erfolgt

bei Temperaturen von ca. 1300 °C. Der Durchmesser der Filamente liegt im Bereich von 10 bis 20 µm, abhängig von dem Düsenlochdurchmesser und der Viskosität der Schmelze. Um eine bessere Verarbeitung zu gewährleisten und die Haftung zu Matrixsystem zu verbessern, wird eine spezielle Schlichte (auf Silan beruhend) auf die Basaltfilamente aufgetragen. Die ersponnenen Elementarfadenbündel können zu einem Garn gedreht werden, zu einem Roving zusammengefasst werden oder zu Kurzfasern geschnitten werden.

Basaltfasern sind nicht entflammbar. Sie verfügen über einen ausgezeichneten Wärmeleitwiderstand und elektrischen Widerstand. Außerdem besitzen sie einen hohen Schallabsorptionsgrad. Ihre chemische Beständigkeit gegenüber Säuren und organischen Lösungsmitteln ist gut. Ihre Empfindlichkeit im alkalischen Bereich ist gegenüber E-Glasfasern geringer. Die Zugfestigkeit von Basaltfasern liegt zwischen der von Glas- und Carbonfasern, bei günstigeren Herstellungskosten als letztere“.

WHO-Bewertung:

Endlos-Basaltfasern sind gesundheitlich unbedenklich, gute Zugfestigkeit (höher als von Glasfaser). Basalt ist ungiftig und inert, erzeugt weder Gas noch Rauch, UV-beständig, chemikalienbeständig und steril. Ausgezeichnete Wärme- und Schalldämmung, temperaturbeständig von - 260 °C bis 700 °C, Günstiger als Carbon, Kevlar® und Glasfaser.

2.8 Asbest'faser'

Asbest (asbestos, deutsch ‚unvergänglich‘) ist eine Sammelbezeichnung für verschiedene natürlich vorkommende, faserförmige kristallisierte Silikat-Mineralen mit Ø bis herab zu 2µm, die nach ihrer Aufbereitung technisch verwendbare Fasern unterschiedlicher Länge ergeben. Bei den Asbestfasern handelt es sich praktisch um Fäden (*analog 'Roving', der ja ein Einzelfaserbündel darstellt*), die aus einer Vielzahl parallel verlaufender einzelner 'Fibrillen' aufgebaut sind. Damit ist die Asbestfaser keine klassische Faser im Sinne einer Glas- oder Carbon-Faser. Fig.2-10 zeigt die unterschiedliche Struktur von einem Asbest'faser'komposit. und von Carbon-Filamenten. Asbest ist chemisch sehr beständig, unempfindlich gegen Hitze und nicht brennbar [WIKI 06.10.2022].

Der Aufbereitungsgrad des Asbestgesteinmaterials bestimmt Länge und Feinheit der technischen Fasern. Die Feinheit technischer Asbestfasern beträgt beispielsweise bei der Chrysotil-Asbest-Faser (Faden) zwischen 0.75 und 1.5 µm und bei der Krokydolith-Asbestfaser zwischen 1.5 und 4.0 µm. Die Durchmesser der Asbest-Filamente liegen für Chrysotil zwischen 0.02 und 0.04 µm und für Krokydolith zwischen 0.1 und 0.2 µm. Bei entsprechender Beanspruchung können also Wolken von Asbest-Filament-Bruchstücken entstehen.

Mittels Brechmaschinen werden die Rohasbeststücke zerkleinert und im nächsten Arbeitsprozeß die heraus gelöst. Dabei werden die gewünschten längeren vom Gesteinsstaub und den kürzeren 'Fasern' getrennt. Chrysotil, auch Weißasbest genannt, fand die technisch weitaus breiteste Anwendung, zum größten Teil als Armierungsfaser in Asbestzement.

WHO-Bewertung

Die technische Asbestfaserlänge im Gestein ist bis 300 mm, und nach der Aufbereitung verbleiben Längen zwischen 10 und 20 mm, mit Faserdurchmessern < 3 µm. Die Filamente und ihre Bruchstücke bilden also die WHO-Problematik. Asbestfasern sind nicht sichtbar, Symptome des Asbest-Einatmens zeigen sich erst nach vielen Jahren, wenn die Partikel zu einer Asbestose in der Lunge führen. Asbestfasern kommen in der Atemluft vor, im Schnitt ist die natürliche

Hintergrundbelastung rund 100 - 200 WHO-‘Fasern‘ / m³ Luft. Bei unsachgemäßem Bearbeiten können WHO-‘Fasern‘ in die Alveolen der Lunge gelangen und eine Asbestose auslösen.

Anorganische Stäube mit Faserbruchstücken WHO-kritischer Abmessungen werden nach der *Technischen Regel für Gefahrstoffe TRGS 521* eingeordnet. Einstufung nach TRGS, Kategorie 1A für krebserregende Stoffe (Asbest-Wirkung ist nachgewiesen beim Menschen) und damit eine Klasse höher als die Verdachtseinstufung bei CF.

Gemäß dem Risiko- und Maßnahmenkonzept der *TRGS 910* gelten am Arbeitsplatz derzeit folgende Konzentrationswerte für alle WHO-‘Fasern‘ bzw. Faser Objects FO:

Akzeptanzkonzentration 10000 WHO-FOs / m³, ‘Toleranz’konzentration 100000 WHO-FOs / m³.

Die Akzeptanzkonzentration gilt für eine tägliche Exposition über ein ganzes Arbeitsleben! Bei Konzentrationen unterhalb dieser Akzeptanzkonzentration besteht für die Beschäftigten ein niedriges Risiko.

Für Faserkonzentrationen, die über der Akzeptanzkonzentration liegen, muss der Arbeitgeber Schutzmaßnahmen ergreifen, um das Risiko für die Arbeitnehmer zu minimieren. Arbeitnehmer sollten diesen hohen Konzentrationen höchstens kurzzeitig mit entsprechenden Schutzmaßnahmen ausgesetzt sein. (**Hier sollte der Begriff Toleranzkonzentration richtig gestellt werden**)

‘Toleranz’konzentration → = Maximal erlaubter Konzentrationswert“

Bemerkung zum Begriff Toleranzkonzentration und Tolerance Limit: “In quality control, these are limiting values of a band between which measurements must lie if an article is to be acceptable. A tolerance limit is a measure used to ensure the quality of manufactured products.” Measurements are executed according to [Cun23]

For example, a WHO-fiber count of $n=10$ and an evaluated sample volume of 1 l would result in a concentration of 18391 WHO-fibers m⁻³ with 95% confidence. 69

Band limits: Band limits are defined based on the German national occupational safety limits for WHO-fibers, i.e. the “acceptance limit value” of 10⁴ m⁻³ and the “tolerance limits value” of 10⁵ m⁻³ (TRGS 517, 519, 910).|

To accurately determine these two concentrations within the 95% confidence interval based on less than a fiber count of $n = 1$, a specific total aerosol volume has to be evaluated, represented by an area on the filter, that “has seen” this volume. For 10⁴ m⁻³, the band limit between “low” and “moderate”, $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 = 0.5 \text{ l}$ has to be evaluated. For

Da statistische Begriffe benutzt werden, muß auch der Begriff „tolerance limit value“ im statistischen Sinn richtig verwendet werden. Toleranzgrenzen beschreiben eine Bandbreite und damit muss der Toleranzwert kleiner als der obige Akzeptanzwert sein, aber es ist leider 10⁵ > 10⁴! → Vorschlag für den Begriff „tolerance limit value“ den Begriff „Maximal erlaubter Konzentrationswert“ setzen.



Fig. 2-11: (links) Asbest’faser’komposit. Anthophyllite_asbestos_SEM.jpg (1024×1024) (wikimedia.org). (right) Roher brauner Asbeststein [Adobe Stock241745935]

Fig. 2-11 und Fig.2-12 dokumentieren, dass Asbest eigentlich keine Faser ist, sondern lediglich eine innere mikro-‘faserige‘ Struktur aufweist.

Wichtig für den Leser ist also den Unterschied zwischen dem Mineral Asbest und den CF zu beschreiben. Ein Asbestfaser-Stück ist hochspröde mineralisch, eine PAN-CF noch so flexibel, dass man die bekannte Knotenschleife noch recht weit zuziehen kann, bis zuletzt der Bruch eintritt. Selbst bei der noch spröderen UHM-Pech-CF ist eine Knotenschleife noch machbar, also ist mehr Biegsamkeit als bei der Asbest‘faser‘ gegeben, was essentiell für die Alveolen-Herausgängigkeit ist.



Fig. 2-12: Asbest‘faser‘ablagerungen auf einem Haar [rb ASBESTOS CONSULTANTS, 2023]

Dieses Bild führt zu der Frage: „Ist es sinnvoll, immer mehr feinere Staub-Filter zu installieren, wenn man damit den feinsten Partikeln die Möglichkeit nimmt, sich an größeren anzulagern?“

Fazit: Die oberen Abbildungen dokumentieren, dass Asbest eigentlich keine Faser ist, sondern lediglich eine innere mikro-‘faserige‘ Struktur aufweist.

2.9 Carbon-NanoTubes CNT (Stäube)

„Carbon-nanotubes sind kleine röhrenförmige Gebilde aus Kohlenstoff. Ähnlich den Fullerenen haben sie eine wabenförmige, netzartige Struktur aus Kohlenstoff-Sechsringen. Die Nanotubes können einwandig (Single-walled nanotubes = SWNT) oder mehrwandig (Multi-walled nanotubes = MWNT) vorkommen. Einwandig haben sie einen Durchmesser von ungefähr einem Nanometer nm, mehrwandig kann ihr Durchmesser bis zu 50 nm betragen. Nanotubes können eine Länge von Micrometern, Millimetern oder sogar Zentimetern als Röhrenbündel erreichen. Die Unterschiede in Länge und Durchmesser, sowie die Anzahl der Wände und ob die Röhren an den Enden geschlossen oder offen sind, haben erheblichen Einfluss auf ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften. Ihre Dichte liegt im Bereich von $\rho = 1,3 - 1,4 \text{ g/cm}^3$ und ist damit wesentlich geringer als die von Stahl mit $7,8 \text{ g/cm}^3$. Auch die Zugfestigkeit ist mit bis zu 63 GPa bei mehrwandigen Nanotubes deutlich größer als die von Stahl (2 GPa)“ (aus https://www.chemie-biologie.uni-siegen.de/ac/hjd/lehre/ss09/acii_seminar/carbonnanotubes).

Zu einem Größenvergleich kann der sog. Loschmidt'sche Luft- Moleküldurchmesser $\varnothing = 0,36 \text{ nm}$ für das Gas-Stoffgemisch Luft herangezogen werden.

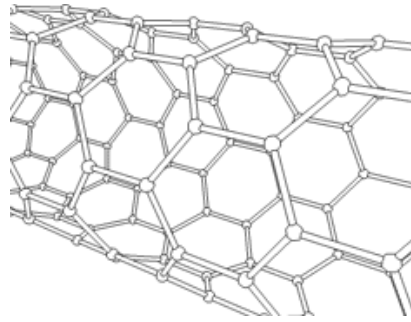


Fig.2-13: Scheme of a Single-walled carbon nanotube

WHO-Bewertung

Bei der Herstellung und Verarbeitung von CNT können lungengängige Feinstäube mit Partikelgrößen $\leq 5 \mu\text{m}$ entstehen. Ein Gesundheitsrisiko für den Menschen durch CNT-Stäube ist bei den meisten Arbeitsschritten gering, bei einigen jedoch existent, was es dann zu untersuchen gilt. [Abschlussarbeit im PGS Toxikologie der Universität Leipzig, Dr. Frank Nieber].

Multi-Walled Carbon Tubes MWCNT wirken, analog zur Asbestfaser Chrysotil A, stark entzündlich.

2.10 Composites oder matrix-eingebettete CF

For a better handling the carbon filaments in the rovings or the heavy tows have to be protected by an adequate sizing (*Beschlichtung* in German). This sizing can be kept or removed in the next production step of the structural part which is the impregnation by a resin system (*after curing this becomes the matrix*). The final part may get a coating (*Beschichtung* in German) for the operational use such as the carbon mats (*fiber grids*).

In consequence, always to apply the safety rules at the work place also for the matrix that embeds the CF.

In this context for completion, in general there are the following different types of composites to be considered:

- 1 Carbon-Fiber-Reinforced Polymer CFRP, thermo-set (epoxy) and thermo-plastic resin system
- 2 Reinforcement of Concrete by woven CFRP fiber grids and pultruded CFRP-bars & ropes
- 3 Reinforcement of Concrete by CFR mineral matrix fiber grids (*higher temperature possible*).

WHO-Bewertung

2.11 Polymerfaser

In **SMC** und im Beton werden Polymerfasern zwecks Verstärkung, Bewehrung verwendet

WHO-Bewertung

2.12 Matrices

EP:

TP:

Mörtel:

3 Exposition, Toxizität und Risiko bei CF-Fragmenten

3.1 Bruchstücke beim Bearbeiten während Herstellung und Bauteil-Recycling

Während der Bearbeitung und des Betriebs können durch mechanische Bearbeitung oder thermische Beanspruchung (Oxidation) der spröden CFK-Bauteile CF-Fragmente entstehen, die das WHO-Kriterium erfüllen. Dabei führt das besonders spröde Splitterbruchverhalten von Pech-CF zu einem Vielfachen solcher Fragmente, hat also höheres Freisetzungspotenzial. Sprödigkeit sagt hierbei vereinfacht aus, in welchem Maß sich ein Werkstoff plastisch verformen lässt, bis Mikrorisse entstehen.

CF sind üblicherweise in eine Matrix eingebettet. Wenn man solche CF-Composite-Bauteile schneiden muss, dann geht dies nur mit sehr schnell drehenden Sägen und Schleifscheiben. Bei langsam drehenden Werkzeugen splintern sonst die Bauteile auf. PAN-CF wenig ausgerichtete amorphe Struktur auf

Beim Sägen:

Ein mit Sägezähnen bestücktes Sägeblatt trennt das Material auf, indem es eine schmale Schnittfuge ausspant. Jeder einzelne Zahn nimmt schabend einen dünnen Span ab, der dann in der Zahnücke aus dem Werkstoff transportiert wird. Dieser Schneidvorgang beinhaltet einen räumlichen Spannungszustand, der neben der Druckbeanspruchung auch Zugbeanspruchungsstellen beinhaltet. **Vergleichende Ergebnisse??**

Beim Schleifen:

Schleifen ist im Gegensatz zum Drehen, Fräsen oder Sägen ein Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide. Schleifen ist eigentlich ein Mikrospanen. **Vergleichende Ergebnisse??**

Beim Drehen und Fräsen: Vergleichende Ergebnisse??

Beim Zugversuch:

Hier sind dem Autor bei PAN-CF keine WHO-Kriterium-zuordenbare Bruchstücke bekannt. Geplante Roving-Zug-Versuche der BAuA sollen hier Information bringen (*1 Roving beinhaltet viele Tausend Filamente, in der Regel $> 2k = 2000$*). **Ergebnisse??**

3.2 Exposition von Staub und WHO-’Fasern‘ am Arbeitsplatz

Um eine Exposition mit WHO-Carbon’Fasern‘ messen und dann beurteilen zu können, muss eine Exposition quantitativ beschrieben werden können. Dies geschieht für die Mikro-Faserstäube mit der Einheit ‘Fasern‘/m³, hier richtig mit CFWHO/m³, welche die sogenannte (Mikro)-Faserkonzentration beschreibt.

Folgt man der **DGVU**, dann gilt für WHO-Carbon’Fasern‘ eine Akzeptanzkonzentration von 50000 FWHO/m³ und eine sog. Toleranzkonzentration von 250000 FWHO/m³. Diese Werte liegen dem risikobezogenen Maßnahmenkonzept der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) zugrunde (TRGS 910). Oberhalb des sogenannten Toleranzkonzentration-Niveaus wird – vorbeugend, im Sinne der Vorsorgepflicht - ein hohes **Risiko.gesehen** (angenommen doch wohl) bei dem Maßnahmen verpflichtend sind und schnellstmöglich umgesetzt werden müssen.

Die aktuellsten Ergebnisse zur Exposition von CF-WHO-’fasern‘ werden durch das Projekt CarboBreak, siehe [*Annex CarboBreak*], bereitgestellt (am 30.06.2022 ausgelaufen). Zusätzlich zu den Splitterbruchttests wurden im CarboBreak-Projekt Arbeitsplatzmessungen für reale Bearbeitungsszenarios durchgeführt.

Nur wenn eine hinreichend hohe Menge an CF-WHO-‘fasern‘ entsteht, ist Gefährdungspotenzial gegeben. Aus diesem Grund muss man mit guter Absaugung/Entlüftung arbeiten – da die notwendigen schnell rotierenden Sägen immer sehr feinen Staub erzeugen.

3.3 Toxizität (toxicity)

Neben der Expositionserfassung gilt es zu untersuchen, welche toxikologische Wirkung CF-WHO-‘fasern‘ entfalten können, um eine mögliche Gefährdung des Menschen zu beurteilen. Folglich müssen für die Gefährdung von Menschen Exposition und Toxizität zusammen betrachtet werden.

Da CF steif sind und nicht löslich, was ein starkes Indiz für eine hohe Bio-Unlöslichkeit darstellt, besteht automatisch die Verdachtseinstufung einer kanzerogenen Wirkung, einzuordnen nach TRGS 905 mit bereits erwähnter Kategorie 1B.

Dies ist zu prüfen. Wichtig dabei ist, dass die Studien – und noch weiter zu klärende neue Studien - auch wirklich WHO-Faserpartikel als Untersuchungsgröße haben.

Ergebnisse in [Obe28] zeigen, dass die Verweildauer der CF-Mikropartikel in den Lungenbläschen stark von der Partikellänge abhängt. „Für eine Länge > 20 µm waren nach ca. 100 Tagen die Hälfte dieser nicht bio-löslichen Fasern *abgebaut* entsorgt (*nicht bio-löslich abgebaut, wie m.E. leider fälschlich im Obe28-Text steht*)“. Hier kommt also die Makrophagenlebensdauer von mehreren Wochen ins Spiel. In seiner Analyse [28] spricht Oberdörster, dass für unlösliche CF eigentlich eine längere sog. Halbwertszeit zu erwarten wäre. Als Ursache wird Faserbruch vermutet (*eine Erklärung wäre zu suchen*), der zu noch kleineren Partikeln führte, die von dem Organismus leichter und schneller entfernt werden können, was das schnellere Entsorgen erklärt. Er betrachtet deswegen das Verhalten der CF-WHO-‘fasern‘ wie das eines Fasermaterials geringer Toxizität.

Vermutung des Autors: CF-Bruchstücke sind sehr biegesteif und lassen sich nicht durch mögliche Biegespannungen in den Fresszellen brechen. Könnten diese CF-WHO-‘fasern‘ einer bestimmten WHO-Größe nicht nur leicht feste Koagulationen aus kleineren Bruchstücken gewesen sein, die natürlich zerbrechen können?

3.4 Risiko (risk)

$$\text{Risk} = \text{Severity of the 'failure' event} \cdot \text{Probability of occurrence} = S \cdot P$$

Schweregrad (severity) des "Versagens" (Gefährdung): Dieser wird durch die gegebene Exposition und den Grad der Toxizität aufgebaut. Um eine mögliche Gefährdung beurteilen zu können, müssen Exposition und Toxizität gemeinsam betrachtet werden. Die Exposition ist mit dem Lebenszyklus des Bauteils von der Wiege bis zur Bahre verbunden. (Zur Info: In der Technik wird oft eine Ausfallwahrscheinlichkeit von etwa $p_f < 1 \cdot 10^{-7}$ für die Konstruktionssicherheit akzeptiert, d.h. 1 Element von 1 Million ähnlicher und gleich belasteter Elemente fällt aus).

Eintrittswahrscheinlichkeit: Maß für die Wahrscheinlichkeit (das Risiko), dass ein Ereignis eintritt, im Allgemeinen ausgedrückt auf der Skala von 0% bis 100%. Null bedeutet, dass ein Ereignis mit Sicherheit nicht eintritt und 100 %, dass es sicher ist, dass es eintritt.

Risiko-Matrix: Es ist selten möglich, das Risiko mit einer quantitativen Wahrscheinlichkeit nachzuweisen. Qualitative Informationen sind aber bereits wertvoll, um sinnvolle Ideen und Maßnahmen in Gang setzen zu können. Ein Vorschlag des Autors folgt später in Tabelle 3.

3.5 Auftretenshäufigkeit of WHO-critical particle sizes

$$\text{Risiko} = \text{Gefährdungspotenzial (hazard potential)} \cdot \text{Auftretenshäufigkeit (occurrence-frequency)}.$$

Gefährdungspotenzial ist Exposition kombiniert mit Toxizität.

$$\text{WHO-Carbon 'fasern'} \equiv \text{CF-WHO-(size) Partikeln.}$$

Essentiell ist dabei die Dauer der Exposition in Bezug auf Menge und die mögliche Auftretenshäufigkeit des Ereignisses pro Zeiteinheit:

- * Industriell in Gebäuden, gemäß verpflichtender Schutzausrüstung: in 1 vollen Jahr, maximal
- * Rettungseinsatzkräfte, im Freien praktisch mit Schutzausrüstung): in Stunden / Jahr.

Eine besondere Gefährdung von Rettungskräften bei Einsätzen ist damit wohl nicht herzuleiten im Sinne der einzuhaltenden Schutzmaßnahmen.

Gedanken zum Zeiteinfluß konnte der Autor nur bei [Ries und Mattenklott] finden.

3.6 Ermittlung der Schweregrads (severity) S

In a distinct specific scenario at first the Hazard Potential HP (involves the particle description including the WHO-size, bio-dissolution and stiffness) and then the Exposure Potential EP (involves WHO-fiber concentration, dustiness, and ..) are investigated. HP basically regards toxicity. HP and EP depend on the protective measures with its controls.

As general consensus for the Severity S a Product-model is usually applied, reading $S = HP \cdot EP$.

The level of workplace exposure is determined by EP and the protective measures used. For this purpose, the table below is used, which applies the so-called "control banding" approach. Control banding is a qualitative or semi-quantitative risk assessment and management approach to minimize worker exposures to hazardous particles at work. The greater the potential for harm, the greater the degree of control needed to manage the situation and make the risk "acceptable." []

(Der Control-Banding-Ansatz ist ein Modellansatz, bei dem die zu erwartende Konzentration eines Stoffes in der Luft abgeleitet wird und diese Luftkonzentration mit geeigneten Schutzmaßnahmen verknüpft wird).

Table 1: Matrix for WHO- 'fiber' concentration [Wagterveld]

Table 7.11: WHO-fiber concentration

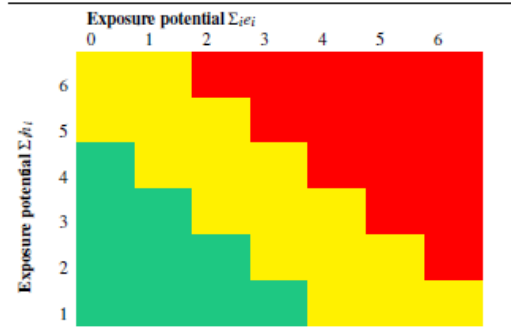
Descriptor: Average number concentration (B_{WHO}) extrapolated from fiber counting on aerosol samples collected during fluidizer dustiness test.

Hazard banding								
Parameter		Band and scores						
Length	h_1	Short	0	Medium	1	Long	2	
Rigidity	h_2	Flexible	0			Rigid	1	
Water solubility	h_3	Soluble	0			Insoluble	1	
Bio-dissolution	h_4	Low	0	Moderate	1	High	2	
Cumulative Score	$\sum_i h_i$	0	1	2	3	4	5	6
Exposure banding								
Dustiness	e_1	Low	0	Moderate	1	High	2	
Grade of Agglomeration	e_2	Low	0	Moderate	1	High	2	
WHO-fiber Concentration	e_3	Low	0	Moderate	1	High	2	
Cumulative Score	$\sum_i e_i$	0	1	2	3	4	5	6

In the Table 2- matrix, the HP is listed horizontally in selected 6 stages and on the vertical the EP in 6 steps, too (vice versa, as at least the author is used to). Into this matrix the HP and EP numbers of the scenario are inserted.

Table 2: Matrix for Risk Banding [Wagterveld]

Table 7.12.: Matrix for risk banding. Green: Acceptable risk potential; Yellow: Increased risk potential; Red: Inacceptable risk potential.



The author believes that *Table 2* cannot take the occurrence frequency sufficiently well into account, like *Table 3* does. *This requires discussion.*

3.7 Schema zur Bewertung des menschlichen Risikos mit Risikotabellen-Vorschlag

Technische Anwendungen verlangen, dass man bei Risikobetrachtungen nicht nur auf etwaiges Gefährdungspotenzial schaut sondern auch auf die Auftretenshäufigkeit eingedenk „A toxic material cannot cause effects if there is no exposure“.

$$\text{Risiko} = \text{Gefährdungspotenzial } S \cdot \text{Auftretenshäufigkeit } OF = S \cdot OF.$$

Letztlich von Interesse ist also eine Meßgröße für das Risiko, die es erlaubt, die unterschiedlichen Ereignisse qualitativ bewerten zu können. Dazu läßt sich eine **Risikobewertungstabelle** aufstellen, z. B. analog zur Raumfahrt. Im Bauwesen gibt es übrigens im Rahmen des *Sicherheitskonzepts nach DIN EN 1990: 2010-12* eine analoge Vorgehensweise.

Eine solche Tabelle erlaubt - durch Fachpersonal - eine Einordnung von Schätzungen zur Gefährdung *S* und zur Auftretenshäufigkeit *OF* (da *OF* *wahrscheinlichkeit-gebunden* ist, steht für *OF* oft der Buchstabe *P* für *Probability*). Parameter der Vorgehensweise sind hierbei:

- * Biobeständigkeit-gekoppeltes Gefährdungspotenzial:
 - Staub: Agglomerationsgrad berücksichtigende Partikel-Staubmenge mit kritischer Morphologie von sich anreichernden und damit größer werdenden Partikeln die < WHO-Ø-Größe werden können)
 - CF-WHO-Partikel
- * Anzuwendende Schutzmaßnahmen,
- * Häufigkeit des Ereignisses.

“**Risk matrices** are preferred tools for risk assessment [*Wagterveld*], because they visualize risk. The purpose of such a risk matrix is to predict the risk associated with a specific scenario based on the probability, likelihood or frequency of a dangerous event and its severity, impact or consequences”. Probability and severity are represented by rows or columns.

→Ein letztes Risiko muss die Gemeinschaft immer akzeptieren, sonst wird jede Entwicklung gestoppt. Es ist die Aufgabe, diesem letzten Risiko einen akzeptablen Wert zu geben. Hier ist diese Aufgabe, dies im Rahmen aller mechanisch bearbeiteten Konstruktionswerkstoffe zu betrachten. Für all diese Werkstoff brauchen wir einen Maßstab.

Table 3, Risk Matrix: Idea of a Risk Assessment Scheme considering the frequency of occurrence, OF.
The author has adopted the presented risk assessment model from his space application

		Severity				
		negligible	minor	major	fatal	catastrophic
Occurrence Frequency		1	2	4	8	16
very improbable	1					
improbable	2					
less improbable	4					
probable	8					
very probable	16					

Fazit:

Zeit, Dauer können mit vorstehender Risikobewertungstabelle (Matrix) klarer berücksichtigt werden.

**Es kann bekanntlich nie 100% Sicherheit geben!
Man muß also ein gut basiertes, verantwortungsbewußtes Restrisiko wählen.**

4 Versagensmechanismen mit Suche eines aufsplitterung-kennzeichnenden Parameters

Es gibt 3 offizielle Niveaus auf denen Versagen passiert nämlich Nano, Micro and Macro (> 1 mm) und Bruchstücke erzeugt werden. Für ein tieferes Verständnis der gesamten Aufsplitterungsmechanismen der CF sollen einige Informationen aus der Literatur hinzugefügt werden.

Die Kohlenstoffatome in den CF sind in mikroskopisch kleinen Kristallen miteinander verbunden, die mehr oder weniger parallel zur Längsachse der Faser ausgerichtet sind. Diese kristalline Ausrichtung sorgt für hohe Festigkeit und Steifigkeit der CF, s.a. *Fig.6-4*. Der Aufbau der CF ist verwandt zu dem einer Graphitfaser. Dieser besteht aus flachen Schichten von Kohlenstoffatomen (Graphen), die einem regelmäßigen hexagonalen Muster folgen, und die unterschiedlich verbunden sind.

Angesprochen sind im Folgenden Mikro und Nano-Niveau. Um die Faserfragmentbildung einfacher abschätzen zu können soll nach Parametern gesucht werden, die auf das Auftreten von CF-WHO-‘Fasern‘ testdatenbasiert hinweisen.

4.1 Versagensmechanismen von Fasern, Matrices und Verbundwerkstoffen verstehen

Im Folgenden ein paar Beispiele, ob CF-Aufsplitterungsgefahr besteht. Die Aufsplitterungsgefahr hängt mit dem Spannungszustand $\{\sigma\}$ zusammen, ob dieser einachsig oder mehrachsig ist.

4.1.1 Nano-Untersuchung einer PAN-CF unter Druckkraft, 1D

Strukturbauteile aus PAN-basiertem CFK und CF-Beton sind optimal für Zugbelastungen, allerdings ist zumindest durch Biegung auch die ungünstigere stabilitätsabhängige Druckbelastung betroffen. Makromechanisches Versagen wird zumeist mikromechanisch initiiert.

Das folgende Versagens-Rechenbeispiel betrachtet - niveau-niedriger - einen mikroknickgefährdeten Stapel unvollkommener Graphenschichten, die die Nanostruktur der Kohlenstoffkristallite bilden, Studie [Todt10]. In dieser Studie wurde eine Nano-FE-Analyse dieses "Kristallit-Knickens" durchgeführt, das aus mehreren ebenen Graphenschichten besteht, wobei ein relativ einfaches Plattenmodell verwendet wurde. Die Nano-Knickgrenze wurde durch die sogenannte Inter-Layer-Bindung als Versagensgrenze kontrolliert. Das FE-Modell, s. *Fig.4-1*, basiert auf einem hybriden kontinuumsmechanik-diskreten atomistischen Ansatz. Die Schichten werden mit linearen Schalenelementen der Dicke $t = 0,066$ nm, dem Elastizitätsmodul $E = 5500$ GPa und einer Poisson-Zahl von $\mu = 0,19$ (aus Molekulardynamikrechnung) diskretisiert.

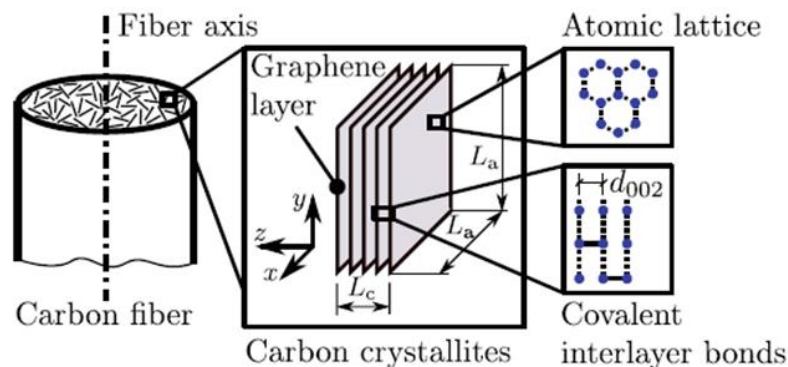


Fig.4-1: Nanostructure of a PAN-CF [Todt10] Faser-Typ-Aangabe fehlt??

4.1.2 Uni-axialer CFK-Faserstrang (Roving) unter Zug, 1D

Ähnlich wie bei einer Druckkraft hängt das erzielbare Belastungsniveau von der Güte einer geraden Roving-Ausrichtung ab und zusätzlich von den Ungängen (flaws) der Herstellung. Das lokale Knicken führt zu einer Art Aufsplitterung der Schichten eines Laminats beim finalen Bruchgeschehen, s.a [Fig.??](#).

(Eine Matrixbruchdehnung > 6% hilft übrigens die Schädigungsauswirkung der Fertigungsungängen abzufangen).

Fazit aus diesem Einzelfaser-Druck-Versuch:

* Hier ist modellbezogen ein Delaminieren der PAN-CF zu erwarten ????

4.1.3 Druckbruch CFK unter Quetschspannung, 3D-Problem

Quetschen einer CFK-Schicht,

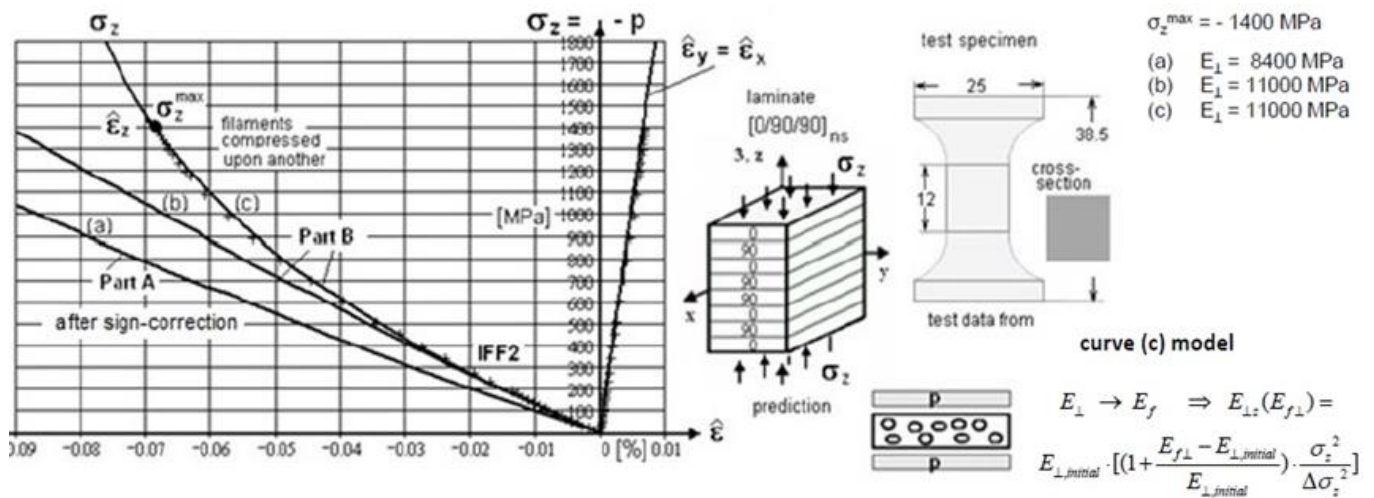


Fig.4-2: Abbildung der Testdaten bei einem senkrechten Quetschversuch. TC 13, WWFE-II, TC12, UD, CFRP, IM7/8551-7, cross-ply [0/90/0/90]ns, balanced-symmetric, PAN-CF

Fazit aus diesem Strukturanwendungsbeispiel

* Die Einzelfasern werden vor dem finalen Quetschbruch zwar zusammengedrückt. Es besteht aber keine Aufsplitterungsgefahr.

4.1.4 Abrasion von PAN-CFK und Pech-CFK

Kehren et al. Haben in *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 2185–2195, 2019 das Aufsplitterungs-Problem bei einer CF unter mechanischer Beanspruchung untersucht. Sie berichten: „Das Risiko der Freisetzung von lungengängigem Faserstaub muss sowohl in Bezug auf Kohlefasermaterialien als auch auf Handhabungsprozesse bewertet werden. Wir präsentieren eine Analyse der Faserkonzentrationen, die bei der mechanischen Bearbeitung von kohlenstofffaserverstärkten Polymeren an zwei verschiedenen Arbeitsplätzen freigesetzt werden, zusammen mit Messungen aus der Abriebprüfung in einem geschlossenen Laboraufbau mit inhärenter Massenprobenanalyse. Bei Arbeitsplatzmessungen der Bearbeitung von Polymerverbundwerkstoffen, die mit pitchbasierten Carbonfasern verstärkt wurden, wurden Konzentrationen von 830.000 WHO-Fasern m⁻³ 15 cm von der Quelle und von 33.000 WHO-Fasern /m³ in etwa 3 m Entfernung beobachtet. Eine Erklärung für eine derart hohe Freisetzungseigung für lungengängige Fasern mit Durchmessern unter 3 µm ist eine

Faserspaltung entlang der Achse des untersuchten Fasertyps. Vergleichende Abriebversuche von Pitch- und Polyacrylnitril-basierten kohlenstofffaserverstärkten Polymerverbundwerkstoffen zeigten, dass sich ihr Bruchverhalten von anderen unterscheidet. Die untersuchten Carbonfasern auf Polyacrylnitrilbasis brachen hauptsächlich senkrecht zu ihrer Achse, während die untersuchten Carbonfasern auf Pechbasis Faserspleißen und -spalten entlang der Faserachse zeigen. Um die gesundheitlichen Risiken der großen Vielfalt der vorhandenen Carbonfasermaterialien vorherzusagen und zu managen, muss das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Fasermikrostruktur, Bruchmorphologie und WHO-Faserfreisetzungseignung dringend verbessert werden. In der Zwischenzeit müssen alle Handhabungs- und Verarbeitungsschritte von pechbasierten Carbonfasern durch vorsorgliche oder expositionsmessgesteuerte Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz der Mitarbeiter abgedeckt werden“.

Fig.4-3 zeigt die sehr unterschiedliche Bruchoberflächenmorphologie von PAN-CF (A, C) und Pech-CF (B, D).

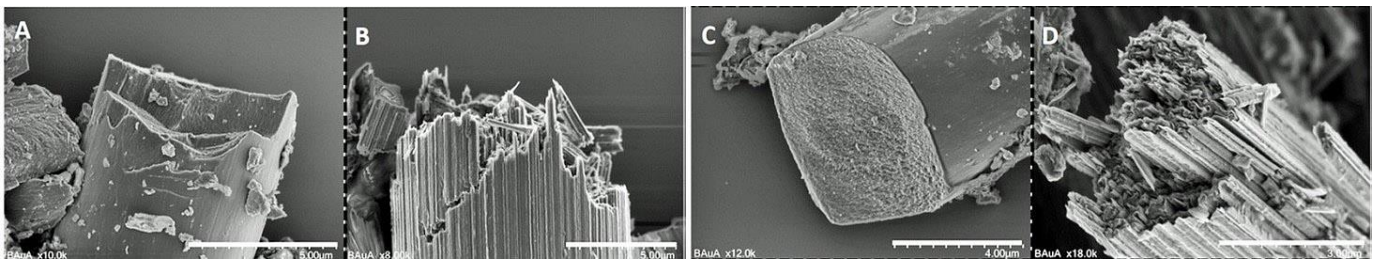


Fig. 4-3: Edge of the fracture of CF for (A) PAN-CF and (B) Pitch-CF; Internal microstructure of (C) PAN-CF and (D) Pitch-CF; CF fragments generated in the abrasion experiments (E) PAN-CFRP let assume fracture perpendicular to the fiber axis

Untersuchung auf Splitter:

Gemahlene CF werden in Isopropanol suspendiert, verdünnt und auf einen Kernporenfilter gezogen. REM-Bilder werden automatisch an zufälligen Stellen auf dem Filter aufgenommen. Alle Objekte auf diesen Bildern werden hinsichtlich ihrer Länge, ihres Durchmessers und anderer morphologischer Parameter analysiert.

Fazit

** Bei dem Pech-CF (Teilbilder B und D) ist eine deutliche Aufsplitterung zu sehen.*

4.2 Ideen und zugehörige Versuche zur CF-Aufsplitterung sowie Testdaten-Auswertung

In CarboBreak wurde ein Zusammenhang zwischen der Aufsplitterung und der Dichte festgestellt. Dichte ist allerdings keine physikalische Eigenschaft im Sinne von einer Verformungsarbeit, Dehnbarkeit oder Sprödigkeit. Die vom Autor dazu im Folgenden angedachten Versuche sollen in physikalischem Sinn das Aufsplitterungsverhalten erfassen und sollen bei der Charakterisierung der Bruch-Morphologie helfen. Die betrachteten CFs sind in Tabelle 4-1 aufgeführt (ein paar Ø fehlen noch).

* Roving-**Zug**versuche: (Filamentbündel)

Modell, das dem Autor die Unterschiede für im Netz erhältliche CF-Daten bereits sehr schön aufgezeigt hat! Die Aussage wird belastbarer, wenn die CarboBreak-untersuchten CFs dazu

kommen und deren Kristallstruktur nebst REM-Aufnahmen der Bruchfläche vergleichend angesehen werden können

- * **Sprödbbruch**-Versuche an Einzelfasern (Filaments): Bruchmechanische Auswertung
- * Preiswerte ‚Knotentests‘ (*haben wir bei MAN bereits in den Siebzigern gemacht*) als Roving-**Biege**-versuch.

4.2.1 Parameter Zug-Dehnungsarbeit: Roving-Zugversuch (Filamentbündel)

Zunächst wird angenommen, dass die Zugbruchenergie einen Hinweis auf die Unterscheidung des Aufsplitterungsrisikos gibt. Die mechanische Formel für diesen Parameter ergibt sich aus der Zugdehnungsenergie bei Bruchdehnung und ist proportional zu $\sigma \cdot \varepsilon = E \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon \Rightarrow E \cdot \varepsilon_{\text{fracture}}^2$.

Für die steifen CF darf Linearität angenommen werden, so dass $\sigma = E \cdot \varepsilon$ (s. a. Fig.4-4)

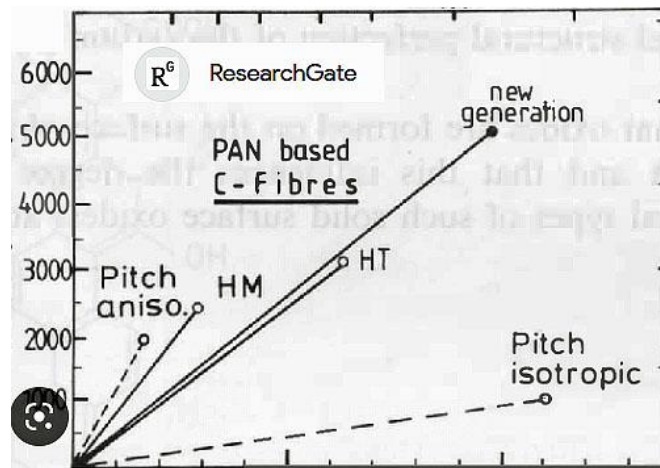


Fig. 4-4: Spannungs-Dehnungskurven von PAN-CF und Pech-CF [Research Gate, Autor ?]

Wie allerdings die Daten in den erhältlichen Firmentabellen anzeigen, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den angegebenen Werten. Da die angegebenen Zugfestigkeitswerte repräsentativer für die einzelne Faser sind, was man auch an den angegebenen ungenauen Bruchdehnungswerten erkennen kann,

$$\sigma \cdot \varepsilon = \sigma \cdot \sigma / E \Rightarrow \sigma_{\text{fracture}}^2 / E.$$

In der folgenden Tabelle wird die Formel auf Faserwerte angewendet, die in Datenblättern und in CarboBreak zu finden sind. Die Daten werden in 3 Gruppen geordnet: (1) PAN-CF (HT, HM, IM), (2) PAN-CF (UHM) und (3) Pech-CF.

Bei diesen 3 Gruppen sind folgender chemischer und mikrostruktureller Aufbau vorhanden:

Es darf angenommen werden, falls die Dichte ein Indikator ist, dass die PAN-CF-UHM verwandt zu den Pech-CF in ihrem strukturellen Aufbau werden. Ob sie wirklich so aufsplittern können, ist zu klären über den wohl verantwortlichen Grafitierungsgrad.

Fig.4-5 fasst die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen zusammen. Dabei sind unter dem Bild einige Ausreißer angegeben, die es zu untersuchen gilt.

Tabelle 4-1: Liste der Precursor PAN und Pech und ausgewählte CF-Typen

	Carbo Break- Bezug	Fiber <i>HT, IM, HM</i>	Pan k	ρ g/cm ³	R_r MPa	E_r GPa	$\epsilon_{fracture}$ %	\varnothing μm
Hexel		AS4		1.78	4000	235	1.6	
Hexel		IM 6		1.74	4880	296	1.73	
Hexel		IM 7		1.77	5300	276	1.81	
Toray		T300		1.76	3530	230	1.5	
Toray		T800H		1.81	5490	294	1.9	
Toray		T1000G		1.80	6370	294	2.1	
Toray		T700		1.82	4800	230	2.1	
BASF US		G40-700		1.77	4960	300	1.65	
Amoco US		T300		1.75	3530	230	1.5	
Tenax	1, 2	HTS 40	12	1.77	4400	240	1.8	7.0
Tenax	4a	UMS 40	24	1.79	4500	390	1.1	4.8
Tenax	5	IMS	24	1.77	6000	290	2.1	5.0
Sigrafil	8	CT50-4,0/240	50	1.77	4000	240	1.7	7.0
Sigrafil		CT50-4,9/235	50		4900	235	2.0	
Tenax	3	HTA40 E13	6		3950	238	1.7	7.0
		UHM						
Hexel		UHMS		1.87	3447	441	0.81	
BASF US		GY80		1.96	1860	572	0.32	
Toray		M4GJ		1.84	4210	436	1.0	
Toray		M60J		1.94	3920	588	0.70	
Toray		M55J		1.93	3920	540	0.70	
Tenax	15	UMS55	12	1.91	4000	550	0.7	4.4
Toray		M40		1.81	2740	392	0.6	
			Pitch					
Nippon Graph.		XN-15-30S	3	1.85	2400	155	1.5	
Amoco US		P55		2.0	1730	379	0.50	
Amoco US		P75		2.0	2070	517	0.40	
Amoco US		P100		2.15	2240	724	0.31	
Mitsubishi	10	K13D2U	2	2.2	3700	935	0.4	11
Mitsubishi	11	K63712	12	2.11	2600	640	0.5	11
Granoc	14	NGF	6	2.1	3900	520	0.7	7.0
Mitsubishi		YSH-70H-A2S	12	2.14	3630	720	0.5	7.0
Mitsubishi		YSH-60A-A2S	12	2.12	3600	630	0.5	7.0
Mitsubishi		YSH-90A-60S	6	2.18	3530	880	0.3	7.0
Mitsubishi		YSH-80A-60S	6	2.17	3630	785	0.5	7.0
Mitsubishi		XN-80-A2S	12	2.17	3430	780	0.5	10.0
Mitsubishi		XN-60-60S	12	2.12	3430	620	0.6	10.0
Mitsubishi		XN-05-30S	3	1.65	1100	54	2.0	10.0

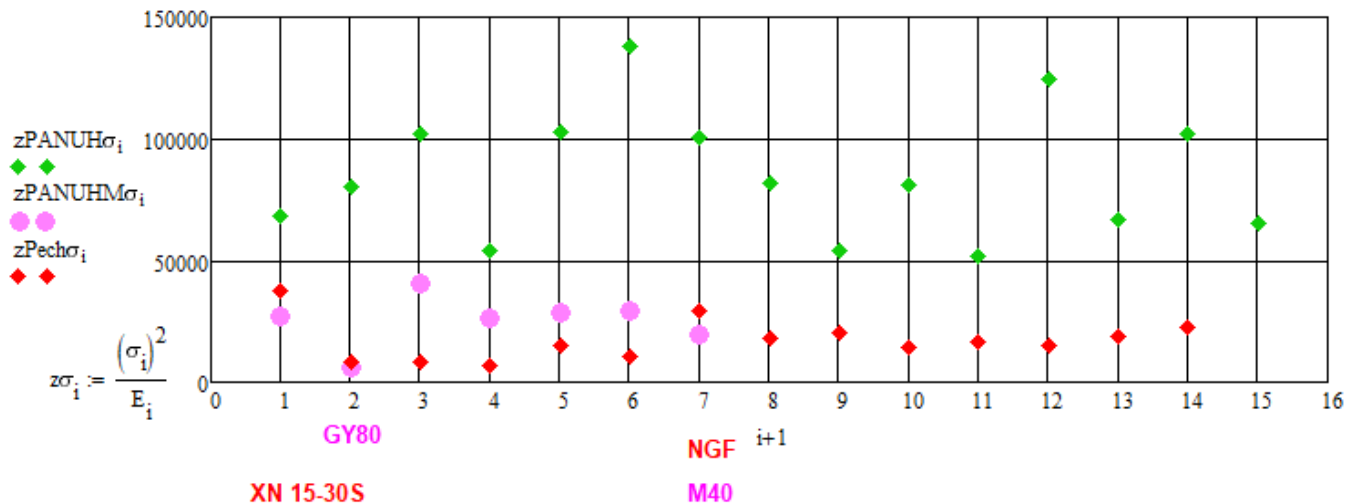


Fig.4-5: Parameter 'Zugdehnungsarbeit'. CarboBreak-CFs könnte man noch zu kennzeichnen

Fazit:

- Die Dichte ρ kann einen zufälligen Parameter (schon wegen der speziellen Firmenrezepturen) darstellen, Dichte sagt aber nichts zu innerer Werkstoffstruktur, welche das Aufsplittern bestimmt
- Wie vermutet kommen für Standard-Pech-CF sehr niedrige Werte heraus und für Standard-PAN-HM-CF (<380 GPa) hohe Werte. Annahme: Je größer der Parameter-Wert, desto kleiner die Splittergefahr
- Bei den steifen PAN-UHM-CF (> 380 GPa) kommt man in die Nähe des Pech-CF-Bereichs. Hohe grafitisierungsgebundene Steifigkeit hat also negativen Einfluß → schafft gleichzeitig Sprödigkeit als Basis für das Aufsplittern oder Aufspleißen
- Je höher die Steifigkeit, desto mehr die Tendenz zum Absinken des Parameter-Wertes. Dies zeigt an, dass außer der Steifigkeit die Sprödigkeit noch einen Parameter liefern könnte
- Bei einigen außerhalb liegenden Werten muss überprüft werden, ob bei diesen besonderen Typen eine andere Kristallstruktur oder etwas anderes Unterschiedliches vorliegt, bevor man weitere Erklärungen zu machen versucht. Dieses sind insgesamt zwei UHM-CF-Typen und zwei Pech-CF-Typen, für die folgende Erkenntnisse gesammelt werden konnten.
- Es empfiehlt sich also im Sinne der Rechnung in 4.1.1 für beide Typen eine mikromechanische Rechnung zu machen, die die beiden Kristallstrukturen gut modelliert
- Ob Schubbeanspruchung für ein WHO-Faser-Zerbrechen in den Makrophagen wesentlich für ein Zerbrechen (ein Fall wird in der Literatur vermutet) sein kann, ist nicht wahrscheinlich.

In the context above it is good to know from [Ver17. How is Carbon Fiber made?]: “CF can be classified into categories, based on modulus, strength, and final heat treatment temperature. All precursors are organic polymers, characterized by long strings of molecules bound together by carbon atoms. The exact composition of each precursor varies from one company to another and is generally considered a trade secret. During the manufacturing process, a variety of gases and liquids are used. Some of these materials are designed to react with the fiber to achieve a specific effect”.

4.2.2 Parameter Bruchzähigkeit: Sprödbbruch-Zugversuch an gekerbter Einzelfaser (= Filament)

Unterschiedliche Bruchzähigkeitswerte kennzeichnen unterschiedliche Aufsplittungsgefahr. Das Aufsuchen eines bruchmechanischen Modells, das die Bruchzähigkeit einer CF abschätzen lässt, könnte für die qualitative Unterscheidung der Fasertypen wesentlich sein.

Die Bruchzähigkeit oder Risszähigkeit (auch Risswiderstand), beschreibt in der Bruchmechanik den Widerstand eines Materials gegen instabilen Rissfortschritt. Der zugehörige Werkstoffkennwert ist für Zug der sogenannte *kritische* Spannungsintensitätsfaktor (SIF) K_{Ic} (= Bruchzähigkeit), bei dem der instabile Rissfortschritt einsetzt $K_{Ic} = \sigma_{\text{fracture}} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \cdot Y$. Dabei berücksichtigt der sogenannte Geometriefaktor Y , dass der SIF-Wert theoretisch nur bei unendlich großen Platten unabhängig von den Abmessungen des Probekörpers ist. Also muss für den vorgesehenen Probekörper ‘Angekerbte Einzelfaser’ die entsprechende Funktion aufgesucht werden. Dies war möglich durch das Manual „NASGRO Reference Manual Version 9.01 Final; December 2018. Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software”.

Bruchmechanik-Modellannahmen:

- Sehr spröder Werkstoff
- Das in der NASGRO-Unterlage angegebene ‘Model für einen Vollzylinder’ ist anwendbar, obwohl die anzuwendende Hohlzylinder-Tabelle für den sogenannten Geometriefaktor F_0 (*dort genannt*) des zu betrachtenden Risses den Endwert $0.5 \cdot \emptyset / t = 0$ nicht enthält. Laut Erfahrung ist der Einfluß gering
- Das Modell ist nicht nur im *mm*-Bereich sondern auch im μm -Bereich anwendbar
- Die Rißlänge errechnet sich aufgrund der Laser-Kerbtiefe
- Die anliegende Spannung σ_{fracture} an den Faserenden ist Bruchzugkraft / Fläche.

Aus dem Standardwerk NASGRO ist die sogenannte Geometriegröße Y des betrachteten Zug-Probekörpers ‘Angekerbte Einzelfaser‘ wie folgt zu ermitteln:

- * Beispiel-Fall liegt in SC07 vor (dort wird Y benannt als F_0 und $\sigma_{fracture}$ als S_0)).
- * Rißtiefe a ist gegeben durch die Laserstrahl-Kerbung
- * Durchmesser $D = \varnothing$, z. B. 0.007 mm
- * Formparameter c ist laut *Fig. 4-4* geometrisch gegeben. Annahme dazu: Der vom Laserstrahl geschnittene Querschnitt kann auf die elliptische Form eines typischen Risses SC 07 übertragen werden. Der Unterschied der Fläche wird, da für alle Fasern gleich, vernachlässigt
- * Table C15: Für $R/t = 0$ also einen Vollzylinder mit $R = 0$ ($t = \text{Wanddicke} = R$), ungefähr zu erwarten $a/t \approx 0.3 \rightarrow c/t = 0.35 \rightarrow Y \approx 1.6$.

(Dr. Barbara Güttler, IVW Kaiserslautern, würde sich darum kümmern.)

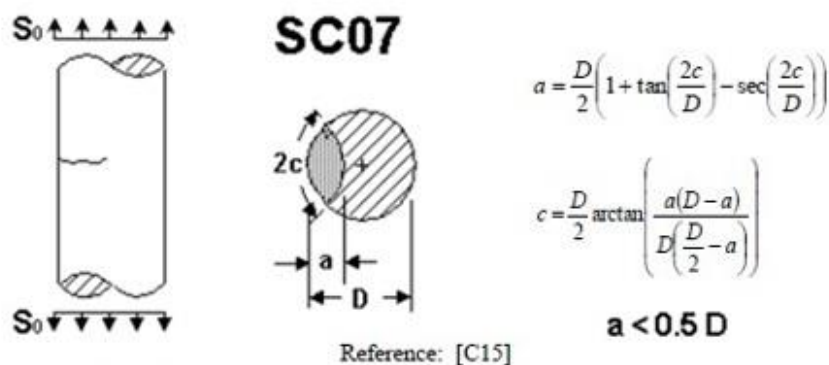


Table C15: CC07 (one crack) - SIF Correction Factors by BEM Analysis (FRANC3D)

		Tensile loading					
		$a-\bar{n}p$			$c-\bar{n}p$		
*R/t=>		0.25	0.5	2.0	0.25	0.5	2.0
a/c	a/t	$F_a = K / S_0 \sqrt{\pi a}$					
0.1	0	2.37	2.6	3.3	0.115	0.375	0.75
	0.1	2.1825	2.4978	3.3149	0.1817	0.3925	0.6780
	0.3	1.8282	2.3073	3.3518	0.3205	0.4326	0.5315
	0.7	1.6212	2.1781	3.9597	0.3815	0.5260	0.7553
	0.9	1.5307	2.0113	4.1749	0.7191	0.8326	1.0229
0.5	0	2.31	2.34	3.1	0.93	1.2	2.04
	0.1	2.1005	2.2302	2.9831	0.8995	1.1151	1.8912
	0.3	1.6425	2.0395	2.7709	0.8318	0.9374	1.5842
	0.7	1.2970	1.7600	2.7891	0.9942	1.0418	1.7411
	0.9	1.2490	1.7247	2.9498	1.0320	1.1478	1.8912
1.0	0	2.02	2.15	2.6	1.37	1.775	2.32
	0.1	1.8331	2.0303	2.4942	1.2237	1.5665	2.1873
	0.3	1.4669	1.7769	2.3238	0.9469	1.1536	1.9489
	0.7	1.1530	1.5280	2.2361	0.9303	1.0897	1.9003
	0.9	1.1123	1.5343	2.3788	0.8982	1.0836	1.8864

Fig.4-4: Thumbnail crack in a solid cylinder.

Surface crack case SC07. Fig.32 (2.2 Details of Crack Growth Analysis)
 Manual NASGRO Reference Manual Version 9.01 Final; December 2018.
 Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software

„Zugversuch an Monofilamenten nach ISO 11566“ (Zwick-Röll hat eine solche Prüf-Vorrichtung): Hierbei werden einzelne Fasern geprüft. Hierzu wird die einzelne Faser mit Hilfe eines Papierrahmens in den gezeigten Feder-Schraub-Probenhalter eingespannt. Die einzelne Faser im Bereich $\varnothing 7\mu\text{m}$ ist äußerst schwierig zu klemmen. Aus diesem Grund wird der Papierrahmen, welcher mittig mit einem definierten Loch präpariert ist, als Verstärkung eingesetzt. Auf diesem Papierrahmen wird die einzelne Faser aufgeklebt. Nach dem Trocknungsprozess des Klebers kann die Probe dann in die Prüf-Vorrichtung eingespannt werden. Der Papierrahmen wird vor dem Start der Prüfung durchtrennt und dann die Prüfung gestartet. Dabei treten Zugkräfte im sehr niedrigen **1N**-Bereich auf. Die Dehnungsermittlung wird über den Traversenweg bestimmt.

(In der Textiltechnik benutzt man für einen 'endlosen' Strang, der sogar aus mehreren Rovings bestehen kann, ebenfalls das Wort Filament sowie auch Faser. Deswegen verwenden sie das Wort Monofilament anstelle von nur Filament = Einzelfaser.)

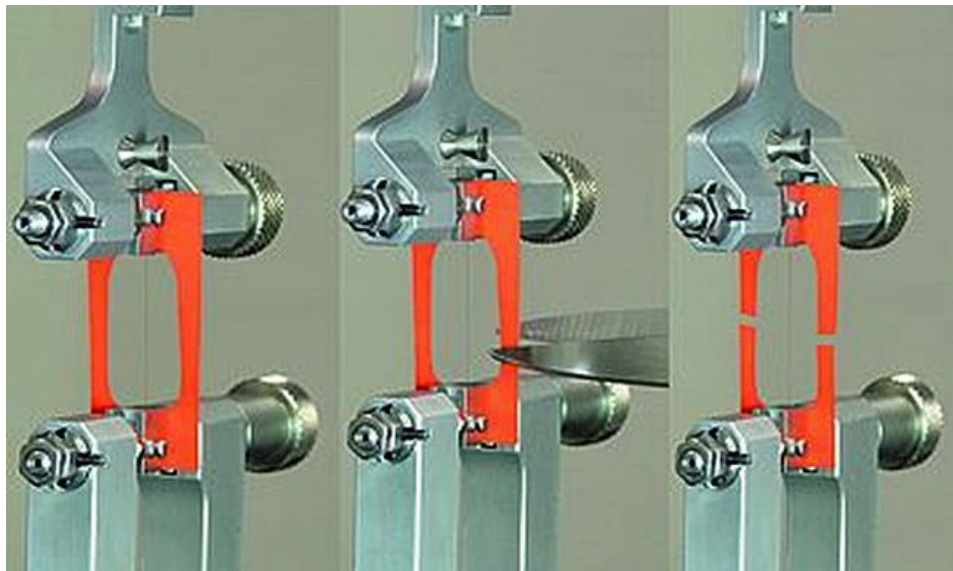


Fig. 4-5: Zugversuch an Monofilamenten nach ISO 11566

In Fig.4-6 ist eine vorläufige Rechnung mit dem Programm MathCad eingefügt, die die Ermittlung des sogenannten Bruchzähigkeitswertes für die laser-angekerbte Einzelfaser zeigt.

Dieser Wert ist umso niedriger, je spröder die Faser ist. Er soll die Aufsplitterungsgefahr als Folge der Sprödigkeit qualitativ erfaßbar machen.

Vorschlag für eine grafitierungszugeordnete Einteilung: (noch zu überarbeiten nach den Testergebnissen)

Designation		Tensile Modulus E_f GPa	Tensile Strength R_f MPa
HT	(high tensile)	225 - 265	4000 - 5000
IM	(intermediate modulus)	270 - 320	5400 - 6500
HM	(high modulus)	330 - 350	3200 - 4700
UHM	(ultra high modulus)	➤ 380	3800 - 4700

Rechnungen zur angekerbten Faser

$$D := 0.007$$

$$a := 0.1 \cdot D$$

$$b := \frac{a \cdot (D - a)}{D \cdot (0.5 \cdot D - a)}$$

$$b = 0.225$$

Größen in mm,
MPa = N/mm²

$$c := 0.5 \cdot D \cdot \operatorname{atan}(b)$$

$$c = 0.0008$$

Gesucht: Faserabhängige Bruchzähigkeit

Allgemeine Formel

Beispiel :

$$Y = 0.5$$

$$\sigma = 1000$$

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$$

$$K_{Ic} = 23$$

MPa·√mm

$$F0 = \frac{K_{Ic}}{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}$$

leider hier nicht Y genommen
sondern F von Force

$$K_{Ic} := F0 \cdot (\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})$$

$$t := 0.5 \cdot D$$

$$R := 0$$

$$\frac{R}{t} = 0$$

$$\frac{a}{t} = 0.2$$

$$\frac{a}{c} = 0.904$$

Tabelle ist für Hohlzylinder, liefert nicht einen Wert für Innenradius R=0, klingt aber ab für R/t < 0.25

KIc-Wertebereich geschätzt

$$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$$

$$\sqrt{1000} = 31.6$$

Gewähltes Beispiel:

Aus Tabelle Geometriefaktor $F0 = 1.5$

$$\sigma = 50$$

$$K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}} := F0 \cdot (\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})$$

$$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$$

$$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}$$

$$K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$$

$$\frac{K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}}{K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}} = \frac{\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}}{\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}}} = \sqrt{1000}$$

Keramiken besitzen mit 1–5 MPa m^{1/2} die niedrigste Bruchzähigkeit.

Dagegen haben Metalle mit dichtester gepackter Kristallstruktur eine Bruchzähigkeit, die 50- bis 100-fach höher liegt

$$K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} := F0 \cdot (\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})$$

$$K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} = 3.5$$

$$K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} := K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}} \cdot \sqrt{1000}$$

$$K_{Ic} \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} = 111.2$$

Mind: Test results can be far away from the reality like a bad theoretical model; theory creates a model of the reality, whereas an experiment is 'one' realization of the reality.

4.2.3 Preiswerte 'Knotentests & Schlaufentests', Biegetests

Die Prüfverfahren umfassen die Messung der Bruchfestigkeit von Rovings einer Doppelschleife oder eines einzelnen Knotens. Die Messung wird mit konditionierten und nassen Fasern durchgeführt.

Text (noch auszuarbeiten)

The test methods are described in ASTM D3217/D3217M-20 (2020) Standard Test Methods for Breaking Tenacity of Manufactured Textile Fibers in Loop or Knot Configurations

With help from spaghetti and color-changing fibers, a new mathematical model predicts a knot's stability. Jennifer Chu | MIT News Office Publication Date: January 2, 2020 Analysis

5 Sicht des Autors bezüglich der CF-‘Anwendungsproblematik‘

5.1 Generell gesammelte Erfahrungen (Lessons Learned)

- Beim Begriff Fasern sind nicht immer lange Fasern gemeint. Asbest ist z. B. lediglich faserähnlich
- Materialien können per se *toxisch sein*. Prinzipiell kann also eine (lange) Faser toxisch sein, die CF ist es nicht
- Teilchen oberhalb der WHO-Größe können in die Lunge aber nicht in die Lungenbläschen gelangen
- CFs und große CF-Partikel gefährden nicht (*CFRP-Implantate belegen dies*). Eine WHO-Größe bringt immer Gefährdung, so auch CF
- Nicht-toxische, bio-unlösliche Materialien werden unter bestimmten Umständen zunächst erst einmal als *toxisch wirkend* betrachtet.
- Inhalierbare μm -Faserbruchstücke können in den Lungenbläschen toxisch wirken. Dabei liegt ein Beleg vor, dass PechCF solche kleinen Faserbruchstücke unter gewissen Bedingungen bildet, bei PANCF besteht noch Klärungsbedarf, es sei denn der \emptyset nimmt durch einen nicht sehr wahrscheinlichen Brand ab
- TRGS-Vorsorge-Verdachteinstufung WHO-CFs: Kat.1B (zum Vergleich Asbest, Kateg. 1A!)
- Gegebenheiten für weiterführende Überlegungen zu CFs:
 - * Einhaltung der Arbeitsschutzmaßnahmen. Das Vorsorgeprinzip bewirkt beim Erreichen des maximale Konzentrationsniveaus, offiziell benannt ‘Toleranzkonzentrationswert’, sofortige Maßnahmen
 - * Alveolengröße: 60 μm bis 200 μm
 - * Tod von Makrophagen (Freßzellen): Lebensdauer mehrere Wochen oder nach dem Durchstechen von WHO-CF-Splittern
 - * PAN-CF scheinen bei mechanischer Bearbeitung nur wenige Prozent der bei Pech-CF durch Splitterbruch möglichen Partikel-Menge zu bilden. Pech-CF-WHO-Partikel sind also kritischer zu betrachten als solche von PAN-CF (*teure PechCF werden aber nicht am Bau verwendet*)
 - * Bei sehr hohen Temperaturen kann durch Oxidation der Durchmesser von PAN- und Pech-CF auf die kritische WHO-Größe abnehmen
 - * Die Größe der möglichen Einflüsse, Hazard (Gefahr) Potential HP (dies deckt Toxizität ab) und Expositions Potential EP, hängt von den ergriffenen Schutzmaßnahmen ab.
- Exposition: Hängt als Menge der eingeatmeten WHO-Teilchen vom einzelnen Ereignis und den vorliegenden Schutzmaßnahmen ab. Es ist somit wichtig, wirklich in der Praxis angewandte mechanische Bearbeitungsverfahren bei Expositions-messungen in ihrer Durchführung zu analysieren, damit man dann die erhaltenen Fraktionen an unterschiedlichen Partikeln vergleichend bewerten kann.
- CF-Toxizität: Die bisher vorgestellten Studien zur Toxizität deuten auf eine geringere toxische Wirkung hin im Vergleich zu bekannten kanzerogenen Materialien wie Asbest, Veränderungen als Vorstadium von Krebs konnten nicht gefunden werden. Die Makrophagenlebensdauer von einigen Wochen entscheidet mit über den Entsorgungs- oder ‘Abreinigungserfolg‘.
- Severity S (Gefährdung) = Toxicity • Exposition (*üblich ist ein Multiplikations-Modell, siehe auch Risiko-Matrix*):

- * Nur wenn eine hinreichend hohe Menge an WHO-Carbon‘fasern‘ entsteht, ist Gefährdungspotenzial gegeben oder wenn
 - * eine extreme Staubkonzentration von Teilchen kleiner als der WHO-Größe zur Überforderung der alveolen-eigenen Entsorgung führt (*laut neuen Ergebnissen des KIT werden die schlafenden, immer vorhandenen Tumor-Initiierungszellen in der Alveolenwand aktiviert*).
- Auftretenshäufigkeit von WHO-Teilchen:
- * Mechanische Bearbeitung: Dauer und Schutzmaßnahmen jeweils festzulegen
 - * Brand (Auto, Flugzeug, Carbonbeton, Windenergie rotorblatt, ...): z. B. Einstufung <https://www.msn.com/de-de/feed> improbable in der Risiko-Matrix

Nicht zu vergessen:

- * Je besser die Filter, desto mehr Feinstaub kann sich nicht mehr an größere Staubteilchen anlagern.
- * Der Abrieb im Straßenverkehr erzeugt ständig solche kleinsten Teilchen.
- * Minimaler Asbestfeinstaub ist immer in der Luft.

Wunsch des Autors:

Abgabe einer offiziellen Empfehlung durch *Composites United (CU)* zusammen mit der *BAuA* zum Arbeiten allgemein mit CFRP und zu PAN-CF-Carbonbeton inklusive angepasste Recycling-Sicherheitsanforderungen.

5.2 *Aktuell mögliche Aussagen zum Gefährdungspotential von PAN-CF und Pech-CF*

Risiko prinzipiell vorhanden bei:

- * Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz
- * Rettungsdiensten bei zufälligen Ereignissen
- * Durchführung von Recycling.

5.3 *Aussagen Gefährdungspotential von CFK aus PAN-CF, Pech-CF sowie Matrixpartikel*

H. C. Keßler untersuchte in seiner, nun dem Autor vorliegenden Dr. med. Dissertation, [Keß20], die Breite an Stäuben, die für den Entwicklungsingenieur von zumindest vergleichendem Interesse sind (Diesen Weg verfolgte der Autor ebenfalls). Dies bedingt nicht nur die Fasern selbst, sondern auch die Composites anzuschauen.

Keßler fand für die CFK-Composites heraus:

„Die untersuchten PAN-CFK zeigten sowohl eine toxische (giftige), als auch eine inflammatorische (entzündliche) schwache Wirkung in vitro PICMA (Particle-induced Cell Migration Assay). Die umhüllende EP-Kunststoffmatrix hat dabei einen nicht unwesentlichen Anteil.“

“PAN-CFK und Pech-CFK führten zu einer vergleichbaren pathologischen Reaktion. Ähnliches wurde bereits bei Luchtel et al. (1989) beschrieben. Dort war der Unterschied zwischen den Fasertypen (Glasfaser (Quarz) versus Carbonfaser) jedoch noch ausgeprägter (s. Bild). Erneut liegt daher der Verdacht nahe, dass vor allem die umhüllende Kunststoffmatrix für die toxischen und inflammatorischen Eigenschaften der CFK verantwortlich ist (Martin et al., 1989). Neben der reinen Matrix könnten auch zusätzliche Stoffe toxisch wirken, die durch Bearbeitungsprozesse frei werden und daraufhin von der Matrixoberfläche absorbiert werden (Martin et al., 1989). Die Ergebnisse von [Luc98] und [Mar89] würden die Diskussion über die Faser- oder Matrixwirkung von CFK noch einmal in Richtung Matrix verlagern und insgesamt gut zu den eigenen Beobachtungen aus der Lichtmikroskopie und dem PICMA passen.“

→ Gefährdungsanalyse für PAN-CFK: PICMA-Test weist auf sehr geringe Entzündungswirkungen hin.

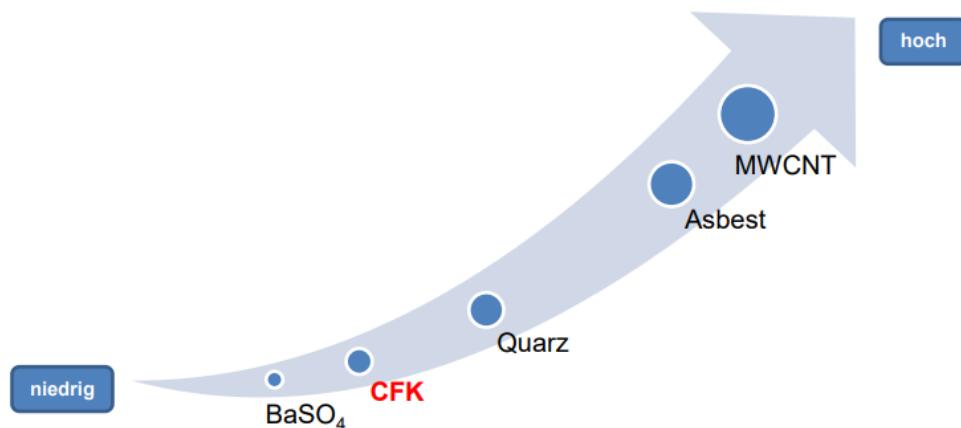


Fig. 5-1: Gefährdungspotential (,inflammatorische Hierarchie‘) ausgewählter Stäube von Fasern und Partikeln im PICMA (angelehnt und modifiziert nach Schremmer, 2015). [Keß20]. BaSO₄ = Bariumsulfat. Für PAN-CF und Pech-CF mit Matrix basierend auf Epoxidharz + Härter (aromatisches Amin)

Luchtel, D. L., Martin, T. R., Boatman, E. S. (1989). *Response of the Rat Lung to Respirable Fractions of Composite Fiber-Epoxy Dusts*. Environ. Res. 48 (1), 57–69

[Mar89] Martin, T. R., Meyer, S. W., Luchtel, D. R. (1989). *An evaluation of the toxicity of carbon fiber composites for lung cells in vitro and in vivo*. Environ. Res. 49 (2), 246– 261

Fazit aus kombinierten Ergebnissen Messung-Rechnung

* Für eine mögliche Gefährdung von Personen durch WHO-CF muss sowohl eine signifikante Exposition als auch toxikologische Wirkung über eine längere Zeit gegeben sein. Nur wenn beides eintritt, ist eine Gefährdung gegeben

*

*

5.4 Zielgruppenorientierte Anregungen für Industrielle Anwendungen

Für die verschiedenen Zielgruppen, die mit CF zu tun haben, sind praktische Anregungen erwünscht, die ganzheitlich Faser, Faser-Schlichte, Harz und ausgehärtete Matrix also das

Composite umfassen. Zu unterscheiden sind insgesamt dabei die 3 Phasen Herstellung, Betrieb und Recycling, in denen entsprechende Partikel zu betrachten sind und zugehörige Maßnahmen getroffen werden.

(B. Güttler)

Großkonzern

Mittelstand

Endanwender

5.5 Vorgehensweisen bei zufälligen Ereignissen analog zu *‘Abgerissenes Blatt in Alfstedt‘*

5.5.1 Beispiel *‘MAN-Vorgehensweise bei Herstellung und Berst-Versuchen mit CFK-Hochdruckbehältern‘* und Gasultrazentrifugen

Text



Fig. 5-2, CFK: (links) Rotor mit metallischer Innenauskleidung, (rechts) Geborstener Hochdrucktank
[MAN-Technologie]

5.5.2 Beispiel *‘Rotorblätter von Windenergiekonvertern‘*

Umweltbundesamt zu Windenergieanlagen: Rückbau, Recycling, Repowering:

„Nach 20 bis 30 Jahren haben Windenergieanlagen das Ende ihrer Lebensdauer (Standzeit) erreicht und müssen rückgebaut werden. Welche rechtlichen Vorgaben gelten dafür und was darüber hinaus noch beachtet werden sollte, damit die Umwelt möglichst wenig belastet wird und die enthaltenen Materialien bestmöglich recycelt werden können.“ (Beim GROWIAN hatten wir 1980 ‚einfach‘ einmal 20 Jahre Lebensdauer angesetzt, da es noch keine Erfahrung gab. Damals wussten wir auch nichts von einem späteren 20-jährigen Förderungszeitraum.)

Bis 2026 könnte somit jeder zweite Windenergiekonverter in Deutschland ans Ende seiner Betriebszeit gelangen. Ein Weiterbetrieb ist zu prüfen unter Berücksichtigung steigender Wartungskosten. (Der Autor hat übrigens für FVK ein Lebensdauerauslegungsmodell entwickelt [in Cun23]).

Text der MAN-Vorgehensweise

Vorschlag für Vorgehensweise:

Text

5.3.2 Genereller Vorschlag für Vorgehensweisen (**Bitte an BAuA hierzu**)

Wie will der Technologie-Standort Deutschland reagieren, wenn solche News verunsichern, Wehrwissenschaftlichen Institut für Werk- und Betriebsstoffe (WIWeB):

- „Als gravierend sehen die Wissenschaftler des WIWeB in Erding es an, wenn Carbon anfängt, zu brennen (isolierte CF sind nicht brennbar). Denn dann ähneln (wirklich??) die entstehenden Mikrofasern in Größe und Wirkung dem krebserregenden Asbest. Der Untersuchung zufolge können die beim Brand freiwerdenden Carbon-Mikropartikel tief in die Lunge eindringen und dort Tumore auslösen.13.08.2014
- Zudem können in die Haut eindringende Carbon-Fasern zu eitrigen Entzündungen führen. (Selbst nie erlebt. Wozu dient der verpflichtende Arbeitsschutz dann eigentlich noch?).
- Krebsgefahr nach Unfall mit Carbon-Auto BMW i3 [*AUTO Bild, News*]. Wenn also ein Carbon-Auto crasht, sollte daher jeder Kontakt mit Haut oder Schleimhaut mit den freiwerdenden Partikeln vermieden werden. Auch dürfen Verbrennungsgase keineswegs eingeatmet werden, raten die WIWeB-Forscher – eine Erkenntnis, die jeden Feuerwehrmann, Rettungssanitäter oder i3-Fahrer interessieren dürfte“. (Wichtig wäre es gewesen, zu wissen, welcher Fasertyp vorlag).

Fazit:

*Es ist also zwingend notwendig, eine Vorgehensweise vorzugeben
(CU und BAuA sind hier beispielsweise angesprochen).*

6 ANNEX Von Carbonfaser-Vorstufen zu Einzelfasern (Filaments)

6.1 Einführung

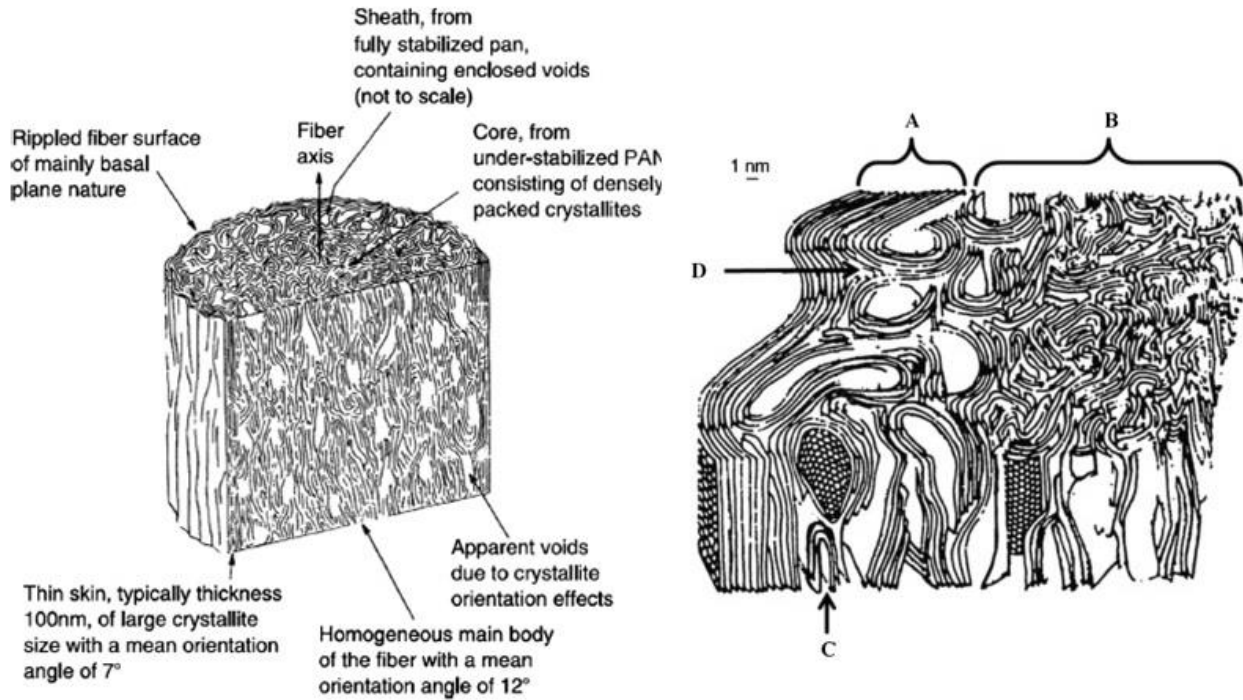
CF wird mit zwei Hauptmethoden hergestellt, nämlich Polyacrylnitril (PAN) und Pech. Ursprünglich war Rayon ein dritter Vorläufer, wurde aber durch die wirtschaftlicheren PAN und Pitch ersetzt.

Etwas Geschichte (aus [Wan17]): "Kohlenstoff-Fasern wurden von J. Swan (1860, erhitzte Baumwollfäden, sauerstoff-frei) zuerst von Thomas Edison eingesetzt. 1897 erhitzte er die Baumwollfäden bei hohen Temperaturen, um sie für seine Glühbirnen-Experimente zu reinem Kohlefaden zu karbonisieren. Die praktische Anwendung von CFs begann in den 1960er Jahren, als die Herstellung von hochfesten und steifen CFs aus Rayon (Faser aus regenerierter Zellulose, die in der Regel aus Holz Zellstoff gewonnen wird) entwickelt wurde. Hochleistungs- (High Performance HP) CF wurden auf der Grundlage der Forschungsarbeiten zweier japanischer Wissenschaftler entwickelt: Anfang der 1960er Jahre entwickelte Dr. Akio Shindo aus Japan das Voroxidationsverfahren, um den Kohlenstoffanteil durch die Verwendung von Polyacrylnitril (PAN) als Rohstoff auf über 55 % zu erhöhen. Er stellte CF aus PAN im Labor her, die einen Modul von mehr als 140 GPa aufwiesen, etwa 3-mal höher als die damaligen Rayon-basierten CF. Im Jahr 1963 entwickelte Dr. William Watt aus Großbritannien das Verfahren zur Herstellung einer hochfester CF, indem die PAN-Ketten in den frühen Stadien der Pyrolyse durch Zugspannung parallel zur Faserachse gehalten werden. Beide Erfindungen von Shindo und Watt führten schließlich zu den modernen PAN-Hochleistungs-CFs."

Die CF-Eigenschaften hängen von den Vorläufermaterialien (Precursor) und vom Herstellungsprozess ab. Dabei sind Bedingungen unterschiedlich, aber die wesentlichen Prozesse ähnlich. In der Regel erfordert die CF-Herstellung eine Erhitzungs- und Streckbehandlung, um die hochfesten Endprodukte zu erhalten (*nach Fig. 2-4, PAN Prozess-Schritte [Keß20]*). Zuerst wird eine Behandlung im Temperaturbereich von 200 bis 400°C in Luft unter Streckung durchgeführt, um die stabilisierte Faser zu erhalten, gefolgt von einem Karbonisierungsprozess im Temperaturbereich von 800 bis 1500°C unter sauerstofffreien Bedingungen, um Verunreinigungen zu entfernen und die Kristallinität des Kohlenstoffs zu verbessern. Um die Leistungsfähigkeit von CFs weiter zu verbessern, ist ein Graphitisierungsprozess erforderlich, um karbonisierte Fasern mit einer Temperatur von bis zu 3000 °C zu graphitieren. Während dieser Prozesse ist eine Streckung erforderlich, um bevorzugt orientierten kristallinen Kohlenstoff zu erhalten.

„Abhängig von den Herstellungsbedingungen können die resultierenden CFs kristallin, amorph oder teilkristallin sein. Der kristalline Bereich ist dem von Graphit sehr ähnlich, wo 2 hybridisierte Kohlenstoffatome kovalent in einem Wabengitter gebunden sind und eine sogenannte Graphenschicht bilden. Diese hybridisierten π -Bindungen sind für die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit von CFs verantwortlich. Diese Graphenschichten sind über schwache van-der-Waals-Bindungen parallel zueinander gestapelt. Es ist jedoch schwierig, perfekten kristallinen Kohlenstoff in CF zu erhalten. Die Basiseinheit in den meisten CF ist der Stapel turbostratischer Schichten. *Fig.6.1* zeigt eine typische Struktur von Kohlenstofffasern, die Mikrodomänen paralleler Graphenschichten, Defekt- und Disklinationsbereiche enthält. Diese Domänen könnten sich in den CF verdrehen, falten und miteinander verbinden.“

Dies ist essentiell für die mechanische Modellierung der CF.



5298 www.angewandte.org _ 2014 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 5262 – 5298

Fig.6.1: PAN-CF und Pech-CF mit ihre Mikrostruktur beeinflussenden Versagensmechanismen (left) Representation of some of the features of PAN-HP-CF. Fibrils of carbon (right) Microdomains in a carbon fiber. A: skin region; B: core region; C: hairpin defect; D: wedge disclination. Reproduced with permission. (Ref. [12].) Copyright © 2013 Elsevier

Fig. 6-2 zeigt für PAN-CF mit Pech-CF die Korrelation des Elastizitätsmoduls (links) und der zugehörigen Zugfestigkeit (rechts) in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur dar. Damit wird gleichzeitig eine Basisinformation zu dem unterschiedlichen Verhalten der beiden Faserhaupttypen geliefert.

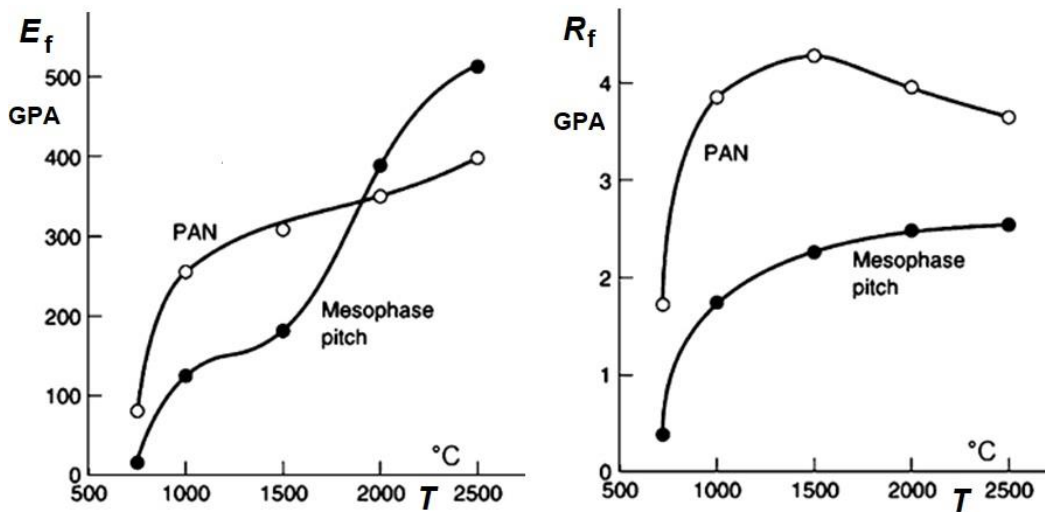


Fig. 6.2: Correlation of E_f and R_f for PAN-CFs (inklusive UMS) and Pitch-CFs. Reproduced from IUPAC

CFs have been classified into: ultrahigh-modulus (UHM), high-modulus (HM), intermediate-modulus (IM), standard elastic modulus type (HT), and low elastic modulus type (LM) (see Table I-1). Both UHM and HM CFs are highly graphitized at temperature between 2000 to 3000 °C, and

they are characterized by a high modulus (>350 GPa). They are assigned to the high modulus type I carbon fibers in some reviews and articles. The type II carbon fibers are called high strength fibers but low modulus due to the lower heat treatment temperature ($\sim 1500\text{--}2000$ °C). It includes both IM and HT carbon fibers, and the tensile strength of IM carbon fibers can be greater than 3 GPa with a strength-to-modulus ratio $>1 \times 10^{-2}$.

6.2 PAN-basierte Precursor und ihre Mikrostruktur

PAN-CF können nach Rovingsorten unterschiedlicher Filamentanzahl unterteilt werden. ‚Kleine‘ Rovings bestehen aus mit 3 bis 24k CF-Filamenten, die meist für Hochleistungs (*High Performance HP*)-CFs stehen, die für alle Arten von Anwendungen verwendet werden können. Die ‚großen‘ Rovings (*heavy tows genannt*) Schlepper verfügen über 48 bis 320k Filamente, die vor allem für weniger anspruchsvolle Anwendungen eingesetzt werden, aber auch im Bauwesen als schlaffe und vorgespannte Bewehrung.

Mit dem zunehmenden Einsatz von CFs für die Windkraft, im Automobilsektor und im Bauwesen wird die Nachfrage nach CFs steigen. Die Entwicklung nachwachsender Polymerrohstoffe und bio-basierter Precursor-Vorstufen ist die zukünftige Voraussetzung für eine kostenoptimale PAN-CF, um ein Massen-CF-Produkt etablieren zu können, wie es die Bauindustrie fordert. Daraus ist ebenfalls zu folgern „CF-Entwicklung ist nicht abgeschlossen“. Mehr Verständnis über Kristallinität und Kristallitgröße, sowie Polymerorientierung ist notwendig, um zu erkennen, wie aus einem polymeren Precursor die innere Struktur der CF entsteht (siehe *Fig.6-1*).

6.3 Pitch based precursors and their Structure

„Pech ist die allgemeine Bezeichnung für die teerige Substanz, die bei Raumtemperatur hochviskos ist und einen sehr hohen Kohlenstoffgehalt aufweist. Es handelt sich um ein komplexes Gemisch, das aus natürlichen Quellen durch Destillation von Erdöl und Kohle oder aus synthetischen Quellen durch die Pyrolyse von polyaromatischen Verbindungen und Polymeren hergestellt werden kann. *Die Zusammensetzung des Pechs variiert stark je nach Teerquelle und Verarbeitungsbedingungen. Pech kann mehr als 80 % Kohlenstoff enthalten, mit zunehmender Aromatizität steigt die Qualität des CF-Produkts. Das Rohprodukt durchläuft in der Regel einige Prozesse, bevor es für die CF-Industrie verwendet wird (Fig.6-3). Kohlenteepech ist im Allgemeinen aromatischer* (.....) *als Erdölpech. Es enthält jedoch auch einen hohen Feststoffgehalt, der während der Extrusion und Wärmebehandlung zum Bruch des Vorläuferfilaments führen kann. Aus diesem Grund wird Erdölpech für die CF-Produktion bevorzugt.*“ (übersetzt aus K. Acatay in *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081018712000060>).

“Two main types of pitch are in use, isotropic and mesophase pitch. Both isotropic (iPitch) and mesophase pitch (mPitch) CF are made from the same feedstock. Isotropic pitches are used to make General Performance (GP) grade of PitchCF. They are not graphitic and have poorer properties than the High Performance (HP) grade. To manufacture HP grade, a special treatment process is needed to convert the pitch to mesophase grade. Mesophase grade is optically anisotropic and graphitic in nature. It is claimed that a pitch suitable for spinning should preferably contain 40% – 90% mesophase, with domain sizes greater than 200 μm , which will then produce a Pitch-CF with a highly oriented structure” (from [Yua20]).

“The pitch-based precursors are generated by melt spinning in an extruder. Melt spinning of pitch is difficult because of the rheological properties of molten pitch, and very narrow processing conditions are required. Especially, the viscosity of the mesophase is extremely temperature-

dependent and the jet temperature should be accurately controlled, as a change of $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ at jet face will produce $\pm 15\%$ variation in the diameter. The melt-spinning process involves three steps: Melting the precursor, Extrusion through a spinneret capillary, and Tensioning the filaments as they cool. Pitch spinnerets have a multiplicity of holes, which must be spaced about 1.1 mm apart of each other to avoid inter-filament fusing [<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/carbon-fiber>]. Some initial orientation occurs as the molten pitch passes through the capillaries. After emerging from the capillaries, it is cooled by quench air. When it is still hot, the solid fiber is drawn before windup to give a highly oriented precursor filament. This (filament as) precursor fiber will not need further drawing at any subsequent carbonizing process. Fiber handling in the windup is difficult due to the low strength of the as-spun mesophase pitch (tensile strength $R_f \cong 0.04 \text{ GPa}$). Mesophase CFs usually have a larger diameter of 10–15 μm compared with 5–7 μm diameter for PAN carbon fibers. This is because larger diameter mesophase precursor fibers are preferred for easy handling and higher carbon yield; thus, size reduction in carbonization process is smaller. Spun mesophase pitch precursor fibers have a microstructure consisting of well-oriented polyaromatic molecules in microdomains.

Das Wichtigste bei der Herstellung von CF ist das Mesophase-Pech aufgrund der Fähigkeit, anisotrop ohne Filamentbruch zu schmelz-spinnen. Mesophase-Pech bildet ein thermotropes Kristall, der es ermöglicht, lineare Ketten zu bilden, ohne eine Spannung aufzubringen.

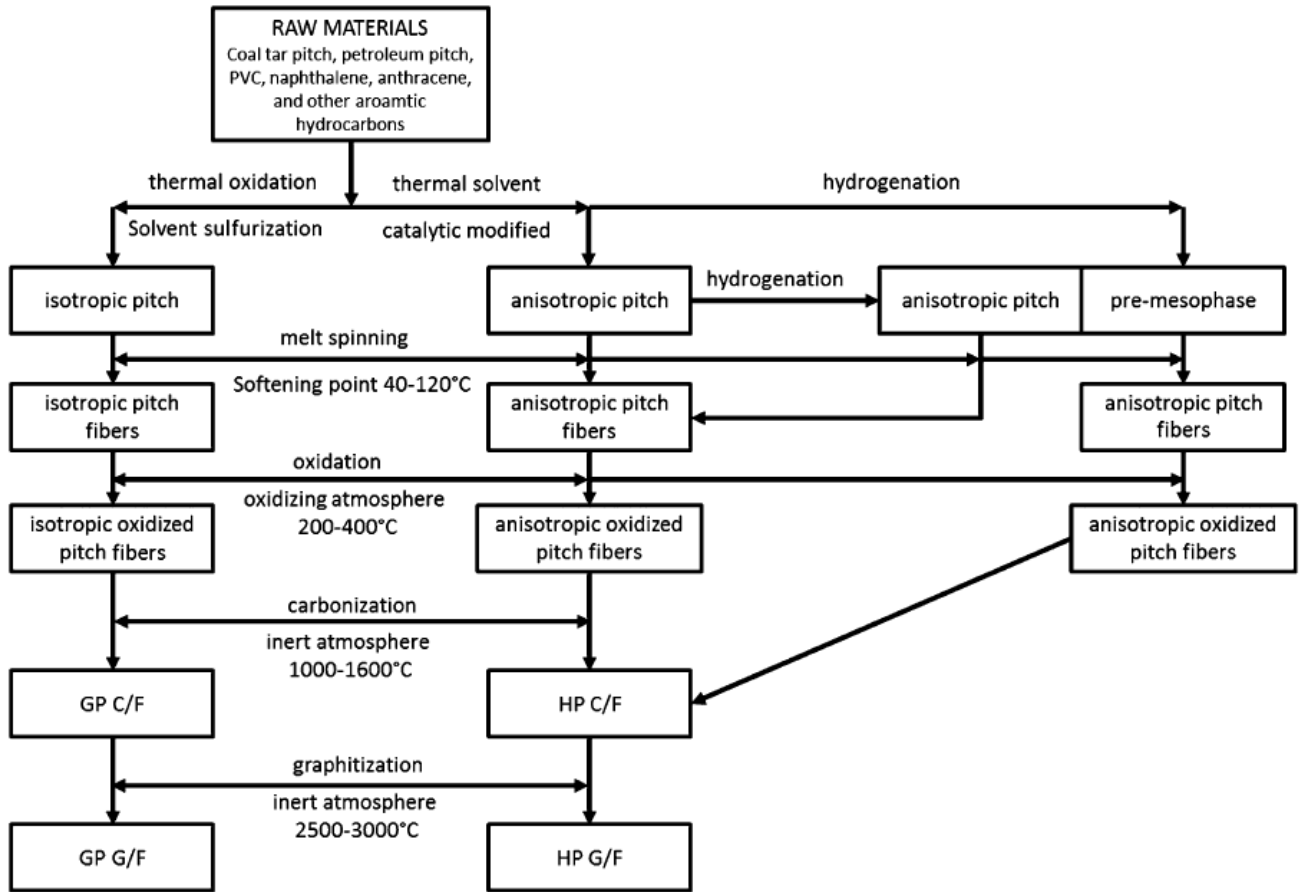
Bei der Herstellung von Pech-CF gibt es vier Prozessschritte. Diese sind zusammengefasst nach:

<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/carbon-fiber>

- 1) Melt spinning: Method of forming fibers through the rapid cooling of a melt; due to the fast rates of cooling, the mesophase pitch is able to become highly oriented. Mesophase pitch can be melt spun, but because of its flow characteristics the process can be difficult. The viscosity of mesophase pitch is very sensitive to temperature which therefore must be carefully controlled.
- 2) Oxidization/Pre-carbonization: Used in order to cross-link the fibers to the point where they cannot be melted or fused together. This step is extremely important because it produces fibers that are stable at the high temperatures of the following carbonization and graphitization steps
- 3) Carbonization: Process removing all non-organic elements. All elements except for carbon are removed. This is achieved by heating the fibers to high temperatures in an environment without oxygen. This step removes all impurities from the fibers and leaves crystalline carbon structures.
- 4) Graphitization: Process of treating the fibers at high temperatures in order to improve the alignment and orientation of the crystalline regions along the fiber direction. Having the crystalline regions aligned, provides high R_f .

Fazit:

- * *Es wurde festgestellt, dass Pech-CF in ihrer Kristallstruktur schichtartiger im Gegensatz zu den körnigeren PAN-CF sind.*
- * *Es ist zu prüfen, ob das auch annähernd für die UHM-PAN-CF gilt.*



Processing steps for CFs starting from pitch as the precursor material. Redrawn from Ref. [41].

Fig.6.3: Process steps of Pitch-CFs,
 [Carbon Fibers: Precursor Systems, Processing, Structure, and Properties: Erik Frank, 2014, Angewandte Chemie International Edition
 [41] J. D. Brooks, G. H. Taylor, Chem. Phys. Carbon, Vol. 4, (Ed.: P. L. Walker, Jr.), Marcel Dekker, New York, 1995

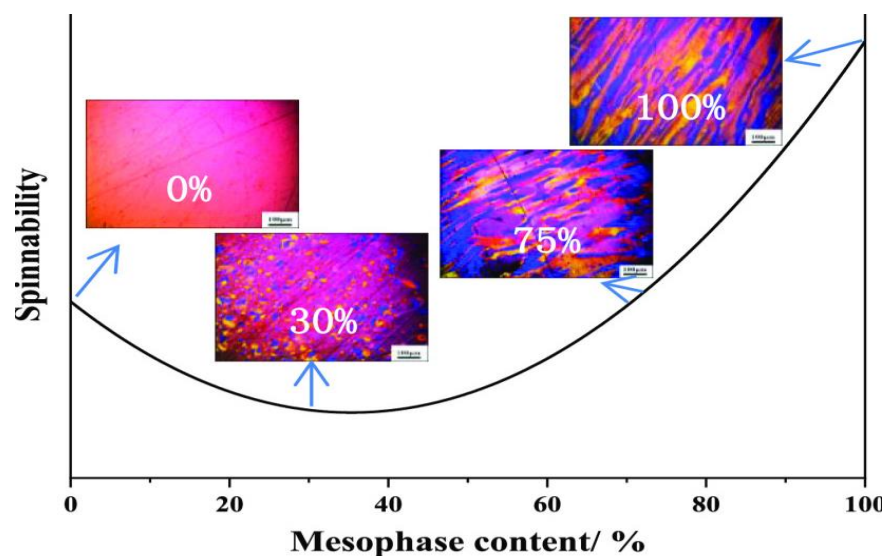


Fig.6.3: Phase diagram of spinnability vs. mesophase content as measured for the NP-derived two-phase spinnable pitches with softening points in the range of 210–290 °C. The inserted images are the optical textures of representative mesophase contents. NP = Naphtalene Pitch [Yua20] Fibrillen.

For the Pich-CF-modeller essential is:

The intended highly mesophase fiber obtains a texture which depends on the melt spinning temperature.

Literature used:

- [Yua20] Guanming Yuan, Zheng Xue, Zhengwei Cui, Aidan Westwood, Zhijun Dong, Ye Cong, Jiang Zhang, Hui Zhu, and Xuanke Li: *Constructing the Bridge from Isotropic to Anisotropic Pitches for Preparing Pitch-Based Carbon Fibers with Tunable Structures and Properties*. Cite this: ACS Omega 2020, 5, 34, 21948–21960. Copyright © 2020 American Chemical Society
- Matsumoto, T (1995). "Mesophase pitch and its carbon fibers" (PDF). *Pure and Applied Chemistry*. 57 (11): 1553–1562. doi:10.1351/pac198557111553. S2CID 207266372.
- Yamamoto, I., Fukagawa, T., and Muroi, M., Pitch based carbon fibers, United States Patent Office, 1999. (<http://www.google.com/patents/US6303096>)
- Lin, S., Pitch based short carbon fibers, United States Materials Technology Laboratory, 1991. (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a244780.pdf>)
- Huang, Y.; Young, R.J. (1995). "Effect of Fibre Microstructure upon the Modulus of PAN- and Pitch-based Carbon Fiber". *Carbon*. 33 (2): 97–107. doi:10.1016/0008-6223(94)00109-D.
- Singer, L.S. (1978). "The mesophase and high modulus carbon fibers from pitch". *Carbon*. 16 (6): 409–415. doi:10.1016/0008-6223(78)90085-4.
- Singer, L.S. (1981). "Carbon fibres from mesophase pitch". *Fuel*. 60 (9): 839–847. doi:10.1016/0016-2361(81)90147-2.
- Huang, X., *Fabrication and Properties of Carbon Fibers*, Materials, 2009. (<http://www.mdpi.com/1996-1944/2/4/2369>)
- Lewis, I.C. (1982). "Chemistry of Carbonization". *Carbon*. 20 (6): 519–529. doi:10.1016/0008-6223(82)90089-6.
- Edie, D.D.; Dunham, M.G. (2014). "Melt Spinning Pitch-Based Carbon Fiber". *Carbon*. 27 (5): 647–655. doi:10.1016/0008-6223(89)90198-X.

7 ANNEX CarboBreak - Voraussetzungen und Mechanismen einer Freisetzung alveolen-gängiger CF-Bruchstücke

7.1 CarboBreak Projekt

„Voruntersuchungen haben für die CF selbst und den aus ihnen hergestellten polymeren Verbundwerkstoffen CFK bei mechanischer Beanspruchung und Bearbeitung teilweise eine ausgeprägte Neigung zum Splitterbruch** gezeigt. Die wachsende Bedeutung von Carbonfasern insbesondere für Leichtbau- und Hochleistungsanwendungen erfordert aufgrund der hohen Beständigkeit graphitischer Werkstoffe in biologischen Systemen nicht nur aus der Sicht der Produktentwickler, sondern auch aus Sicht der Arbeits- und Produktsicherheit, ein tiefgehendes Verständnis von Staub- und Faserfreisetzungprozessen. Dafür bedarf es gemeinschaftlicher übergreifender Anstrengungen unterschiedlicher Disziplinen wie Sicherheitsforschung, Materialwissenschaften und Produktentwicklung“.

. ** Da diese Splitterbruchneigung (Autor nennt es Faser-Aufsplitterung, Aufspießung) derzeit im Allgemeinen für CF nicht belegt ist, müsste hier – um eine Anwendungsschock bei Standard-PAN-CF zu vermeiden – die gemeinten CF erwähnt sein.

Kontakt

Tim Rademacker
E-Mail: trademacker@cfk-recycling.com Telefon: +49 4770 801-213

Dr. Anna Große
E-Mail: anna.grosse@stfi.de Telefon: +49 371 5274-282

Dipl.-Ing. Romy Naumann
E-Mail: romy.naumann@stfi.de Telefon: +49 371 5274-186

CarboBreak

Voraussetzungen und Mechanismen einer Freisetzung alveolen-gängiger faserförmiger Carbonfaser-Bruchstücke

Laufzeit 01.01.2019 bis 31.12.2021



Das BMBWF-Vorhaben 03XP0197 (CarboBreak) wird über den Projektträger Jülich im Rahmen des Programms „NanoCare4.0 - Anwendungssichere Materialinnovationen“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBWF) gefördert.

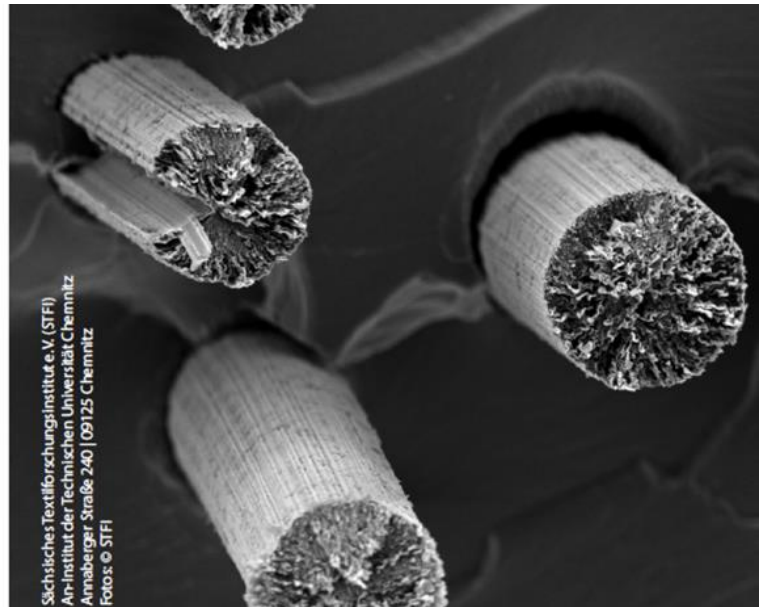


Fig. 7-1: Flyer CarboBreak. „Freisetzung alveolen-gängiger ‘faserförmiger‘ CF-Bruchstücke“ (Welcher CF-Typ ist im Bild dargestellt?)

Projektbeschreibung BAuA:

„In der Prozesskette von der Faser über die textile Fläche und die Verbundwerkstoffe bis zum Recycling sowie der Wiederverwertung werden CF hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Dabei können durch den Splitterbruch von Fasern auch lungengängige (alveolengängige) Fragmente freigesetzt werden, bei denen gemäß der Weltgesundheitsorganisation (englisch: World Health Organization, WHO) von einer asbestartigen Wirkung ausgegangen werden muss.“

„Ziel des Projektes war daher ein verbessertes Verständnis für das **Splitterbruchverhalten** verschiedener CF-Typen zu schaffen. Gleichzeitig war das Freisetzungverhalten von alveolengängigen Bruchstücken aus reinen Fasern und Faserverbundwerkstoffen bei mechanischer Beanspruchung zu untersuchen.“ Das genehmigte BMBWF-Vorhaben 03XP0197A wird über den Projektträger Jülich im Rahmen des Programms "NanoCare 4.0 - Anwendungssichere Materialinnovationen" vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Im Projektantrag geplante Meilensteine: M1 *Auswahl von Eckpunktfasern* und M2 *Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Analyse des Splitterbruchs*.

„* Im Meilenstein M1 wurden, basierend auf einer CF-Vorauswahl, sogenannte Eckpunktfasern bestimmt und schließlich 8 marktrelevante ausgesucht, *Fig.7-2*. Dafür wurden die Materialeigenschaften der Fasern untersucht und erste orientierende Ergebnisse über die Bruchneigung sowie die Morphologie der entstehenden Bruchstücke erzielt.

* Im Meilenstein M2 wurde ein Prüfverfahren zur Analyse des CF-Splitterbruchs entwickelt. Aufbauend auf einer bei der BAuA verfügbaren Prüfkammer (Kugelschwingmühle) erfolgte eine Anpassung dieser Prüfmethode für Carbonfasern. Die Fasern wurden unter Gewährleistung einer Gleichbehandlung aller zu testenden Materialien einer extremen mechanischen Beanspruchung unterworfen. Mit der Software FibreDetect wurden die entstandenen CF-Fragmente hinsichtlich ihrer Morphologie bewertet und es konnte eindeutig bestimmt werden, ob die Fragmente den WHO-Kriterien entsprechen. Das verwendete Verfahren gewährleistet eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse.

In Zusammenhang mit dem zweiten Meilenstein wurde eine Standardarbeitsanweisung (SAA) für die Prüfung des Splitterbruchs von Carbonfasern erarbeitet.

Die erfolgreiche Bearbeitung der Teilaufgaben bis hin zum Erreichen der Meilensteine sowie die kommenden Arbeitsaufgaben wurden mit den Projektpartnern und assoziierten Partnern auf dem Treffen am 16. und 17. September 2020 bei der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) in Berlin vorgestellt und diskutiert“.

Table 7-1: CarboBreak, Arbeitspaket 1: Bruchverhalten von einzelnen Carbonfasern, 1-5 STFI / 6-13 BAuA / 14-15 STFI

	Carbonfasertyp	Precursor	Typ	Anzahl Filamente	Filament Ø [µm]	Zugfestigkeit R _r [MPa]	Zug-E-Modul E _r [GPa]	Bruchdehn. ε _{fract} [%]	Garnfeinheit [tex]	Schlichte/ Präparationsauftrag
1	Tenax®-E ^{*)} HTS40 F13 ^{*) Europe}	PAN	HT	12k*	7,0	4.400	240	1,8	800	1,0%, Basis Polyurethan
2	Tenax®-E STS40 F13	PAN	HT	24k	7,0	4.300	240	1,8	1.600	1,0%, Basis Polyurethan
3	Tenax®-E HTA40 E13	PAN	HT	6k	7,0	3.950	238	1,7	400	1,3%, Basis Epoxidharz
4(a)	Tenax®-J ^{*)} UMS40 F23 ^{*) Japan}	PAN	HM	24k	4,8	4500	390	1,1	800	1,0%, Basis Polyurethan
5	Tenax®-E IMS 65 E23	PAN	IM	24k	5,0	6.000	290	2,1	830	1,3%, Basis Epoxidharz
6	SGL SIGRAFIL CT50-4.4/255-E100	PAN	HT	50k	7,0	4.400	255	1,65	3.240	1%, Basis Epoxidharz
7	SGL SIGRAFIL CT50-4.8/280-E100	PAN	HT	50k	6,6	4.800	280	1,65	3.070	1%, Basis Epoxidharz
8	SGL SIGRAFIL CT50-4.0/240-E100	PAN	HT	50k	7,0	4.000	240	1,7	3.300	1%, Basis Epoxidharz
9	SGL SIGRAFIL CT24-5.0/270-E100	PAN	IM	24k	6,9	5.000	270	1,9	1.600	1%, Basis Epoxidharz
	PANEX 35 (Zoltek ^{*)})	PAN	HT		7,2	4137	242			Keine Information
10	Mitsubishi DIALEAD K13D2U	Pech	UHM	2k	11,0	3.700	935	0,4	365	Keine Information
11	Mitsubishi DIALEAD K63712	Pech	UHM	12k	11,0	2.600	640	0,4	2.000	Keine Information
12	GRANOC NGF XN-05-30S	Pech	k.A.	3k	10,0	1.100	54	2,0	410	Keine Information
13	SGL PANOX®	PreOx PAN	k.A.	320k	13,0	230	k. A.	21,0	52.000	0,7% Antistatikum
14	GRANOC NGF YSH-50A-60S	Pech	HM	6k	7,0	3.900	520	0,7	520	Keine Information
15	Tenax®-J UMS55 F23	PAN	HM	12k	4,4	4.000	550	0,7	360	1,0%, Basis Polyurethan

7.2 Durchgeführte Versuche in M2

„Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes war die Durchführung von Arbeitsplatzmessungen nach VDI 3492 und DGUV-Information 213-546. Die Messungen und Probenahmen wurden vor Ort bei den Projektpartnern und in Industriebetrieben umgesetzt, um den Bezug zur Praxis zu gewährleisten. Die Projektarbeiten erstrecken sich über den gesamten CF-Lebenszyklus, von der Produktion textiler Halbzeuge über die Herstellung und Verarbeitung von Verbundwerkstoffen bis hin zum Recycling und zur Wiederverwendung.

Hauptergebnis des Projekts sind Empfehlungen zu Arbeitsabläufen und zur Personensicherheit sowie die Identifikation idealer bzw. optimierter Prozessparameter bei der Verarbeitung. Die Ergebnisse von CarboBreak liefern grundlegende Beiträge für die Entwicklung von anwendungssicheren Materialinnovationen“.

Ergebnisse (mit Unterstützung durch Dr. Anna Grosse, STFI Chemnitz)

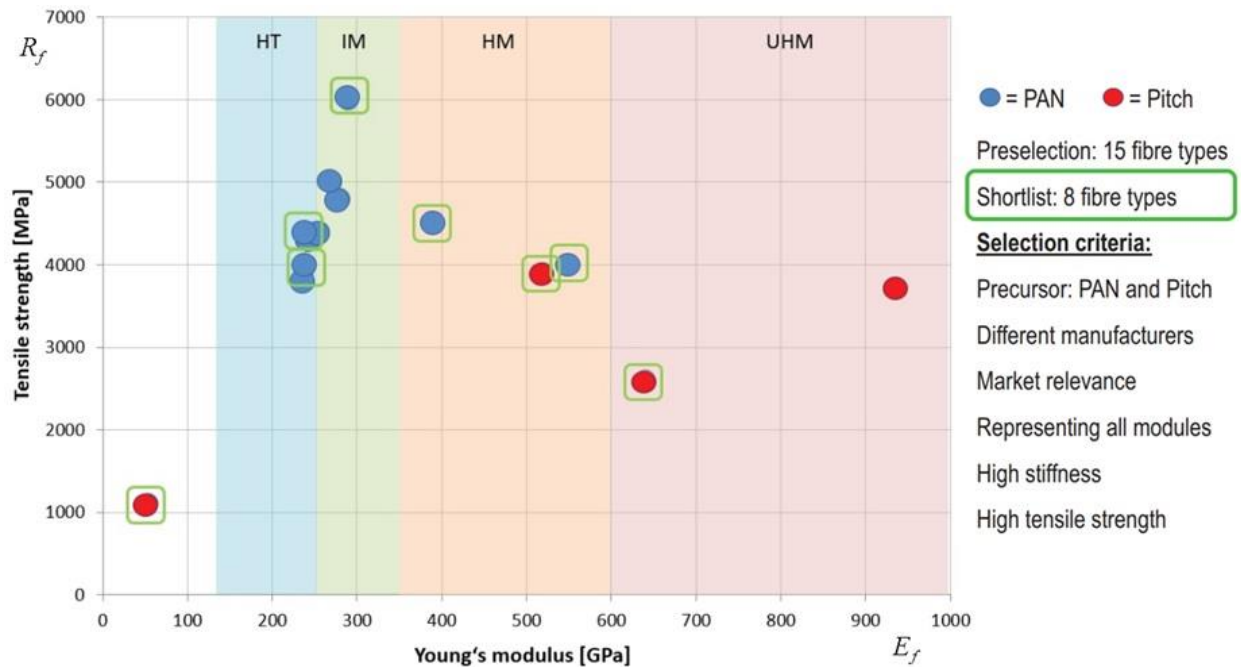


Fig. 7-2: Graph des Zusammenhangs Faserzugfestigkeit R_f vom E-Modul E_f der ausgewählten Fasern [CarboBreak]

In Fig.7-3 sind die aufgesammelten Fragmente eines Schleifvorgangs dargestellt (Achat- und Zirkonoxidkugeln sind in den Mühlen).

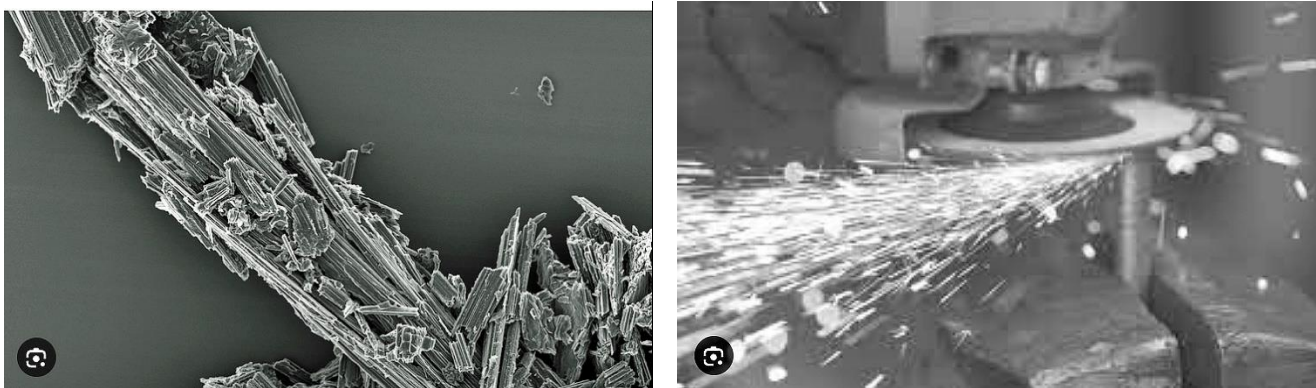


Fig. 7-3: (links) aufgesammelte Fragmente (Welche Faser?) eines Schleifvorgangs (rechts). [BAuA-Fotos]

Versuchsdurchführung:

„Gemahlen werden CF-Rovings (nur mit Schlichte, ohne Polymermatrix-Durchtränkung???, Frau Große bitte richtig stellen) der 8 ausgewählten CF. Die Bruchstücke werden in der Mühle ‘Mixer MILL MM 200‘ gemahlen, was einem ‘Worst.case-scenario‘ entspricht. Dann werden die fein ‘gemahlene‘ CF-Restbruchstücke in Isopropanol aufgeschwemmt, verdünnt und auf einen Kernporenfilter gezogen. SEM-Bilder werden automatisch an zufälligen Stellen auf dem Filter

aufgenommen. Alle Objekte auf diesen Bildern werden hinsichtlich ihrer Länge, ihres Durchmessers und anderer morphologischer Parameter untersucht“.

Tabelle 7-2 enthält für die Eckpunktfasern die erhaltenen Resultate an langen (HAR-FO) und kurzen (WHO-FO) Faserobjekten, d.h. von Faser-Fragmenten.

Table 7-2: Results of the spall fracture tendency screening of HAR-FOs and WHO-FOs

Fibre No.	Precursor	Percentage of HARFO found	Fibre No.	Precursor	reduction of mean fibre diameter [%]	Fibre No.	Precursor	WHOFO per milled cm
11	mPitch	74	11	mPitch	87	11	mPitch	14263
10	mPitch	47,6	10	mPitch	83	14	mPitch	4499
14	mPitch	39,5	14	mPitch	79	10	mPitch	3649
8	PAN	14	1	PAN	76	1	PAN	575
15	PAN	13	12	iPitch	57	12	iPitch	285
5	PAN	12	4	PAN	52	5	PAN	245
1	PAN	10,5	5	PAN	48	4	PAN	175
12	iPitch	5	8	PAN	46	8	PAN	167
4	PAN	5	15	PAN	36	15	PAN	127

“A distinctive bandgap between the fibers with higher and lower propensity (Neigung) to produce splinters is revealed. PAN-CF and pitch-CF break along their axis and can form WHO-‘Fibers’ under mechanical stress. Precautionary measures are highly recommended when working with either materials”

Fig.7-4 zeigt in logarithmischer Auftragung die gefundenen Faserstaubmengen-Ergebnisse.

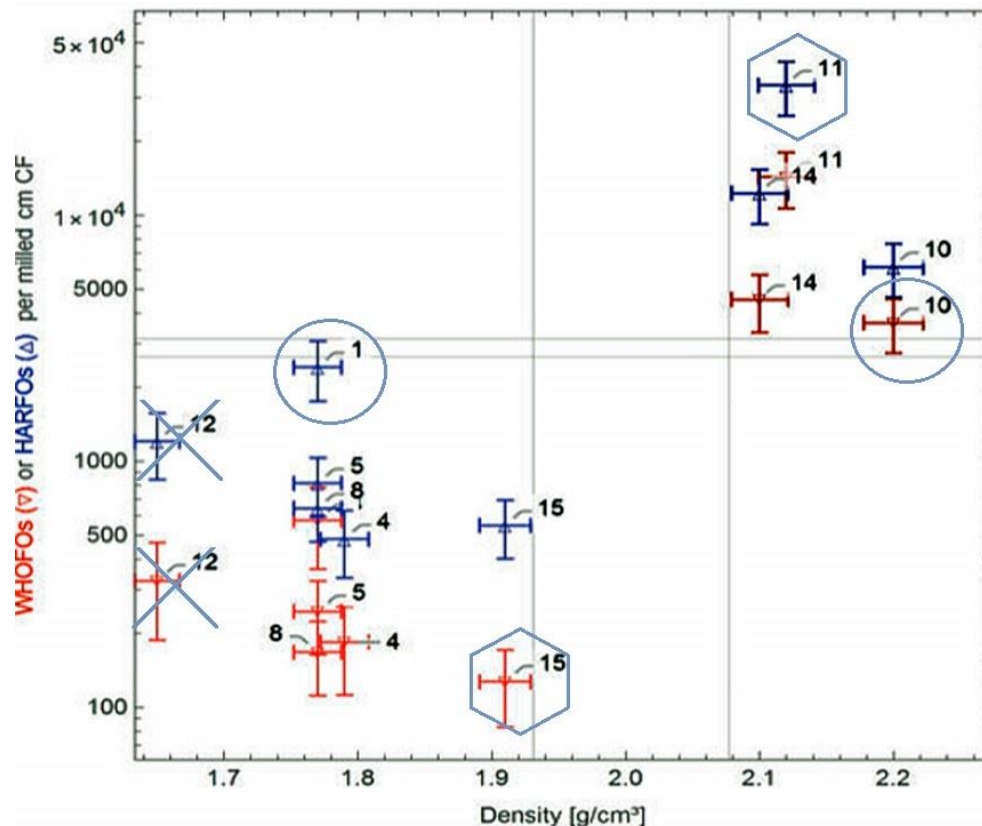


Fig. 7-4: Amount of HAR-FOs and WHO-FOs per milled cm CF shown over the density of the chosen fiber types. HAR-FO High Aspect Ratio-Fiber Object (halb-logarithmische Darstellung!) [Gro]

Fig. 7-5 komplettiert mit zwei SEM-Bildern den Unterschied zwischen einer bestimmten PAN-CF und einer bestimmten Pech.-CF. Die unterschiedliche Kristallstruktur ist erkennbar.

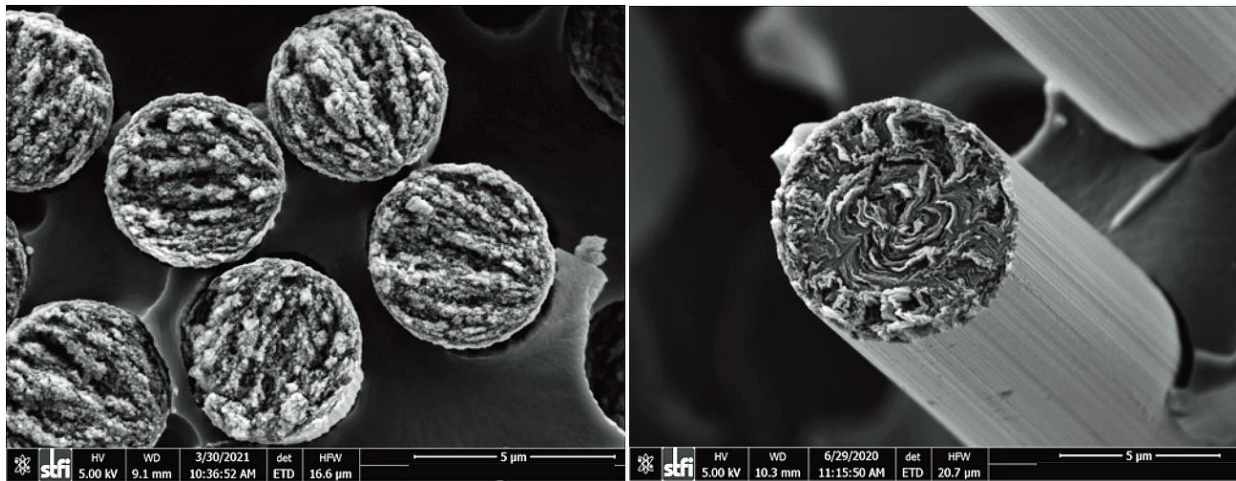


Fig. 7-5: SEM images of the fracture surfaces of a PAN-CF (**Welche Sorte hier?**) and a pitch-CF with similar mechanical properties [CarboBreak]

Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) <https://www.igf-bgrci.de> > Microsites > IGF > Schlema IX
 Ergebnisse der Morphologischen Charakterisierung. S. Plitzko Schlema IX 21.03. ... Beispiel Carbonfasern :
 ... Bruchstücke mit kritischer Morphologie, [siehe. 23 Seiten BAuA-Info]

7.3 Meilensteinbericht CarboBreak

Im August 2020 gab es mit dem Meilensteinbericht eine Zwischenbilanz im Forschungsprojekt:

- ✓ „Es konnte festgestellt werden, dass beim Umgang aller im Projekt untersuchten CF-Typen von einer Freisetzung alveolengängiger Faserfragmente ausgegangen werden muss. Allerdings konnte bei einer Dichte der CF über $1,95 \text{ g/cm}^3$ (s. Tabelle 7-1 und Fig.7-3), eine erhöhte Freisetzung von gesundheitsschädlichen Faserbruchstücken beobachtet werden. Dies trifft hauptsächlich auf PechCF zu. Diese Ergebnisse konnten durch Arbeitsplatzmessungen in Abhängigkeit von Bearbeitungsprozessen und eingesetzten Schutzmaßnahmen bestätigt werden. Mit dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekt wurden erste Wege für eine arbeitshygienische Beurteilung unterschiedlicher CF-Typen aufgezeigt und es werden Hinweise für ein sicheres und nachhaltiges Design für Materialentwicklungen gegeben.“
- ✓ „CF- und CFK-Stäube werden erst bei sehr hohen Konzentrationen schwach entzündlich wirksam. Die ‘praktisch Unlöslichkeit‘ einer CF zeigt umgekehrt Biobeständigkeit. Weitere systematische Untersuchungen zur genauen physikalisch-chemischen Charakterisierung der Partikel und Fasern sind notwendig, um eine sichere Einstufung und die Optimierung von Schutzmaßnahmen vornehmen zu können“.

Fazit für den Autor aufgrund bisheriger CarbonBreak-Ergebnisse:

- * Fig-7-4 zeigt einen signifikanten Abstand der Standard PAN-CF von den Pech-CF
- * Die Ergebnisse von CarboBreak erlauben es nicht (hauptsächlich ist natürlich noch klar zu stellen) bereits Schlüsse zu ziehen, Pech-CF und inwieweit auch UHM-PAN-CF als kritisch einzustufen sind. Diese beiden CF-Sorten sind wohl kristall-verbunden, was zu anderem Aufsplitterungsverhalten führt

als bei den nicht so graphitisierten Standard-PAN-CF. Aufgabe: Klärung der Kristallstruktur von UHM-PAN-CF. Wünschenswertes Ziel dadurch: 'Freigabe' der Standard-PAN-CFs.

- * CarboBreak-Ergebnis: CF-Dichte $\rho_f > 1.9 \text{ g/cm}^3$ (sind praktisch nur PechCF) führten zu den höchsten Feinstaubwerten F/m^3 . Die Feinstaubmenge steigt auch mit der Filamente-Anzahl k im Garn (Roving, Tow), dem CF-Ø und der Festigkeit R_f . (Werkstoff-Physik: Gleiche Dichte ρ kann bei ganz unterschiedlichen Kristallstrukturen zu finden sein, wie ja die PechCF GRANOC NGF XN belegt und bekanntlich Metalllegierungen zeigen)
- * Innere Kristallstruktur der CF und Morphologie der Bruchstücke müssen bekannt sein
- * Die Pech-CF ist nicht anwendungstechnisch von Interesse
- * Es ist zu bedenken, dass bei FKV-Bauteilen – auch in komplizierten Bruchlastfällen - keine räumlichen Beanspruchungen wie in der Kugelschwingmühle vorkommen und selbst ein Quetschen (s. Fig.) praktisch nicht vorkommt. Man muss also die notwendigen Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz oder bei einem Unfall getrennt vom Bauteileinsatz betrachten
- * Fragen zu den Aufsplitterungsgründen:
 - In wie weit ist ρ_f wirklich der wesentliche, zusammenfassende Parameter für die Feinstaubmenge
 - Welchen Einfluss haben die physikalischen Eigenschaften E_f , R_f , $\epsilon_{fracture}$, CF-Ø
 - Welche unterschiedliche Kritikalität haben HAR- und WHO-FOs?
 - Was haben PAN-CF1 und Pech-CF10 gemeinsam?
 - Was unterscheidet PAN-CF15 von Pech-CF11?

Fig.7-6 zeigt für CNT-Materialien eine Klasseneinteilung der BAuA der 'Faser'-Objekte.


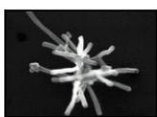

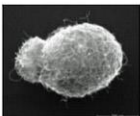

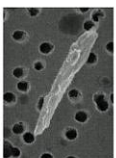

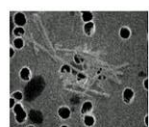

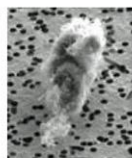






	Individual Object	Cluster	Agglomerate	
Low-Aspect Ratio	[BAuA]	LARFC (GBS-Cluster) Agglomerated and Countable	LARFA (GBS-Agglomerate) Agglomerated and Un-countable	Low-Aspect Ratio
				 
High-Aspect Ratio	HARFO Individual Fibre Object	HARFC HAR-Cluster	HARFA HAR-Agglomerate	High-Aspect Ratio
	 	 	 	
Satisfies WHO-Definition	WHOFO Individual WHO-Fibre Object	WHOFC WHO-Cluster	WHOFA WHO-Agglomerate	Satisfies WHO-Definition
	 	 	 	

Fig. 7-6, CNT-contents : Scheme of various morphologies of nano-scaled 'Fiber' Objects (FOs). Int. BAuA Symposium on WHO fibers [Heu16] 20.04.2016 — Scheme of various morphologies of nano-scaled fiber objects. LAR = Low Aspect Ratio < 3 ; HAR = high aspect ratio > 3 ... Individual Fiber (HAR-FO). O = Object; C = cluster with low number of Os individually distinguishable; A = agglomerate = Os in higher concentration with overlap and predominantly not individually distinguishable.

7.4 Ausblick Neue Faern

Für die Bauindustrie ist die untere Einteilung von Fasern sehr wichtig, um einen Überblick zu bekommen, Fig.7-7, und weiter um eine Bewertung durch das Bundesinstitut für Bau- Stadt und Raumordnung BBSR und /oder die BAuA zu erfahren.

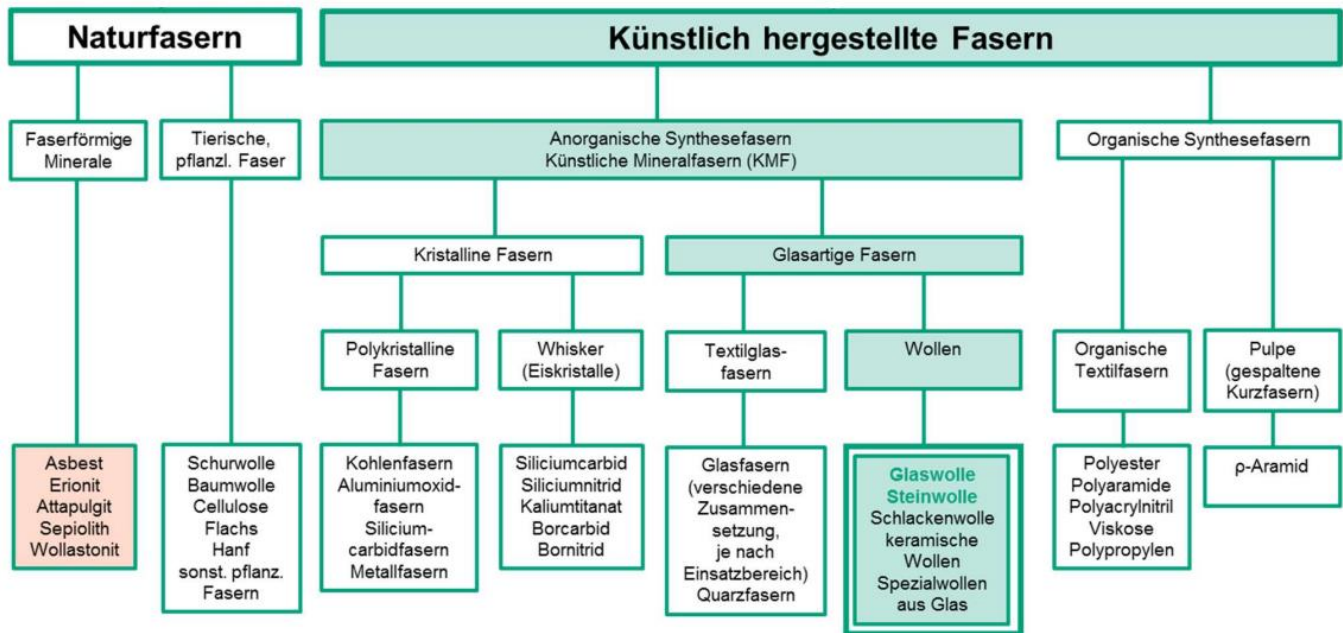


Fig. 7-7: Einteilung der Fasern (erstellt im Rahmen ‚Einstufung künstlicher Mineralwolle‘).
[BBSR11] Bundesinstitut für Bau- Stadt und Raumordnung: Künstliche Mineralfaserdämmstoffe BBSR-
Berichte KOMPAKT, 1/2011

Dauer der Tätigkeit von Rettungseinsätzen : Selten und viel kürzer als Arbeitsplatztätigkeiten beim Bearbeiten und Herstellen von Bauteilen

Dabei ist vielfach zu beobachten, dass durch Unkenntnis und unsachliche Argumentationen Ängste geschürt werden, die einer realistischen Risikoabschätzung im Wege stehen, Für eine Gefährdungsbeurteilung ist jedoch in jedem Falle auch der Umfang einer möglichen Exposition zu berücksichtigen; dazu gehören auch die Häufigkeit, Dauer und Höhe einer Exposition. Zur Beurteilung der Gefährdung und der Einleitung von Schutzmaßnahmen stehen Konzepte zur Verfügung (siehe Abschnitte 5 und 6), die auch für die Exposition von Feuerwehrkräften und anderen Personen von Rettungsdiensten herangezogen werden sollten.

8 ANNEX Anwendungsbeispiele von CFK im Bauwesen

Anwendungen von polymer- und betonverstärkten Strukturen im Bauwesen sind zumeist nicht gut bekannt und sollen deshalb hier kurz vorgestellt werden, beginnend mit Fig.8-1 zu verwendeten Halbzeugen. Zwei, für den Bau wesentliche Halbzeuge sind die biegsame CFK-Rolle (rechts unten) und die Baustahl(gitter)matten-analoge steife CFK-(gitter)Matte (rechts oben)

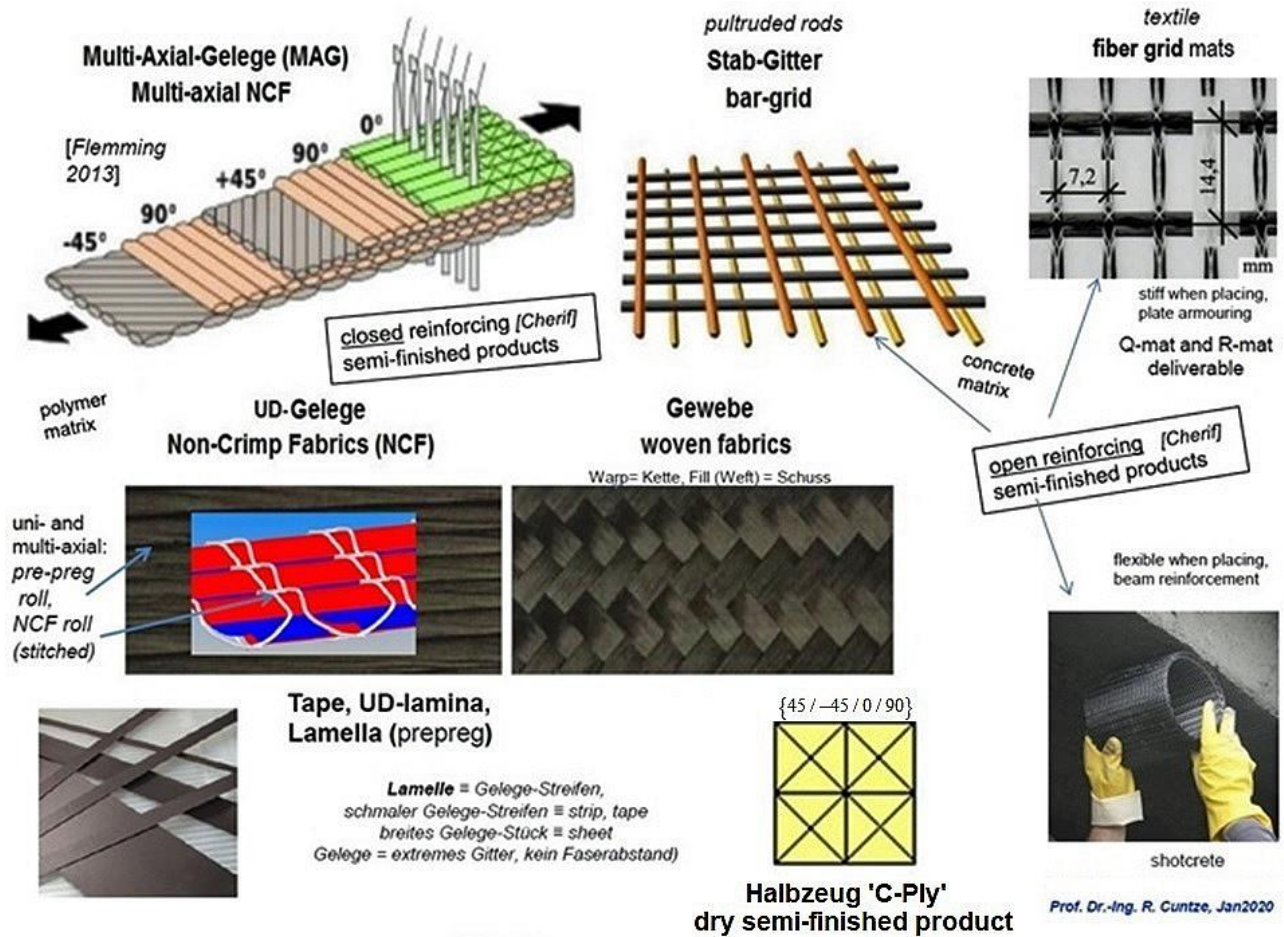


Fig.8-1: Fiber-reinforced semi-finished products in civil engineering, GFK, CFK, BsRK.



Fig.8-2: Mekkha, CFRP- Pilgrim path construction around the Kaaba. Inner - Φ 80 m, 400 t CFRP [Premier Composite Technology PCT, Dubai, Vancouver.sun.com]



Fig.8-3: Passenger bridge, 2015: Length 15 m, width 3 m, mass 14 t. Erection during 1 night
 (up) a solidian GRID Q95-CCE-38 fiber grid (mat) [christian.kulas@solidian.com, www.solidian.com]
 (down) First, purely CF-reinforced concrete bridge in the world. Albstadt-Ebingen. 2015.

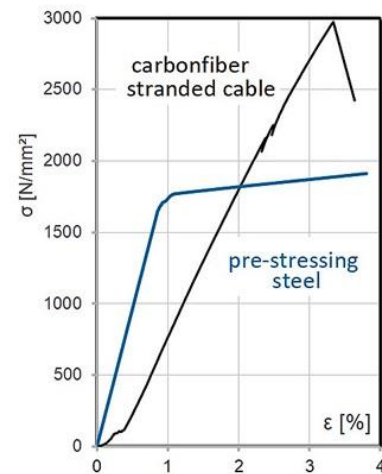


Fig.8-4: Carbon Fiber Composite Cable (CFCC) from Tokyo Rope, cable strand diameter 12.5 mm
 E-Modulus 155000 N/mm², $T_{max} = 130$ °C. Static tensile tests: fracture load 274 kN per cable or strength
 3000 N/mm² per cable strand (Kabellitze) [from presentation F. Jesse]

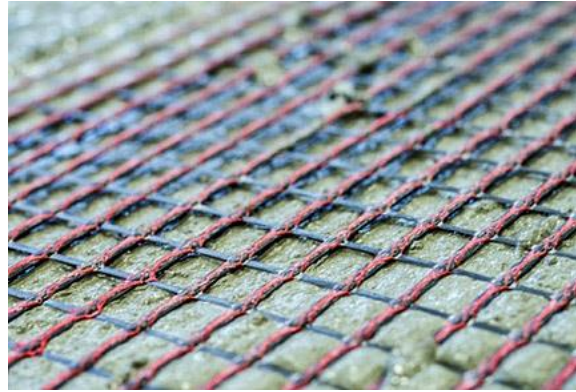


Fig.8-5: Bridge Wurschen, 2022: (left) Superstructure made exclusively of carbon concrete, shell construction. (right) Textile FRP mats in the super-structure) (Foto: Stefan Gröschel, IMB,TU Dresden)



Fig.8-6: The Stuttgart Stadtbahn bridge, installed over the A8 motorway on May 3 in Germany, is the world's first network arch railway bridge (127 m) that hangs entirely on tension elements made of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP). The 72 hangers are produced by Carbo-Link AG (Fehraltorf, Switzerland) supported by EMPA (Urs Meier. Thanks Urs), with Teijin carbon fibers (Wuppertal, Germany), Tenax. The bridge meets installation, mass and sustainability goal

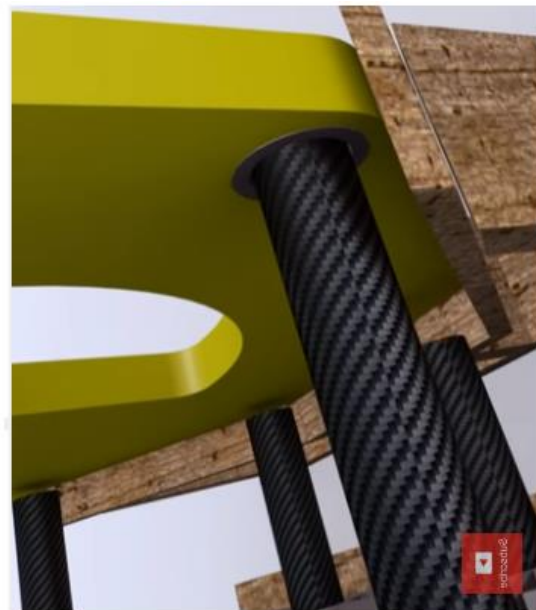


Fig. 8-7: (left) Construction of a 31-m high lighthouse at the Port of Valencia, made from CFRP and GFRP; (right) CFRP tube detail scheme, 2015. José David Jiménez Vicaria MSc Civil Eng., Ignacio Pascual Navarro, Enrique Navarro Lera MSc Mech. Eng., Pablo Sanchez Sierra MSc Mech. Eng. & Eva Martinez Barriguete Chemist (2018) An Innovative New Lighthouse at the Port of Valencia, Structural Engineering International, 28:4, 546-549, DOI: 10.1080/10168664.2018.1464377

“Used in civil-engineering applications due to the high strength, light weight and good resistance to corrosion of these materials. The various elements of the lighthouse were manufactured and assembled in Madrid, Spain and the structure was installed in just a few hours in the north extension of the Port of Valencia, Spain in February 2015, Technology Centre of Construction business of ACCIONA. Due to the reduced impact on port operations during its installation and the anticipated low maintenance needs during its service life, this new lighthouse is a good example of innovation, creativity and sustainability in construction. The lighthouse is a structure that essentially consists of two elements: the coffer that serves to house the equipment necessary for the operation of the lighting system of the beacon and the element that supports the structure itself. The lighthouse structure consists of 8 tubular columns made of carbon fibre measuring 31 meters high. The columns have a circular section with a diameter of 250 mm and a thickness of 20 mm. These columns are positioned on the ground at the vertices of an octagon located within a 4.50-metre circle in diameter at its base and 4.00 metres in diameter at its crest. The connection, a horizontal stiffening between the eight pipes, materialises through a dual system: 4 horizontal octagon-shaped rings composed of fibreglass pipes measuring 190 mm in diameter and 20 mm thick, arranged every 6.00 m. 5 octagon-shaped horizontal forged panels, made from 'sandwich' panels measuring 0.20 m thick, arranged every 6 meters.

Focus points have been: Polymers and plastics testing, Characterization of plastics and composites, Mechanical properties testing, Physical properties testing, Thermal Properties, Optical properties testing, Rheological properties testing, Polymer and plastics chemical analysis, Analysis of micro-plastics, Biodegradability and compostability testing, Analysis of recycled plastic waste and materials, Coatings tests, Durability and resistance testing, Emission tests in car interiors, Migration testing, Packaging functionality, NIAS and how to avoid them.

**Ein fast neuer Baustoff, Carbonbeton,
ist die neue, interessante Herausforderung für junge Bauingenieure,
die das Bauwesen nachhaltiger machen wollen!**

9 ANNEX Recycling von Fasern und Composites

Recycled (index r not R) means: A product is produced that can be sold.

Nachhaltigkeit durch Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz bedeutet Recycling. Beim Recycling werden wieder verwendbare Restwertstoffe gesucht: Polymere, Fasern, Beton, Stahl.

Problem dabei ist, für Verbundwerkstoffe gilt, dass der Strukturwerkstoff gleichzeitig mit dem Produkt entsteht. Wunsch ist also 'Design-to-Recycling', um nur minimalen Abfall von der Wiege bis zur Bahre (cradle-to-grave) zu erzeugen.

Die 90. Umweltministerkonferenz hat sich im Juni 2018 (TOP 44) mit dem Thema „Innovative und ressourceneffiziente Baustoffe“ befasst und nachfolgenden Arbeitsauftrag erteilt: „Um offene Fragen bei der Betrachtung des Endes des Lebenszyklus und der Verwertung von Baustoffen zu bearbeiten, wird die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) Verstärkte Berücksichtigung des Kriteriums Ressourceneffizienz bei der Bewertung der Nachhaltigkeit im Bauwesen ansetzen ([verstaerkte-beruecksichtigung-der-ressourceneffizienz-bei-der-bewertung-der-nachhaltigkeit-im-bauwesen langbericht 2 1629269218.pdf \(laga-online.de\)](https://www.laga-online.de/verstaerkte-beruecksichtigung-der-ressourceneffizienz-bei-der-bewertung-der-nachhaltigkeit-im-bauwesen-langbericht_2_1629269218.pdf)).

Dabei gibt es natürlicherweise Schwierigkeiten, wie Perry et al. aufzählen in “What are the 3 reasons why recycling of composites is difficult [Per12]”?:

Fehlende Märkte, hohe Recyclingkosten und eine geringere Qualität der Rezyklate im Vergleich zu Neumaterialien sind große Kommerzialisierungsbarrieren und werden die weitere Verwendung von recycelten Verbundwerkstoffen in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt sowie anderen Maschinenbau- und Konsumgütern behindern. Das zukünftige Wachstum des Composite-Herstellers ist "green" und "Cheerful (fröhlich)", aber es setzt stark auf eine schnell wachsende Recyclingtechnologie und die Anwendung von Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) und nachhaltigem Denken.

9.1 Carbonfaser-Markt

Fig.9-1 zeigt das geschätzte Wachstum der globalen durchschnittlichen CF-Nachfrage von 2010 bis 2024

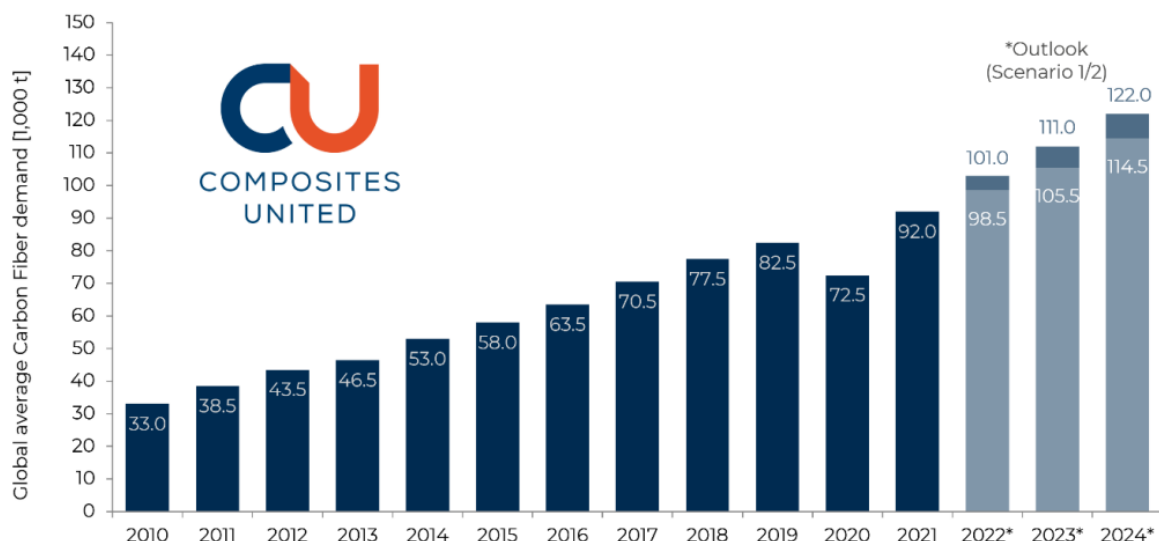


Fig.9-1: Carbon Fiber growth rate (estimation 03/2022) [Composites Marktbericht].

Fig.9-2 gibt einen Überblick über die Anteile der auf dem Markt befindlichen Strukturmaterialien im Jahr 2016. Es zeigt, wie unbedeutend der CF-Anteil in Bezug auf seine Herkunft Öl ist und auf den Materialkonkurrenten Stahl. Dies ist von grundlegendem Interesse und hilfreich für Diskussionen.

Im Bauwesen ist CF noch kein wirklicher Markt, was im Wesentlichen auf die derzeitigen Vorschriften der Behörden zurückzuführen ist, die einen schnelleren Erkenntnisgewinn in der Anwendung noch nicht zulassen. Zuverlässige Erkenntnisse sind aber wiederum das Ergebnis einer breiten Anwendung. Weiter ist es wichtig, dass die vorliegenden Forschungsergebnisse für die Weiterentwicklung der CarbonBeton-Anwendungen frei zur Verfügung gestellt werden (*Der Verfasser erinnert an die ihm früher vorliegenden Bemessungsblätter für eine schnelle Dimensionierung. So etwas wäre sehr CarbonBeton-förderlich*).

Verbesserung der Ökobilanz durch CarbonBeton:

- * Brandschutz und Wärmeschutz verlangen bestimmte Betonüberdeckungen. Die Wanddicken können mit Carbonbeton aber minimal werden.
- * In die Bau-Ausschreibungen gehören also Energieaufwand und Wartung der Bauteile
- * Erst Vorspannung hilft, die nicht-rostende, ermüdungsresistente CF maximal ausnutzen zu können und damit auch durch Druckvorspannung den nicht zugfesten Beton. Preiswertere, niedrigere Beton-Druckfestigkeiten sollten dadurch reichen.

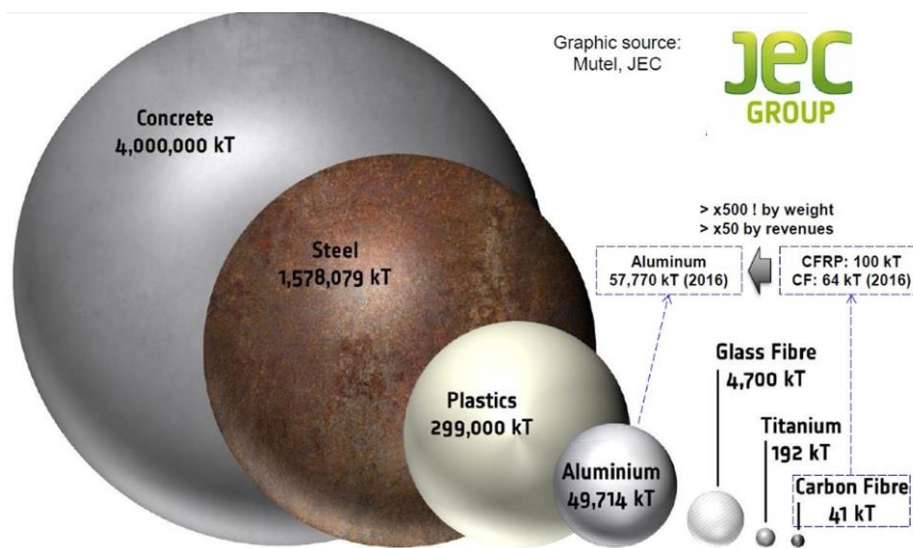


Fig.9-2: Structural materials, year 2016

CF total / Steel = 1/10000.
 In Germany it is CF total / concrete reinforcing steel \approx 0.1%.
 Concrete / Crude Oil \cong 1, GF / CF \cong 100.
 A single car consumes more than 1 t oil / year.

Information:

- * Für CF gilt [aus Cun 23]: 40000 t CF würden nur etwa $40/4000000 = 0,001$ % Rohölförderung benötigen. Warum wird diese Verbrauchsmenge sehr oft als so sehr umweltschädlich angesehen? Öl-Ressourcenverknappung ist also eigentlich kein Argument, sondern lediglich die notwendige Energie für die Faser-Herstellung. Recycling ist natürlich immer gut aber ebenfalls energieintensiv.
- * Eine jährliche CF-Produktion von 50000 t entspricht 4 min Stahlproduktion (2018). Die jährliche Betonproduktion entspricht ungefähr der Ölfördermasse.
- * Wenn der Markt für den massesparenden Carbonbeton an Bedeutung gewinnt, muss die CF-Produktion vervielfacht werden. Siehe auch. Fig. 2-5.

9.2 Generell zu Material-Recycling und Recycling zu Bauteilen von reduzierter Größe

In Hinblick auf die Entsorgung, Deponierung von CFK oder CF ist eine thermische Verwertung zu vermeiden. Die notwendigen CF-Verbrennungstemperaturen werden in den Öfen nicht erreicht sondern reichen nur für die Polymere aus. CF können im Ofen durch Oxidation allerdings ihren Durchmesser verringern Richtung kritischer $3\mu\text{m } \varnothing$. Deswegen ist es wichtig, CF-Produkte nicht mit dem Hausmüll zu entsorgen.

Die Recyclingfasermenge r-CF beträgt in 2018 etwa 50 % der angefallenen ca. 25000 t/Jahr aus Produktionsabfällen, Prepreg-Kühlunterbrechungen, Schlechtteilen durch Herstellungsfehler, Windmühlenblättern etc. Recyclat-CF (r-CF) wird etwa 50 % des neuen Preises kosten [Kühnel, Michael, Bitte prüfen. Deine neueste Literatur einfügen].

Die grundlegenden Recyclingmethoden sind Pyrolyse oder die Solvolyse zum chemischen Auflösen des Harzmaterials in der Matrix aus einem ausgedienten FK-Verbundbauteil, so dass Fasern und Harz wiederverwendet werden können, siehe das Schema Material-Recycling in Fig.9-3. In der CarbonBeton-Industrie gilt Mechanisches Recycling. Beim CarbonBeton kann noch die mineralische Matrix dazu kommen, wodurch die Anwendung der Pyrolyse entfällt. Es gilt:

- * Ein verfahrenstechnisch und ökonomisch aufwendiges Trennen der einzelnen Bestandteile effizient auszuführen.
- * Dabei gilt es neben den Fasern (nicht nur für CF) für das Trennen zu beachten: Beschichtung (Avivage) der Fasern durch unterschiedliche Schlichte; Durchtränkung (Imprägnierung) des Faserstrangs durch unterschiedliche Matrices (Harzsysteme EP, TP); und bauteilangepasste Schutz-Beschichtung des ausgehärteten Composite-Bauteils.



Fig. 9-3 : Schema Materialrecycling, Beispiel GFK, CFK.

VDI-Nachrichten 19/2018, Gudrun Schmidt. Panther Media. Quelle: ForCycle

Ein Pyrolyse-Produkt wird erzeugt durch thermische Behandlung von Compositebauteilen in einem Ofen, in dem das Harz, das die Laminatschichten zusammenhält, verdampft und ein Material hinterlässt, das dann noch gereinigt wird (*energieaufwendig also*). Dieser Faser-Restwertstoff kann im Fall von Endlosfasern zu leider zu wenig geradfaser-ausgerichteten r-CF-Halbzeugen verarbeitet werden, die gegenüber den geraden originären Halbzeugen natürlicherweise Steifigkeits- und

Festigkeitsnachteile bezüglich statischer Festigkeit, Ermüdung und Kriechen aufweisen. Für die sogenannten tragenden Bauteile kann es somit keine allgemeine Anwendung geben. Ein Faser-Restwertstoff wird an die Elektronikindustrie für Autobauteile-Herstellung sowie für andere Produkte verkauft.

Ein Solvolyse-Produkt wird erzeugt

.....

Mögliche CF-Recycling-Niveaus:

1. Recycling der CFRP- Bauteile mit Materialtrennung und stofflicher Verwertung.

BASF kann z.B. chemisch aus Kunststoffbauteilen Pyrolyseöl herstellen, das wie Erdöl weiter verarbeitet werden kann.

2. Direkte Wiederverwendung von Teilen des Bauprodukts.

Beispiele zum Windrotorblatt-Recycling‘:

- Repurposing (Umnutzung) and pyrolysis: Das Unternehmen Anmet (Szprotawa, Poland): arbeitet an der Entwicklung einer auf Pyrolyse basierenden Lösung zur Rückgewinnung von ‘geraden‘ CF aus Windrotorblättern mit einer Festigkeit von bis zu 90% der Festigkeit von Frischfasermaterial. Die Universität testete auch die Ofenemissionen und arbeitete an Verbesserungen in ihrem Filtersystem. Die Umnutzung von Rotorblättern, anstatt sie durch Brennen, Schleifen oder andere Mittel vollständig zu zerlegen, verbraucht weniger Energie, ist kostengünstiger und erzeugt weniger Emissionen und Staub.
- Franz Weißgerber, Carbonwerke Wallerstein:
Heraus schneiden von kleineren Teilen aus den Blättern. Erhalt der Eigenschaften. Restabfall-Partikel in den Asphalt wie auf Abschnitt der Straße zwischen Wallerstein und Löpsingen.
- TransRotation - Reuse of rotor blades in architecture [Ina-Marie Orawiec].

Idee "Design-to-Recycling":

Für zukünftige Anwendungen ist es sinnvoll, das Recycling durch ein "Design-to-Recycling" zu verbessern und zu vereinfachen.

Fig.9-4 zeigt diese Idee für Carbonbeton. Zerkleinerung mit sehr gutem Aufschluss ist nach den Grundregeln "Design-to-Recycling" möglich [M. Kim??]

9.3 Mechanisches Recycling von CarbonBeton (Polymermatrix und mineralische Matrix)

CarbonBeton ist von Anfang an bis zum Ende zu denken [NRW] und das auch beim Recycling. Dies beginnt bereits bei seiner Zusammensetzung:

→ Normal-Beton, Feinbeton (Mörtel) + CF-Matte + CF-Stäbe + Abstandhalter + Stahl-Stäbe

Nach dem Brechen ergibt sich ein sehr gemischtes Haufenwerk.

9.3.1 Einführung

Beim Mechanischen Recycling im Bauwesen findet der Rückbau mittels Backenbrecher, Prallmühle, Hammermühle statt. Es werden folgende Probleme bei der LAGA gesehen:

1. Faserhaltige Stäube in Filtereinheiten von Bauschuttrecyclinganlagen

- Um hochwertiges Recycling zu erzielen Trennung der Fraktionen nach dem Brechen, aber Verteuerung des Recyclings durch zusätzliche Separationstechniken
- Schlechte Vermarktung des CarboBetonbruchs aufgrund hohen Feinanteils < 4 mm.
- Unschöne Verschleppung von CF in den Stoffkreislauf
- Verwertung der Fraktion < 2 mm, da diese schwierig sortenrein zu sortieren und hinsichtlich lungengängiger CF-WFO-Partikel besonders zu beachten ist
- Forschungsbedarf zur Lokalisierung von Carbonbewehrung in ungestörtem Beton, da Carbon im Gegensatz zu Stahl nicht magnetisch zu orten ist.

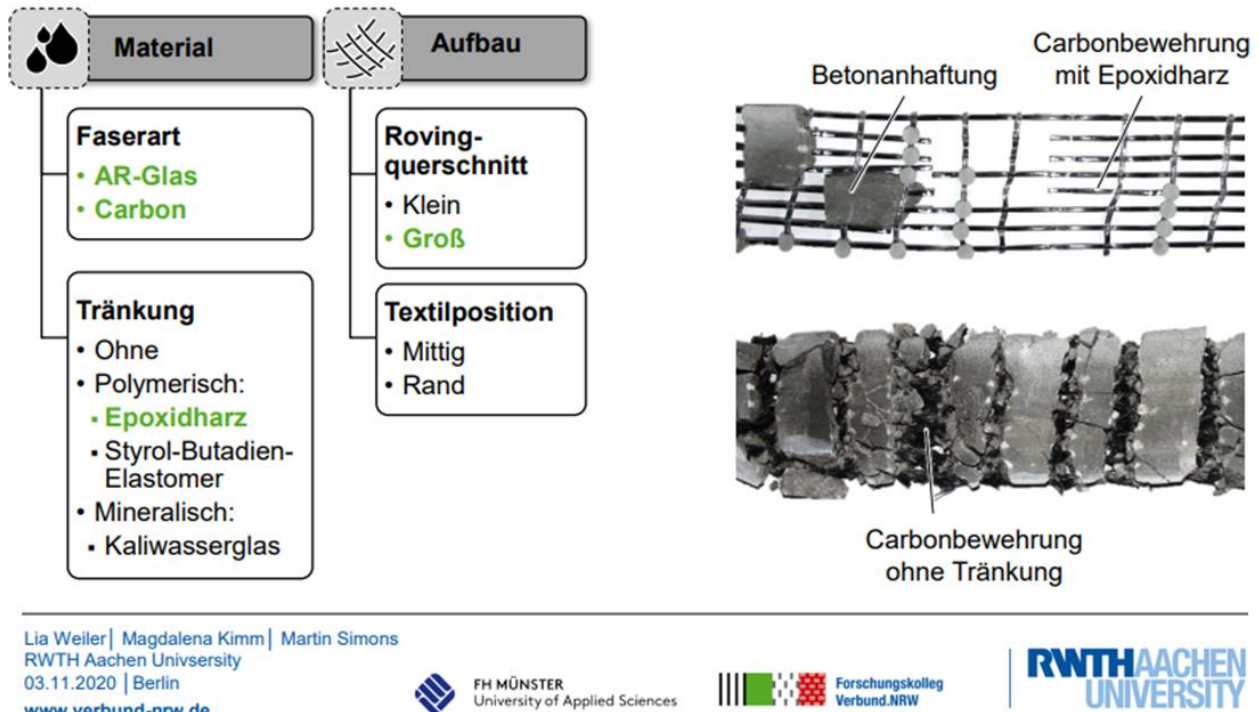


Fig.9-4: Design-to-Recycling, Beispiel CarbonBeton [NRW-Projekt]

LAGA-angestrebte Niveaus der CarbonBeton-Recycling-Produkte:

- Brechen des Carbonbetons und stoffliche Verwertung des Verbundmaterials im Straßenbau,
- Brechen des Carbonbetons, Trennen der Materialien, Pyrolyse der CF und stoffliche Verwertung der Gesteinskörnung im Straßenbau sowie
- Direkte Wiederverwendung von Teilen des Bauprodukts (lösbare Anschlüsse der Bestandteile, Fügetechnik). Prinzipiell können sowohl mechanische Fügetechniken (Schrauben, Stecken, etc.) als auch chemische Fügetechniken wie Kleben verwendet werden.

Dazu Handlungsempfehlungen der LAGA:

- * Keine Verwendung von Carbonkurzfaserbeton, um Verschleppungen in den Stoffkreislauf zu vermeiden und eine hochwertige Verwertung des Betons zu ermöglichen (Adressaten: DIBt als Genehmigungsstelle für die Zulassung derartiger Baustoffe; Länder als Verordnungsgeber für die Landesbauordnungen). (Rolf im DIBt kontaktieren)
- * Vermeidung von Faserverbänden und Mischungen aus anorganischen und organischen Bestandteilen grundsätzlich die Verwendung vermieden werden. Beispiele dafür sind zementgebundene Holzfaserplatten, kurzfaserhaltige CFK, Mörtel und Betone.

9.3.2 Erfahrungen und Vorschläge

(1) Der Verband C³ (Carbon Concrete Composite)

Entsprechend [C3. Stand 2021-03-03 CFRP-reinforcements in structural parts] sagen Abdkader [Abd???) und Minar:

„Der erste Schritt Shreddern unterscheidet sich gar nicht so sehr von dem beim gewohnten Stahlbeton. Das Material wird in grobe Stücke zerkleinert, Beton und Bewehrung getrennt. Da Carbon im Vergleich zu Stahl nicht magnetisch ist, sind bei der Trennung andere Verfahren nötig. Diese funktionieren kamerabasiert und werden beim Recycling schon heute bei Glas oder Kunststoff verwendet. 98 Prozent Sortenreinheit erreicht der Verband C³ schon heute. Lediglich 2 % Betonrückstände befinden sich noch im abgetrennten Carbonanteil. Übrig bleibt ein gänzlich unsortierter Haufen Fasern in verschiedenster Länge. Verwendet werden können alle CF, die mindestens eine Länge von 40 Millimetern haben. Alle anderen werden automatisch abgesaugt und sollten natürlich weiter verwendet werden). Heraus kommt ein grobes Band, aus dem später ein neuer Carbon-Faserstrang (Garn) entsteht, der statisch bis zu 80% der Festigkeit erreichen soll. Für gleiche statische Belastung kann man den gewünschten Faserstrang ja etwas dicker machen“.

(2) STFI-Chemnitz

Ziel eines Pyrolyse-Vorhabens war u. a. die Herstellung eines Hybrid-Garns aus den recycelten Carbonfasern (ca. 50 % Massenanteil) und Polyamidfasern um hieraus zukünftig eine neuartige Hybridgarnkonstruktion für den Wiedereinsatz im Bauwesen zu entwickeln. Hier stellt sich die Frage, ob die Hybridfasern aus CF und Polyamid gemeinsam recycelt werden können (LAGA). Bei Sandwich-Strukturen aus CFK und GFK ist eine Entsorgung heute schon problematisch, da die beiden Faserverbundmaterialien nicht für dasselbe Verwertungsverfahren geeignet sind.

(3) PreConPro & G.tecz Collaboration

Diese haben neben dem Zement nur Recyclingmaterialien für ihren r-Beton verwendet. Da dieser Beton durch Packungsdichteberechnungen nano-optimiert ist, liegt hier ein Baumaterial hoher Nachhaltigkeit vor. Die Reduzierung des verwendeten Zements durch den Einsatz von Asche (gibt es aber nicht beliebig viel) senkt hervorragend den CO₂-Fußabdruck. Erreichte Werte sind die Druckfestigkeiten: nach 7 Tagen 23,1 MPa und nach 28 Tagen 33,2 MPa. Zum Vergleich NormalBeton C60/75 hat $f_{ck,cyl} = 60 \text{ MPa} = 60 \text{ N/mm}^2$.

(Trifft die ZIM-Projekt-Idee des Autors "Nano2Beton", 2014-2015, Hochleistungsbeton, optimiert mit CNTs wie Multi-Wall Carbo-Nanotubes und nanostrukturiertem Zement, mit und ohne Kurzfaserbewehrung aus BsF- und CF. Der Einsatz von speziell aktivierten CNTs und der Einsatz von nanostrukturiertem Zement tragen zur CO₂-Einsparung durch die Vermeidung energieintensiver Klinkerverbrennung bei. optimierten Korngrößenverteilungen und Einbau von Asche-Nanogrößenpartikeln.)

(4) Untersuchungen von Kimm et al [Kim]

Bezüglich der für Textilbeton verwendeten Betonrezeptur merken diese an, dass bei Verwendung einer Feinbetonmatrix für den Textilbeton, der Betonbruch nur bedingt für das Betonrecycling geeignet ist, da bis zu 45 % der Gesteinskörnung unterhalb von 4 mm liegen. Aus diesem Grund wird empfohlen vermehrt auf Beton mit größerer Gesteinskörnung für die Herstellung von Textilbeton zu setzen.

Ein Bericht von Kimm et al. zeigt, dass die bei der Aufbereitung von CarbonBeton freigelegte Bewehrung nicht für den direkten Wiedereinsatz in Textilbeton geeignet ist, da es bei der

Recycling immer zumindest zu Beschädigungen an der Bewehrung und damit zu Verringerungen bei der Zugfestigkeit kommt. Im Übrigen ist eine Trennung der Betonmatrix von der Carbonbewehrung praktisch nur möglich, wenn diese z. B. mit Epoxidharz imprägniert ist. Bei der Wiederverwendung der Carbonbewehrung wird das größte Potential, aufgrund wirtschaftlicher und technologischer Aspekte, beim Einsatz von r-CF in Kurzfaserbeton gesehen. Letzteres wird von der LAGA kritisch gesehen, da beim Recycling des Kurzfaserbetons eine Separierung von Kurzfasern und mineralischer Matrix nicht mehr möglich ist. (**Extensive Forderung! Sinnvoll?**)

Fazit des Autors:

- * Aus gebrochenen langen CF lassen sich keine r-CF herstellen, die die gleiche Güte haben
- * Die statischen Werte werden bei Garnen mit gerade ausgerichteten CF um etwa 20% niedriger liegen.
- * Zyklische Beanspruchung wie bei Brücke und Kriechen der Matrix unter entsprechender Dauerlast kann damit kaum abgedeckt werden
- * Der natürlicherweise degradierte CF-Restwertstoff ist relativ teuer: Pyrolyse im Maschinenbau < 16 €/kg; mechanisches Recycling etwa 20 €/kg! (zum Vergleich originäre CF: 16€/kg, Stäbe 20€/kg, Gittermatte 30€/kg)
- * Primärfasern sind lediglich energie-ressourcenintensiv (das wenige Öl ist nicht von Bedeutung) und mit hohen Kosten
- * 3D-Kurzfaserbeton mit 2 Vol.-% recycelter Carbonfasern, 2D-Vliesemöglich
- * Kurzfaser-Spritzguss (Extruder-‘3D‘) ist zu überlegen. Auch die Länge der gekürzten Faser bringt immer noch Festigkeit in das Bauteil
- * Aufgrund der oben genannten Erkenntnisse hält es der Autor aus ökologischen und ökonomischen Gründen nicht für sinnvoll, CF – wie es die aktuellen Vorschriften verlangen – aus geschredderten CarbonBeton-Teilen zu extrahieren, anstatt die CF-Anteile zusammen mit dem Betonanteil in den Oberbau einer Straße oder anders sinnvoll einzubringen. (Aus Sicherheitsgründen kann man aus tribologischen Messungen des vom Verkehr erzeugten Abriebstaubs bei einem solchen Oberbau durchführen und nach CF-WHO-‘Fasern‘ suchen, wenn keine weitere Abdeckung vorgesehen ist. Ein weiterer abschließender oberer Straßenbelag für Dämpfung etc. beseitigt jedwedes Problem (IVW Kaiserslautern verfügt über solche Einrichtungen. Mit wachsender Anzahl der schwereren E-Autos steigt die Menge der Abrieb-Partikel)
- * Aus einer endlosen Faser wird nach mehrmaligem Recycling des dann ‚Kurzfaserbetons‘ noch ein guter Füllstoff für Beton und Asphalt.

9.4 Gesundheitsbetrachtungen beim Recycling

Die Lebensdauer eines Bauteils gliedert sich bekanntlich in mehrere Phasen. Dabei wird bei Kreislaufwirtschaft-Sicht die Rohwerkstoffgewinnung eingeschlossen über die Restwertstoff-Gewinnung durch Recycling bis zu einer letztendlichen Entsorgung, eventuell.

Während bei GFK bei der mechanischen Behandlung keine gesundheitlichen Risiken bekannt sind, hängt das Verhalten von CFK vom Aufsplitterungsverhalten der verwendeten CF ab, ob also Pech-CF oder UHM-PAN-CF (ein belastbarer Beleg zur Gefährdung fehlt bisher noch) zum Einsatz kamen.

Freisetzungsmöglichkeit von Feinfaser-Stäuben inklusiv WHO-‘Fasern‘ sind gegeben bei

- * thermischer Behandlung und unkontrollierter thermischer Verwertung
- * mechanischer Behandlung bei Abbruch, Trennen, Schleifen (gefährlichste Form), Bohren.

Dabei stellt sich jedes Mal die Frage: Sind die freiwerdenden ‘Fasern‘ gesundheitsgefährdend?

Selbstverständlich ist auch in den letzten Lebensabschnitten wie Recycling ‘Sicheres Arbeiten‘ Pflicht, Arbeitsschutzmaßnahmen werden angewendet.

Ähnlich wie bei der Tragwerksplanung, bei der darauf geachtet werden muss, eine möglichst hohe Bemessungslast als sogenanntes Worst-Case-Szenario zu verwenden, sind aber auch unwahrscheinliche Lastkombinationen auszuschließen, die eine erfolgversprechende Strukturbauteilentwicklung verhindern.

Dies muss auch analog für die Risikobewertung bei WHO-‘Fasern‘ gelten.

Herstellung der Materialien ↔ Bearbeitung der Bauteile ↔ Aufschluß Bestandsbauteil zwecks Verwertung der Reststoffströme (stofflich, energetisch)				
Gebäude, Türme, Windmühlenblätter	CF-Ertüchtigung Stahlbetonplatten und -träger	Carbonbetonbauteil	Carbon-Kurzfaserbeton (analog SMC)	Hybrid-Bewehrung
Laminat aus UD-chichten	Lamelle = UD-Schicht			Stahl +CFK Holz + Beton GFK + CFK
GFK, CFK, Hybrid	Mörtelmatrix < 4	Mörtel < 4 mm Beton > 4 mm		
				gemeinsames Recycling??
Ziele				
* Maximal-Ziel :Wiederverwendung von <i>End-of-Life</i> -Orginalbauteilen oder Stücken davon! * Verwendung der Recyclate				
Anforderungen LAGA, DIBt				
Lebensdauer > 50 Jahre, Kriecharmut, Vermeidung der Mischung von Reststoffströmen, keine Verschleppung von kurzen CF in andere Recyclingwerkstoffe, zukünftige Bauprodukte sollen gut aufschließbar sein, anorganische Bestandteile nicht mit organischen vermischt sein, ...				
Folge des Recyclings				
CF-Bewehrung wird degradiert und die CF verkürzt (<i>downgrading in line with downsizing</i>)				
Bedenken LAGA, BAuA				
Kurzfaserbeton wird kritisch gesehen, weil keine Separierung mehr möglich ist				
Vorgehensweise				
Klärung, ob kritische CF-Partikelgrößen auftreten können. Feinstaubmessung am Arbeitsplatz bei mechanischer Bearbeitung der Bauteile mit Prüfung auf kritische Partikelgrößen HAR-FO und WHO-FO				
Aufgaben zu klären				
* Splintern praktisch nur pechCF und erzeugen dadurch die kritische Partikelgrößen? Welche Bearbeitungsmethoden sind dabei kritisch? * Wie ist der Unterschied HAR-FO gegenüber WHO-FO zu bewerten? * Was ist der Unterschied PANCF gegenüber pitchCF? Gibt es physikalischen Parameter, der für die Splitterneigung der CF als Maßstab gelten kann? Was gilt für die UHM-PAN-CF? * ‘Feine‘ Restbruch-Mischmenge in den Oberbau einbaubar?.				
Dauer des Ereignisses und Wahrscheinlichkeit des Auftretens (Risikobetrachtung)				
* Bearbeitung am Arbeitsplatz * Nutzung * Brandfall, Bruchfall * Recyclingtätigkeit.				

Fig. 9-5: Recycling faserverstärkter tragender Bauteile im Bauwesen

Eine nachhaltige, den hohen CO₂-Fußabdruck-reduzierende Alternative zu den vorgenannten synthetischen CF stellen Naturfasern dar. So werden z.B. Flachfasern anstelle von CF bereits als sogenannte nicht-metallische Bewehrung von Beton auf ihre Eignung untersucht []. Als Tränkung steht EP, eine mineralische Matrix oder vielleicht auch eine bio-basierte Möglichkeit zur

Verfügung. Auch für diese Fasern im naturfaserbewehrten Textilbeton gelten natürlich dieselben Vorgaben, Sicherheitsmaßnahmen wie für die CF aus Öl.

Natürlich wird für die Herstellung von CF immer Energie benötigt. Dies wird aber auch der Fall sein, wenn CF in Zukunft aus natürlichen Quellen hergestellt werden.

Abschließend sei noch die **LAGA** zitiert mit

- Die Ergebnisse aus den Forschungsvorhaben zur (theoretisch möglichen) Gesundheitsgefahr von CF-Stäuben aus Carbonbeton sollten kommuniziert werden (Adressat: Bund und Länder)
- Zur Eignungsbeurteilung eines Aufbereitungsverfahrens soll das Kriterium einer geringen Staubentwicklung immer berücksichtigt werden.“

Ein kleiner Beitrag könnte diese private Ausarbeitung sein.

Fazit des Autors:

- * *Eine ordnungsgemäße Anwendung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen stellt für den Nutzer keine gesundheitliche Gefahr dar. Das setzt beispielsweise beim Umgang mit CarbonBeton die gleichen Anforderungen an den Arbeits- und Gesundheitsschutz voraus, wie bei herkömmlichem Stahlbeton*
- * *Schutzmaßnahmen werden auf Basis der gemessenen Expositionen an Arbeitsplätzen festgelegt.*

Info: EuReComp ist ein von der EU gefördertes Verbundforschungsprojekt mit einem starken Fokus auf Kreislaufwirtschaft, das nachhaltige Methoden für das Recycling und die Wiederverwendung von Verbundwerkstoffen aus Bauteilen verschiedener Industriezweige, wie der Luftfahrt und der Windenergie, entwickeln soll

Eine sinnvolle Aufgabe ist: **„Keine Panik schüren!“**.

Deshalb hat der VDI in 2023 eine Handlungsempfehlung unter vdi.de/publikationen herausgegeben
„*Maßzahlen zur Gesundheit von Bevölkerungen richtig interpretieren und kommunizieren*“.

Dies betrifft die Risikofaktoren: Partikel < PM2.5 (WHO-Partikel), Stickdioxid sowie Schall- und Lärm.

Damit wird eine Grundlage für ein Konzept zur sogenannten ‘Umweltbedingten Krankheitslast‘ geschaffen.

Für CU, G. Gärtner-Idee: Schlaglicht „Nachhaltigkeit-Einstiegswissen aus den Reihen des CU“ mit unterschiedlichen Themenausrichtungen herausgeben

10 ANNEX CF-Werkstoff-Datenblätter von Firmen

Auswertung von Faserdaten bezüglich Faser-Splitterrisiko
 3er-Aufteilung in : < 380 GPa (HT, IM, HM); > 380 GPa (UHM), Pech.

Aus den einzelnen Faserdaten-Tabellen der verschiedenen Firmen, unten die Tabellen von Mitsubishi für Pech, wurden wesentliche Fasertypen ausgewählt. Zusätzlich wurden die CarboBreak-Fasertypen berücksichtigt.

YSH and YS Grade (7 micron diameter) : Aerospace and sports application

Grade	Filament	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Yield
		GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	g/1000m
YSH-70A-10S	1000	720	105	3630	530	0.5	2.14	75
YSH-70A-30S	3000	720	105	3630	530	0.5	2.14	250
YSH-70A-60S	6000	720	105	3630	530	0.5	2.14	520
YSH-70A-A2S	12000	720	105	3630	530	0.5	2.14	1040
YSH-60A-10S	1000	630	92	3830	570	0.6	2.12	75
YSH-60A-30S	3000	630	92	3830	570	0.6	2.12	250
YSH-60A-60S	6000	630	92	3830	570	0.6	2.12	520
YSH-60A-A2S	12000	630	92	3600	570	0.5	2.12	1040
YSH-50A-10S	1000	520	76	3830	570	0.7	2.10	75
YSH-50A-30S	3000	520	76	3830	570	0.7	2.10	250
YSH-50A-60S	6000	520	76	3830	570	0.7	2.10	520
YS-90A-30S	3000	880	128	3530	510	0.3	2.18	250
YS-90A-60S	6000	880	128	3530	510	0.3	2.18	520
YS-80A-30S	3000	785	114	3630	530	0.5	2.17	250
YS-80A-60S	6000	785	114	3630	530	0.5	2.17	520

NIPPON GRAPHITE FIBER Co.

XN Grade (10 micron diameter) : Industrial and sports application

Grade	Filament	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Yield
		GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	g/1000m
XN-90-60S	6000	860	125	3430	500	0.4	2.19	880
XN-80-A2S	12000	780	114	3430	500	0.5	2.17	1780
XN-80-60S	6000	780	114	3430	500	0.5	2.17	890
XN-60-A2S	12000	620	90	3430	500	0.6	2.12	1780
XN-60-60S	6000	620	90	3430	500	0.6	2.12	890

XN Grade (10 micron diameter) : Low Modulus and High elongation

Grade	Filament	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Yield
		GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	g/1000m
XN-15-30S	3000	155	22	2400	350	1.5	1.85	470
XN-10-30S	3000	110	16	1700	250	1.6	1.70	475
XN-05-30S	3000	54	8	1100	160	2.0	1.85	410

	Carbonfasertyp	Precursor	Typ	Anzahl Fila-mente	Filament Ø [µm]	Zugfestigkeit R_t [MPa]	Zug-E-Modul E_t [GPa]	Bruchdehn. ϵ_{fract} [%]	Garnfeinheit [tex]	Schlichte/ Präpara- tionssauftrag
1	Tenax®-E*) HTS40 F13 <small>*) Europe</small>	PAN	HT	12k*	7,0	4.400	240	1,8	800	1,0%, Basis Polyurethan
2	Tenax®-E STS40 F13	PAN	HT	24k	7,0	4.300	240	1,8	1.600	1,0%, Basis Polyurethan
3	Tenax®-E HTA40 E13	PAN	HT	6k	7,0	3.950	238	1,7	400	1,3%, Basis Epoxidharz
4(a)	Tenax®-J*) UMS40 F23 <small>*) Japan</small>	PAN	HM	24k	4,8	4500	390	1,1	800	1,0%, Basis Polyurethan
5	Tenax®-E IMS 65 E23	PAN	IM	24k	5,0	6.000	290	2,1	830	1,3%, Basis Epoxidharz
6	SGL SIGRAFIL CT50-4.4/255- E100	PAN	HT	50k	7,0	4.400	255	1,65	3.240	1%, Basis Epoxidharz
7	SGL SIGRAFIL CT50-4.8/280- E100	PAN	HT	50k	6,6	4.800	280	1,65	3.070	1%, Basis Epoxidharz
8	SGL SIGRAFIL CT50-4.0/240- E100	PAN	HT	50k	7,0	4.000	240	1,7	3.300	1%, Basis Epoxidharz
9	SGL SIGRAFIL CT24-5.0/270- E100	PAN	IM	24k	6,9	5.000	270	1,9	1.600	1%, Basis Epoxidharz
	PANEX 35 (Zoltek*)	PAN	HT		7,2	4137	242			Keine Information
10	Mitsubishi DIALEAD K13D2U	Pech	UHM	2k	11,0	3.700	935	0,4	365	Keine Information
11	Mitsubishi DIALEAD K63712	Pech	UHM	12k	11,0	2.600	640	0,4	2.000	Keine Information
12	GRANOC NGF XN-05-30S	Pech	k.A.	3k	10,0	1.100	54	2,0	410	Keine Information
13	SGL PANOX®	PreOx PAN	k.A.	320k	13,0	230	k. A.	21,0	52.000	0,7% Antistatikum
14	GRANOC NGF YSH-50A- 60S	Pech	HM	6k	7,0	3.900	520	0,7	520	Keine Information
15	Tenax®-J UMS55 F23	PAN	HM	12k	4,4	4.000	550	0,7	360	1,0%, Basis Polyurethan

11 References

- [Bäg19] Bäger D, Simonow B, Kehren D, Dziurawitz N, Wenzlaff D & Thim C, 2019. *Pechbasierte Carbonfasern als Quelle alveolengängiger Fasern bei mechanischer Bearbeitung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK)*, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft,79 (2019), 13 – 16
- [BAuA22] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). *CarboBreak Abschlussworkshop - Voraussetzungen und Mechanismen einer Freisetzung alveolengängiger faserförmiger Carbonfaser Bruchstücke – Konzept einer Handlungsempfehlung*, Abschlussworkshop des CarboBreak-Projekts, BAM Berlin, 07.04.2022.
- [Carbo22] *CarboBreak – Voraussetzungen und Mechanismen einer Freisetzung alveolen-gängiger faserförmiger Carbonfaser-Bruchstücke*. Projekt DaNa 4.0, <https://nanopartikel.info/forschung/projekte/carbobreak/>, Zugriff: 07.11.2022.
- [CU23] Informationspapier „EXPOSITION UND WIRKUNG VON CARBONFASER- UND CFK-STÄUBEN“ . Composites United e. V., Oranienburger Str. 45, 10117 Berlin | Germany www.composites-united.com. Kontakt: Dr. Bastian Brenken, bastian.brenken@composites-united.com. Dezember 2022
- [Cun23] Cuntze R: *Life-Work Cuntze - a compilation* (> 850 pages). Permanent download address: <https://www.carbon-connected.de/Group/Prof.Ralf.Cuntze>
- [DaNa22] *CarbonFibreCycle – Carbonfasern im Kreislauf – Freisetzungverhalten und Toxizität bei thermischer und mechanische Behandlung*. Projekt DaNa 4.0, <https://nanopartikel.info/forschung/projekte/carbonfibrecycle/>, Zugriff: 04.11.2022
- [DGUV14] DGUV-Information „*Bearbeitung von CFK-Materialien*“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Fachbereich Holz und Metall, Ausgabe 10/2014
- [Don09] Donaldson, K. (2009). *The inhalation toxicology of p-aramid fibrils*. Crit. Rev. Toxicol. 39 (6), 487–500
- [Don10] Donaldson, K., Murphy, F. A., Duffin, R., Poland, C. A. (2010). *Asbestos, carbon nanotubes and the pleural mesothelium: a review of the hypothesis regarding the role of long fibre retention in the parietal pleura, inflammation and mesothelioma*. Part. Fibre Toxicol. 7:5
- [Edi14] Edie D D and Dunham M G: *Melt Spinning Pitch-Based Carbon Fiber*. Carbon. 27 (5): 647–655. doi:10.1016/0008-6223(89)90198-X. 2014
- [Eib] Eibl, S.: *Gesundheitsgefährdung durch lungengängige Kohlentofffasern beim Abbrand von Carbonkunststoffen*. Vortrag zum Workshop „Lunge - Umwelt - Arbeitsmedizin“ am 3. bis 4. März 2017 in Linz, Österreich. <https://lch.universimed.com/fachthemen/8122>
- [Fed 17] Feder I S, Tschoff I, Theile A, Schmitz I, Merget R & Tannapfel A: *The asbestos fibre burden in human lungs: new insights into the chrysotile debate*, European Respiratory Journal,49, 10 S.
- [Fra14] Erik Frank, Lisa M. Stuedle, Denis Ingildeev, Johanna M. Spörl, and Michael R. Buchmeiser: *Zur Herstellung und Struktur von CF à Carbon Fibers: Precursor Systems, Processing, Structure, and Properties.*, Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 5262 – 5298, <https://doi.org/10.1002/anie.201306129>
- [Gro19] Anna Große', Romy Naumarn', Marcel Hofmann', Dominic Kehren', Daphne Bäger', Sabine Plitzko': *CarboBreak - Conditions and Mechanisms for Releasing Alveolar Fibrous Carbon Fibre Fragments*. 'Sächsisches Textilforschungsinstitut e.v. (STFI), Chemnitz (Germany), 'Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Berlin (Germany)
- [Heu16] Heunisch E and Bachmann V: *WHO fiber release, workplace exposure measurement and assessment*. Int. BAuA Symposium on WHO Fibers (20.4.2016) <https://www.baua.de> > Symposium-2016-05 PDF

- [Hua95] Huang Y and Young, R J: *Effect of Fibre Microstructure upon the Modulus of PAN- and Pitch-based Carbon Fiber*. Carbon. 33 (2): 97–107. doi:10.1016/0008-6223(94)00109-D. 1995
- [Hua09] Huang X: *Fabrication and Properties of Carbon Fibers*, Materials. 2009. (<http://www.mdpi.com/1996-1944/2/4/2369>)
- [Keh19] Dominic Kehren*, Barbara Simonow, Daphne Bäger, Nico Dziurawitz, Daniela Wenzlaff, Carmen Thim, Judith Neuhoff, Asmus Meyer-Plath, Sabine Plitzko, Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA), Berlin 10317, Germany: *Release of Respirable Fibrous Dust from Carbon Fibers Due to Splitting along the Fiber Axis*. Aerosol and Air Quality Research, 19: 2185–2195, 2019
- [Kim22?]
- [LAGA19] LAGA, *Abschlussbericht zur Entsorgung faserhaltiger Abfälle*, 2019, URL: https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltige-abfaelle_juli-2019_1574075541.pdf.
- [Lew82] Lewis I C: *Chemistry of Carbonization*. Carbon. 20 (6): 519–529. doi:10.1016/0008-6223(82)90089-6. 1982
- [Lim16] Limburg M und Quicker P: *Entsorgung von Carbonfasern*, in: Energie aus Abfall 13, Hrsg. Thomé-Kozmiensky v. K. J. und Beckmann M., 2016, S. 135-144, URL: http://vivis.de/phocadownload/2016_eaa/2016_EaA_135-144_Quicker.pdf.
- [Mat95] Matsumoto T: *Mesophase pitch and its carbon fibers* (PDF). Pure and Applied Chemistry. 57 (11): 1553–1562. doi:10.1351/pac198557111553. S2CID 207266372. 1995
- [Mat19] Mattenklott M and van Gelder R: *Carbonfasern und carbonfaserverstärkte Kunststoffe* (CFK) Teil 1: Charakterisierung, Exposition, Bewertung und Schutzmaßnahmen, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 79/Nr.9, 2019, 317 – 322. URL: https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2019_124.pdf.
- [Mül ??21] Mülhopt S.: *CFC – Carbon FibreCycle Carbonfasern im Kreislauf*
- [Obe04 28] Oberdörster G: *Subchronic Carbon Fibre Inhalation Study in Rats*, Addressed to the Environmental Protection Agency (EPA), January 2004
- [Pac21] Packroff R, Broßell D, Meyer-Plath A und Marx R: *Bloß kein zweites Asbest!* April 2021, Chemie in unserer Zeit 55(3), Wiley-VCH GmbH, www.chiuz.de
- [Per12] N. Perry, A. Bernard, F. Laroche, S. Pompidou *Improving design for recycling – Application to composites*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, Volume 61 (Issue 1), pp.151-154. doi:10.1016/j.cirp.2012.03.081. f001. f001-00765791f
- [Rec18] Reckter B: *Gerettet? Recycling von faserverstärkten Kunststoffen*. VDI Nachrichten – Das Nachrichtenportal für Ingenieure, 2018, URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/fokus/gerettet-recycling-von-faserverstaerkten-kunststoffen>
- [Rie23] Ries G.: SciLogs » Mente et Malleo » Schadstoffe » Kohlefasern – wie gefährlich sind sie? 15. Jan 2023
- [Sin81] Singer L S: *Carbon fibres from mesophase pitch*. Fuel. 60 (9): 839–847. doi:10.1016/0016-2361(81)90147-2. (1981).
- [Todt10] Todt, M., Rammerstorfer, F.G., Paris, O. et al : *Nanomechanical studies of the compressive behavior of carbonfibers (Zur Berechnung des Verhaltens unter Druck)*. J Mater Sci 45, 6845–6848 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4941-2>

- [TRGS 910] Technische Regeln für Gefahrstoffe — *Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen*, Ausgabe Februar 2014. <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/905/905-anorganische-fasern.pdf?blob=publicationFile&v=3>
- [TRGS 916] *Technische Regel für Gefahrstoffe: Verzeichtnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe*. Ausg. 3120'16. GMBI. (2016) Nr. 19. S. 378-390; zul. geänd. GMBI. (2018), Nr.15, S. 259
- [TRGS 521] *Technische Regel für Gefahrstoffe: Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle*. Ausg. 2/2008. GMBI. (2008~ Nr. 11, S.279-286)
- [Wag20] *Synthetic Nano- and Microfibers Synthetic Nano- and Microfibers.2020*. Editors: R. Martijn Wagterveld, Jan C.M. Marijnissen, Leon Grado'n and Arkadiusz Moskal. PUBLISHED BY WETSUS, EUROPEAN CENTRE OF EXCELLENCE FOR SUSTAINABLE WATER TEC89HNOLOGY <HTTPS://WWW.WETSUS.NL>
- [Ver17] Verma R: *How is Carbon Fiber made?* <https://www.linkedin.com/pulse/how-carbon-fiber-made-rakesh-verma/>
- [Wan17] *Carbon Fibers and Their Thermal Transporting Properties*. FuKe Wang, in Thermal Transport in Carbon-Based Nanomaterials, 2017
- [Wes19] Götz Westphal, Christian Monsé, Dirk Walter, Thomas Brüning, Jürgen Bünger. *IPA-Journal 01/2019 Aus der Forschung*
- [Yam99] Yamamoto I, Fukagawa T and Muroi M: *Pitch based carbon fibers*. United States Patent Office, 1999. (<http://www.google.com/patents/US6303096>)

Carbonbeton, C³-Quellennachweis

- [1] Park S.-H., Types and Health Hazards of Fibrous Materials Used as Asbestos Substitutes, in Safety and Health at Work, 9/Nr. 3, 2018, S. 360-364, DOI: 10.1016/j.shaw.2018.05.001
- [Bie18] Bienkowski N, Hillemann L, Steibel T, Kortmann J, Kopf F, Zimmermann R und Jehle P: *Bearbeitung von Carbonbeton – eine bauverfahrenstechnische und medizinische Betrachtung*, in Bauingenieur, Jahresausgabe 2017/2018, Heft 10, 2017, S. 110-117.
- [Wes19] Westphal G, Monsé C, Walter D, Brüning T und Bünger J: *Gefährdungsanalyse für Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe*, in IPA-Journal, Nr. 1, 2019, S. 10-14. URL: https://www.ipa-dguv.de/medien/ipa/publikationen/ipa-journale/ipa-journale2019/documents/ipa_journal_1901_cfk.pdf.
- [Göh19] Göhler D und Streibel T: *Exponierung von Zellkulturen mit Stäuben aus der Bearbeitung von Carbonbetonmaterialien*, in: C³ e. V., TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband zu den 11. Carbon- und Textilbetontage am 24./25.09.2019 in Dresden, 2019, S. 116-117.
- [Lim16] Limburg M und Peter Quicker P: *Entsorgung von Carbonfasern*, in: Energie aus Abfall 13, Hrsg. von Karl J. Thomé-Kozmiensky und Michael Beckmann, 2016, S. 135-144, URL: http://vivis.de/phocadownload/2016_eaa/2016_EaA_135-144_Quicker.pdf
- [Kop19] Kopf F und Kortmann J: *Aufbereitung von Carbonbetonabbruchmaterial*, Beitrag zum 30. BBB-Assistententreffen 2019 in Karlsruhe, S. 132-145.74. Jehle, P.; Kortmann, J. (2020) 63
- [C³] C³ – Carbon Concrete Composite e. V., Vernetzungsworkshop »Selbstverpflichtung – eine Notwendigkeit mit Nutzen« im Jahr 2019 und die darauf aufbauenden Arbeitstreffen zur »Selbstverpflichtung zur Verhinderung von Gefährdungen durch biobeständige, lungengängige Faserstäube bei der Carbonbetonbauweise« im Jahr 2019 und 2020. Verstärkte Berücksichtigung des Kriteriums Ressourceneffizienz bei der Bewertung der Nachhaltigkeit im Bauwesen

Auf der Suche nach weiterer Literatur wurde vom Autor gefunden:

[Keß20] Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin einer Hohen Medizinischen Fakultät der Ruhr-Universität Bochum vorgelegt von Hendrik Christopher Keßeler aus Recklinghausen. *Untersuchung der inflammatorischen Wirkung von Stäuben aus der Herstellung und Bearbeitung carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK) im Particle-induced Cell Migration Assay (PICMA).*

Diese Dissertation verfolgt ebenfalls eine Gesamtsicht, was Stäube und Fasern betrifft.

Januar 2023



COMPOSITES-RECYCLING-STUDIE

Verfasser  **Herausgeberin** 

*Hans-Josef Endres,
Madina Shamsuyeva
IKK - Institut für Kunststoff-
und Kreislauftechnik
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
30823 Garbsen
kontakt@ikk.uni-hannover.de*

*AVK- Industrievereinigung
Verstärkte Kunststoffe e. V.
Am Hauptbahnhof 10
60329 Frankfurt
069 271077-0
info@avk-tv.de
www.avk-tv.de*

Partner  **Vertriebspartner** 

*Composites United e. V.
<https://composites-united.com/>
ISBN 978 3 00 074217 0*

*Die AVK ist Partner im ITA-Projekt
"Supply Chain for Recycling of
Composite Materials and Parts"*

12 Glossar

12.1 Begriffsdefinitionen

Aerosole: Gas, meistens Luft, worin feste und flüssige Partikel schweben

Alveole: Lungenbläschen

Ausschreibung: Dokument, das eine Aufforderung an ausgewählte Firmen zur Abgabe eines Kostenanschlages enthält oder die Bekanntgabe, dass Bieter zur Ausführung festgelegter Arbeiten eingeladen sind. Vergabe von Bauaufträgen durch die Öffentliche Hand

Bauprodukte, (LAGA 2021): Baustoffe, für die Produktnormen greifen (Bauproduktenverordnung). Bei Recyclingbaustoffen trifft dies nur zu, sofern sie entsprechend zugelassen und güteüberwacht sind

Baustoff: Material, welches für die Errichtung von Gebäuden verwendet wird, wie Beton, Stahl, Holz, Mauerwerk, Glas). Amtssprache: Bauprodukt

Bauteile (Bauwerksteile), (LAGA 2021): Ein Bauteil ist im Bauwesen eine funktionelle Komponente eines Bauwerks. Nach der EN ISO 10209 wird ein Bauteil definiert als, Zitat, "Bestandteil einer Ausrüstung, das nicht weiter zerlegt werden kann, ohne seine grundlegenden Eigenschaften zu verlieren".

Beanspruchung: mechanische Spannung oder auch Schnittgröße, verursacht durch eine Einwirkung wie Belastung, Temperatur, Feuchte

Beschichtung (Filament): Überzug der Filamente für textile Verarbeitung, sog. Faserschlichte. (Note: (1) Prozessschritt bei Filamenten und Garnen, um deren Verarbeitbarkeit und auch Alkalibeständigkeit wie z. B. bei Basalt zu verbessern. (2) Die Schlichte wird vor dem weiteren Verarbeiten teilweise wieder entfernt)

Beton und Mörtel: s. *Fig.12-2*. Verbundwerkstoff aus Zement + Zusatzstoffen + Wasser + Gesteinskörnungen + Zusatzmittel. (Zement dient als Bindemittel für die anderen Bestandteile)

Beschichtung: dichter Überzug des Produkts aus Gründen des Oberflächenschutzes und der Verbesserung der Haftung, also des Grenzflächenverhaltens von Faserbewehrung-Beton

Bewehrung: Faserstränge, Stäbe, Gitter (Matten) etc als Verstärkungseinlage in einer Matrix für die Aufnahme von Zug- und Druckkräften.

Bewehrungsstab: pultrudierter Stab aus CF, GF Bst

Bewehrungsmatte: textiles Bewehrungsgitter (* Eine solche 'Matte' ist ein Netzwerk aus Fasersträngen in einem bestimmten Abstand und kein dichtes Roving-Gelege wie häufig noch falsch im Bauwesen geschrieben wird, weil ebenfalls dort als sogenannte Lamelle ein Gelege zur Bauteilertüchtigung eingesetzt wird. * Für die Bewehrungs'matte' wurde von der Baustahl'matte' her der Begriff 'Matte' beibehalten, obwohl es keine echte, *dichte* Matte ist. Die Striche ' ' werden weggelassen)

Biobeständigkeit: Eigenschaft, die die Kanzerogenität von Fasern bestimmter Form und Größe erhöht. Als kritisch gelten Fasern dann, wenn sie folgende Abmessungen nach WHO aufweisen: Länge > 5 µm, Durchmesser < 3 µm und Länge / Durchmesser > 3 / 1. Zur Beurteilung der Biobeständigkeit verwendet man die Halbwertszeit.

Biolöslichkeit = Komplement von Biobeständigkeit: Löslichkeit von Werkstoffen in Lebewesen, wobei eine geringe Biolöslichkeit als ein Hinweis für Kanzerogenität gilt. Bestimmung der Löslichkeit der CF und CFK in * reinem Wasser, *einer Phosphat-gepufferten Salzlösung und – um dem biologischen Milieu besonders nahe zu kommen – in sog. *lysosomaler Lösung. Glasfaser-Partikel dienen als Kontrolle für einen unlöslichen Stoff. [WIKIPEDIA Mai 2023]

Bio-persistent: Abbaubarkeit von Fremdstoffen in Organismen wird durch deren Biopersistenz bewertet, zum Beispiel, um zu beurteilen, ob Mineralfaserstäube aufgrund langdauerndem Aufenthalt in der Lunge krebserregend sein könnten <https://www.sager.ch/de-ch/file/zertifikate-1/saglan-biopersi-d773.pdf>

Bruchfläche: morphologische 'Fläche', d.h. Oberfläche des Bruchs in der Bruch-'Ebene

Bruchmechanik: Theorie, die das Verhalten von Rissen in einem beanspruchten Werkstoff beschreibt und dazu Größen nutzt, die den das Versagensverhalten entscheidenden Zustand an der Rißspitze charakterisieren

Bruchzähigkeit: Widerstand eines Werkstoffs bei vorliegenden Rissen und Delaminationen

Carbonfaser:

Carbonisierung (s.a. Grafitisierung):

Composite material (Verbundwerkstoff): combination of constituent materials, different in composition. *(1) The constituents retain their identities in the composite; that is, they do not dissolve or otherwise merge completely into each other although they act in concert. Composite materials provide improved characteristics not obtainable by any of the original constituents acting alone. (2) Normally the constituents can be physically identified, and there is an interface between them. (3) Composites include fibrous materials, fabrics, laminated (layers of materials), and combinations of any of the above. (4) Composite materials can be metallic, non-metallic or a hybrid combination thereof, and carbon concrete is a further example. (5) probably homogenizable to a smeared material such as a quasiisotropically-casted FRC or SMC, such as aUD-ply and a lamella. The lamella is smearable and can be modelled as a 'composite material' (Verbundwerkstoff). (6) Layered materials and foam materials are also forms of composite materials. versus*

Material Composite (Werkstoffverbund): structural-mechanically a composite 'construction of different materials (a practically not smearable 'conglomerate' such as i.e. carbon mat-reinforced concrete = fiberstrand grid, which is not a 'composite material' despite it is usually termed so)

Defekt: Störstelle im Werkstoff wie Pore, Einschluß, lokale Trennung von Filament und Matrix; auch Rißkeim oder Fehlstelle genannt. (Note: aus Gewährleistungsgründen sollte das Wort Defekt lieber ersetzt werden durch Mangel (= flaw))

Degradation: Abbau der Werkstoffeigenschaften unter Last- und Umwelteinflüssen

Delamination: Trennung einzelner Schichten im geschichteten Körper, Laminat.

Denier: Garnfeinheit den = 1g / 9000 m. (veraltete Maßeinheit für eine Feinheitsangabe), s. tex

Duromer (Duroplast): gehärtetes Kunstharz, das nach seiner Aushärtung durch Erwärmung oder andere Maßnahmen nicht mehr verformt werden kann (Note: Es enthält harte, amorphe, unlösliche Polymere. Seine Makromoleküle sind engmaschig vernetzt, was ihre fehlende Erweichung beim Erwärmen verursacht, und sie nach der Aushärtung nur spanabhebend bearbeitbar macht)

E-Glas: Silikatglas, welches außer Siliziumoxyd und Boroxyd in größeren Mengen Aluminiumoxyd und Calciumoxyd enthält. (Note: Man bezeichnet dieses Glas als "alkalifreies" Glas, da der Gehalt an Alkalioxyden unter 1 % liegt)

Einzelfaser: Filament, Faser beliebiger Länge, endlich bis endlos

Epoxidharz (EP): Reaktionsharze, welche mit Härtungsmitteln durch Polyaddition in den festen, unschmelzbaren Zustand übergehen. (zur Gruppe der Duromere).

Faden (thread): ein aus Fasern zusammengesetztes, biegeschlaffes Gebilde, das eine dominierende eindimensionale Erstreckung sowie Gleichmäßigkeit in Längsrichtung aufweist [nach WIKIPEDIA]. (Etwas älterer Überbegriff für ein Garne, Tow, Roving, Zwirn, Faserstrang (im Bauwesen üblich) der bei der Herstellung textiler Flächengebilde im textilen Sprachgebrauch üblich und auch normgerecht ist)

Faser: längliches Gebilde, das aus einem Faserstoff besteht. Man unterscheidet zwischen gegebenen, in der Natur vorkommenden biogenen und mineralischen Faserstoffen und geschaffenen organischen oder anorganischen Faserstoffen. Die Faser hat eine äußere Faserform und ist massiv oder hohl [Wikipedia April 2023].

Faser, textil-technisch: Endlosfaser, Langfaser (< 50mm), Kurzfaser (< 3mm, je nach Verwendungszweck. Chemie 0.1 -1 mm)

Naturfasern: Organisch (pflanzlich oder tierisch) oder anorganisch (mineralisch), **see Fig.?-?**.

Organische Fasern, Anorganische Fasern: Siehe Textglossar hinten

Synthetische Fasern: (Chemie- oder Kunst-Fasern wie Polyamid, Polyacryl und Polyester, die durch chemische Prozesse aus Polymeren hergestellt werden, die sich aus Makromolekülen zusammensetzen

'Faser': Kennzeichnung der in der Medizin verwendeten Fasergröße im µm-Bereich, die nichts mit einer Fasergröße im technischen Bereich zu tun hat (s.a. Fig.12-1)

(Kurz-)Faserbeton: Beton mit kurzen Fasern aus Glas, Stahl, Polymeren, Carbon

Faserstrang: Bündel von Einzelfasern, zumeist aber sogar Roving-Bündel

(kurz-)Faserbeton: Beton mit Kurz-Fasern aus Glas, Stahl, Polymeren, Carbon um seine Eigenschaften wie Festigkeiten, Steifigkeiten, Reißverhalten zu verbessern

Faserkunststoffverbund (FKV): Untergruppe von FVW, Verbund-Werkstoff, aus Fasern und der Bettungsmasse Kunststoff bestehend, s. a. Faser-Verstärkter-Kunststoff FVK)

Faser-Verbund-Werkstoff (FVW): Oberbegriff für alle Verbund-Werkstoffe, die Fasern beinhalten, um in der Kombination bestimmte Eigenschaften zu erhalten, damit bestimmte Funktionen erfüllt werden können. (sowohl Verbund-Werkstoffe als auch Werkstoff-Verbunde gehören dazu)

Faser-Verstärkter-Kunststoff (FVK): s.a. FKV. Ist Untergruppe von FVW Verbundwerkstoff, bestehend aus einer lasttragenden, steifigkeitsgebenden Faserverstärkung und einer Kunststoffmatrix als Bettungsmasse, die die Fasern stützt und schützt.

Festigkeit R (im Bauwesen in D noch zumeist f für Festigkeit verwandt): Kraft / Fläche, in MPa

Fibrille: Interne Fäden in einer Faser aber auch in dem Polymer Plexiglass (*verursacht Crazing*)

Filament: Einzelfaser, aber auch der (endlose) Kunststoff-Ablegefaden beim 3D-Druck, in Textiltechnik

Finish: Haftvermittler, Mittel zur Endbehandlung der Oberfläche von Fasern, um bessere Verbundeigenschaften zu erhalten, z. B. in der Matrix-Grenzfläche

Garn: Tow, Roving, s. a. Faden. Bündel aus endlichen Einzelfasern (Fasergarn) und aus endlosen Einzelfasern

Gelege: in der Regel einachsig bewehrtes flächenförmiges Halbzeug aus Garnen

Gewebe: textiles Maschengebilde aus Garnen (Fäden, Rovings, Tows) durch Maschenbildung auf einer Webmaschine industriell hergestellt,

Gitter: flache, offenmaschige, mit Fasersträngen (Rovings, Tows, Garnen) oder Stäben erstellte 2D-Struktur;

Grafitfaser: die Hitze schreitet beim Grafitierungsprozess über 2500 °C hinaus, dann wird der Polymerfaden zu einer Graphitfaser anstelle einer Carbonfaser

Grafitisierung:

Härter: Stoffe oder Stoffgemische, die im Sinne der einschlägigen Kunststoff-Normen, die Polymerisation (Metacrylat-, UP-Harz) oder Polyaddition (EP-Harze) und damit das Härten bewirken (DIN 16945, B1.1)

Härtung: Bezeichnung für den Übergang von Reaktionsharzmassen in dreidimensional vernetzte Produkte.

Harzsystem: Matrixsystem ist Mischung aus Reaktionsharz, Verdünner, Härter und Beschleuniger (Note: enthält Zusätze, notwendig für den Verarbeitungsprozess und das

Heavy tow:

hybrider Verbund: Funktionsoptimaler Verbund aus mehreren Werkstoffen

Imprägnierung (Durchtränkung): durchtränkende Behandlung **Matrix Roy**

Injektion: Eindringen von fließfähigem Material unter Druck

inflammatorisch:

in vitro: außerhalb eines lebenden Organismus durchgeführter Versuch

Kerbwirkung: Spannungskonzentration = Beanspruchungserhöhung durch Kerben,

Kunststoff: Werkstoff, künstlich aus Makromolekülen organischen Ursprungs hergestellt

Laminat: aus mehreren abgelegten Schichten sich aufbauender Schichtenverbund

Makrophage: Freßzelle

Materialverbund: laut (LAGA 2021) aus mehreren Materialschichten (??) zusammengesetztes Verbundsystem (s. *Verbundwerkstoff und Werkstoffverbund*)

Matrices: Duroplast (Duromer: vernetzt, hochfest): Epoxidharz EP, ungesättigtes Polyesterharz UP, Polyurethan PUR. Thermoplast (umformbar, schweißbar, Kriechneigung), Polyetheretherketon PEEK, etc.)

Matte: quasi-isotropes Halbzeug, bei dem mehr oder weniger stochastisch verteilte Kurz- und/oder Langfasern mit einem Bindemittel locker verbunden sind. Die klassische Bewehrungsmatte ist jedoch ein Gitter. Halbzeug 'weiche' CFK-Rolle: imprägniert und **an-ausgehärtet**; Halbzeug 'steife Matte': imprägniert und ausgehärtet

Matrix: Bettungsmasse für Fasern und Bewehrungsstäbe wie -matten (polymerisch und mineralisch)

Mikromechanik: Beispiel UD. hier: strukturmechanische Betrachtungsweise im Größenbereich \square m der Filamente, die den nicht homogenen Aufbau in einer makromechanischen Schicht, wie einer UD-Schicht berücksichtigt.

Mischbauweise: (JHolz-Beton, DIN EN ISO 10209, 2012-11–Technische Produktdokumentation; Vokabular; Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation.

Modell: Kombination aus Konstruktionsmodell, Notierungen und Attributen, die ein Produkt beschreibt [ISO 16792:2006], 3D-physikalische oder digitale Beschreibung der idealen Gestalt eines Objekts [ISO 29845:2011]. Modellwert = numerischer Wert, ermittelt mit dem Modell

Mörtel: frische Mischung aus Zement + Zusatzmittel + Wasser + Gesteinskörnung der Größe 0 bis 4 mm

Monozythen:

Nachhaltigkeit: Sicherstellung, dass ein regeneratives, natürliches System in seinen wesentlichen Eigenschaften dauerhaft erhalten bleibt [*Idee: Carl von Carlowitz, 1645–1714*]

Nachweis: Beweis-Unterlage, dass im Bauwesen z. B. die Grenzzustände Tragfähigkeit GZT, Gebrauchstauglichkeit GZG nicht überschritten werden oder allgemein, dass eine geforderte Funktionseigenschaft erfüllt wird

Norm: gemäß lateinisch norma (= Winkelmaß, Richtschnur, Maßstab, Regel, Vorschrift) steht Norm für eine Technische Norm und repräsentiert eine Anerkannte Regel der Technik

PAN-CF: Precursor PolyAcrylNitril-basierte CF

Partikel (from the latin word particula = small part): umfaßt generell Flusen und Filament-Bruchstücke, flüssige und feste Teilchen (medizinisch werden faserförmige, längliche Partikel mit 'Faser' bezeichnet)

Pech CF:

persistent (lateinisch persistens= verharrend) : dauerhaft widerstandsfähig, schwer abbaubar

pH-Wert: Maßzahl für den sauren ($\text{pH} < 7$) und den basischen oder alkalischen ($\text{pH} > 7$) Charakter einer wässrigen Lösung. (Note: Negative Zahl des Zehnerlogarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität, also dimensionslos. Eine Bewehrung im Beton sollte alkaliresistent sein)

PechCF → mPitch () und iPitch () :

Phagozyten:

Pitch versus tar: Dry distilling of wood causes tar and pitch to drip away from the wood and leave behind charcoal. Birchbark is used to make birch-tar, a particularly fine tar. The terms tar and pitch are often used interchangeably. However, pitch is considered more solid, while tar is more liquid. Traditionally, pitch that was used for waterproofing buckets, barrels and small boats was drawn from pine. It is used to make Cutler's resin.

pleural:

Polymer: organisches Material, zusammengesetzt aus Makromolekülen

Polycyclic compounds:

Probekörper (Prüfling): Werkstoffprüfung, speziell angefertigter und geformter Gegenstand der Prüfung

Produktlebenszyklus: Periode von der konzeptionellen Idee zur endgültigen Entsorgung eines Produkts

Pyrolyse: Recycling-Verfahren, bei dem die Zersetzung der Matrixkunststoffe in sauerstofffreier Atmosphäre bei Temperaturen von bis zu 600°C erfolgt. (Note: Die langkettigen Polymere zerfallen dabei in kurzkettige, meist gasförmige Bruchstücke)

Resourceneffizienz: gemäß VDI 4800 Blatt 1, definiert als „Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz“

Rayon: Faser aus regenerierter Zellulose, die in der Regel aus Holzzellstoff gewonnen wird: Erster Precursor um 1970, der *nicht runden* Thornelfasern

Resourceneffizienz Carbon-Beton

Recycling: Konzept, Werkstoff für einen erneuten Einsatz zu erhalten oder ein nutzbares Bau-Produkt erzeugen, das weiter verwertet und werden kann und Markt findet

(Hochwertiges) Recycling: (LAGA 2021) Die bestmögliche, stoffliche Verwertung von Abfällen, bei der die wertgeben-den Eigenschaften der (mineralischen) Abfälle möglichst umfassend genutzt werden können. Ziel ist es hierbei, die *mindestens gleiche* Stufe der Wertschöpfungskette zu erreichen. Die Definition impliziert die Abwägung anderer Schutzgüter, wie Energieinhalt oder Klimaeffekte.

Recycelte Carbonfasern rCF: Carbonfasern nach dem Recycling-Prozess. (Notes: (1) Anfang 2018 kostete das Kilo Endlos-Primärfasern praktisch dasselbe wie die beim Recycling erhaltenen 5-20 mm bis eventuell 100 mm langen Sekundärfasern. Der Preis fällt derzeit Richtung 10 €/kg für pyrolysierte rCF. (2) zumeist als CF-Kurzfaservliese und Garne zur Weiterverarbeitung erhältlich, was ein 'Down-sizing' zur Folge hat. (3) Die Verwertung von rCF als Kohlenstofflieferant in der Stahlproduktion wird untersucht. (4) Design-to-Recycling ist zu beachten. Aufgrund des 'Downsizing der Festigkeit' oder des 'Downcycling' müssen passende Produkte gesucht werden, die nicht mehr Hightec im Sinne höchster Beanspruchbarkeit sind, aber bezüglich sonstiger Funktionen sein könnten (s.o. LAGA-Anspruch). (5) Qualität- und Längen-zugeordnete Klassifizierung fehlt derzeit ebenso wie die Rückverfolgbarkeit aus welchem CFK die rCF stammen)

Risiko: Produkt aus Definierte Schadensgröße x Wahrscheinlichkeit für diesen Schadensfall (VDI 4001, B1.2) oder auch Gefährdungspotenzial x Auftretenshäufigkeit

Roving: Ursprung von Vorspinnen. Gerades bis leicht-gedrehtes (wird rund) Filamentbündel = Multifilament-Garn oder auch aus mehreren Garnen bestehend.

Schlichte (avivage): s.a. Beschlichtung

Sheet Molding Compound SMC: 2D, plattenförmiges Halbzeug mit duromerer Matrix und Faserverstärkung in Mattenform, eventuell auch in Gewebeform. (Kurz- bis Langfasern < 50 mm. Umformprozess mit nachfolgender Aushärtung)

Silikat:

Sizing: Im **Kunststoffbereich**

Splitting (Aufspalten, längs) concrete: longitudinal macro-crack failure mechanism due to *larger internal flaws that may cause concrete splitting due to effects describable by a fracture mechanical condition.* (resulting from compression loading that creates cracks parallel to the compression load axis generated by perpendicular tensile stresses acting at internal flaw tips which are usually combined with so-called wing cracks acting at internal flaw tips which are usually combined with so-called wing cracks)

Splitting Faser: (Aufspalten, längs): Längs-Makroriss-Versagensmechanismus aufgrund größerer interner Fehler, die aufgrund von Effekten, die durch einen bruchmechanischen Zustand beschreibbar sind, zu Betonrissen führen können. Risse beim Beton, die unter resultierende Druckbelastung parallel zur Druckbelastungsachse erzeugt werden, hervorgerufen durch senkrechte Zugspannungen

Solvolyse:

Spalling: Abplatzen von Bruchstücken

Spinnfaden: s.a. Roving, Tow; gesponnene Filamente, beschlichtet, dann schlichte-verklebt im Spinnfaden zusammengefasst und auf Spulen gewickelt. (Note: Mehrere Spinnfäden können zu einem Tow oder einem Roving assembliert werden [Schü06])

Spritzguss: Injektionsverfahren, wobei ein Thermoplast, Duromer oder Elastomer unter Druck in die Kavität eines Spritzgießwerkzeugs eingespritzt wird. (Note: Eventuell Kurzfasernzugabe zur Matrixverstärkung, SMC,

Specific strength: strength-to-mass ratio MPa/kg

spröder Werkstoff: Werkstoff, der unter Zugbeanspruchung ohne signifikante Verformung bricht (Beton)

Stichprobe (sample): ein oder mehrere Prüflinge, die zufällig, also ohne Rücksicht auf ihre Qualität, aus dem Los oder der Charge ausgewählt werden [DIN 40 080, VDI 4001, B1.3]. (Note: Damit gemeint ist ein Satz an durchzuführenden Messungen oder die Summe von Probekörpern)

Strang (strand): Bündel an ungedrehten Filamenten oder langen Einzelfasern

Tenacity: customary measure of strength of a fiber, usually defined as the breaking force of the fiber (in gram-force units) divided by the denier

Tex: Garnfeinheitsmaß 1 tex = 1 g / 1000 m

Thermoplastharz (TP):

Toleranzgrenze: begrenzender Wert (oberer oder/und unterer), der für eine Größe festgelegt ist [ISO 3534]

Toleranzintervall (statistisches): Intervall in dem der spezifizierte Teil p der Merkmalswerte liegt (Note: Das einseitige Toleranzintervall wird z. B. bei der Ermüdungsdauer benutzt und das zweiseitige Toleranzintervall bei einer Wanddickenverteilung oder dem E-Modul)

Tow: dicker Roving Faserbändchen, s. a. Garn, Roving. Bündel aus langen Einzelfasern (früher) und auch aus Endlosfasern (HighTec).

Toxisch: giftig

Tränkung: Roving, Faserstrang, Tow, Gitter. Imprägnierung des Rovings (Styrol-Butadien, EP, TP-compatible), oder eventuell als Komponente eines Heavy Tow oder des gesamten Bewehrungsgitters. Allein gute Tiefenimprägnierung garantiert die notwendige Filament-Benetzung, damit eine möglichst gleiche Ausnutzung aller innen liegenden Filamente stattfinden kann

Verbundbaustoff: (LAGA 2021) aus unterschiedlichen Bestandteilen zu einem Komposit gefertigt

Verbundbauweise: (LAGA 2021)

WHO-‘Fiber‘:* WHO‘Faser‘ = Einzelfaser-Bruchstück mit einem Durchmesser \varnothing von kleiner 3 μm , einer Länge L von größer 5 μm sowie einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von größer 3:1. Eine WHO‘Faser‘ hat also nichts mit technischem Faserlängenverständnis zu tun!

Zelltoxizität: zellschädigende, zellvergiftende Eigenschaften und Wirkungen von chemischen Substanzen (Cytotoxine) oder Zellen.

Zellmigration (migrare = wandern): Aktive Bewegung von Zellen innerhalb eines Organismus im Sinne einer Ortsveränderung. Zellen, die zur Migration befähigt sind wie Makrophagen, können sich spontan oder gerichtet bewegen. Zur Fortbewegung dient die amöboide Bewegung. [WIKI April23, A. Duyar]

Textilglossar zu Fasern <https://www.textilglossar.com/artikel/fasern.html> (27.05.2021):

Textile Faserstoffe werden in Naturfasern und Synthetikfasern unterteilt. Naturfasern werden nur als solche bezeichnet, wenn sie ohne chemische Veränderung am Ausgangsstoff gewonnen oder hergestellt werden. Fasern, wie z. B. Lyocell oder Viskose, die natürlichen Ursprungs sind, werden jedoch aufgrund ihrer chemischen Herstellung den Synthetikfasern zugeordnet.

Naturfasern

- Organische Fasern sind entweder Pflanzenfasern, wie z. B. Baumwolle und Hanf, oder können tierischen Ursprungs sein. Dazu zählen unter anderem Wollen, Haare und echte und wilde Seide.
- Anorganische Fasern sind Mineralfasern, die zum größten Teil aus Silicaten bestehen, wie z.B. Quarz. Diese weisen eine Faserstruktur im Gestein auf. Der bekannteste Stoff dieser Gattung ist Asbest.
- Natürliche Fasern sind in ihren Dimensionen wie Länge und Durchmesser begrenzt und unterliegen wachstumsbedingt Schwankungen. Eine Ausnahme in der Länge bildet hier z. B. die Seide vom Maulbeerspinner. Seine Seidenfasern können mehrere hundert Meter lang sein.

Synthetische Fasern (= Kunstfasern = Chemiefasern)

- durch chemische Prozesse hergestellt werden. Ausgangsprodukt der chemischen Fasern sind Polymere. Diese Polymere sind chemische Stoffe, welche sich aus Makromolekülen zusammensetzen. Die Rohstoffe, aus denen mittels chemischer Reaktionen (Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation) Fasern hergestellt werden, können natürlichen Ursprungs sein. Dabei werden z. B. Cellulosefasern aus Holz zu synthetisch hergestellten Lyocell- und Viskosefasern verarbeitet. Glasfasern oder Basaltfasern haben einen natürlichen, anorganischen Ursprung.
- Synthetische Polymere sind die größte Gruppe der Synthetikfasern. Sie basieren überwiegend auf organischem, fossilbasiertem Erdöl.
- Die synthetischen Fasern beziehen Fasern aus Nicht-Polymeren ein. Die bekanntesten Vertreter dieser Gruppe sind Metallfasern, wie z.B. Aluminium. Mono- und polykristalline Fasern bestehen aus verschiedenen chemischen Verbindungen und finden in hochspezialisierten Gebieten mit höchsten Anforderungen Anwendung (z. B. durch ihre sehr hohen Schmelztemperaturen und Festigkeiten, Moduln). Damit aus diesen Polymeren eine Faser entsteht, kommen Spinnverfahren zum Einsatz (s.??).

Zur Verwendung des Begriffes ‘Faser‘ nebst Auswirkung: medizinisch

Beschreibung nach Donaldson et al., 2010 [Don10] in Fig.12-1:

A Partikel und kurze Fasern: A1: Partikel/kurze 'Fasern' befinden sich im Pleuraspalt. A2: Sie verlassen den Pleuraspalt durch die Stoma (S, Körperöffnung).

B lange Fasern: B1: Eine lange 'Faser' im Pleuraspalt kann die Stoma (S) nicht passieren und hängt sich dort fest. B2:

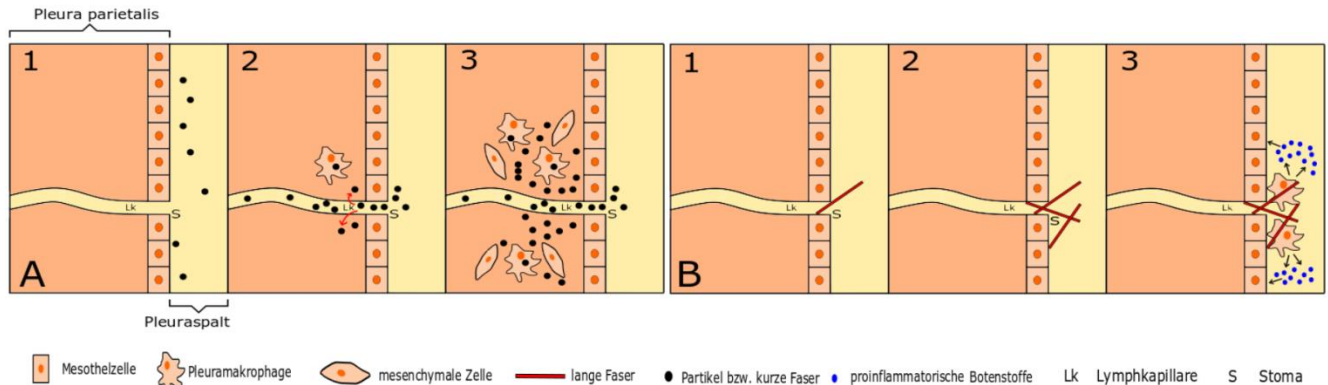


Fig.12-1: Black spots und frustrierte Phagozytose im Pleuraspalt (aus [Leß20], modifiziert nach [Don10])

Medizinischer Fazit:

Die 'Faser'länge ist ein entscheidender Toxizitätsfaktor. Mit dem von Donaldson et al. (2009) postulierten sogenannten 'Aktivitätsparadigma der Fasern' lassen sich daher auch pleurale Erkrankungen zumindest partiell erklären. Fig.2-5 visualisiert die unterschiedlichen Szenarien, die im Pleuragewebe nach Exposition mit Partikeln/kurzen 'Fasern' zw. langen 'Fasern' entstehen können.

12.2 Abkürzungen

AFK	Aramid-Faser-Kunststoff (Name Kevlar)
AGW	
AVK	Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumordnung
BFK	Bor-Faser-Kunststoff (Borfaser ist künstlich hergestellte Ø 100 µm dicke, sehr teure anorganische Mischfaser, die durch eine Bor-Hüllschicht durch Gasphasen-Abscheidung auf eine Wolframkernfaser und weitere Ofenbehandlung entsteht)
BGIA-	Arbeitsplatzgrenzwert-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach der Gefahrstoffverordnung
BsFK	Basalt-Faser-Kunststoff (Zirkonoxid-angereichert)
C ³	Carbon Concrete-Composite
CF	CarbonFaser
CFK	Carbon-Faser-Kunststoff
CFRC	Carbon (short)Fiber-Reinforced Concrete to improve matrix properties ((Kurz)faserbeton als Matrixverstärkung analog zur Polymermatrix beim SMC!)
CMC	Ceramic Matrix Composite (contains ceramic and carbon fibers and also such matrices)
CFRP	Carbon Fiber-Reinforced Polymer (different CF-materials, usually endless fibers!)
CFRC	Carbon (short)Fiber-Reinforced Concrete to improve matrix properties = (Kurz-) 'CarbonFaserbeton' . Kurze Fasern als Matrixverstärkung analog zur Polymermatrix beim SMC!)
CFRP-TP	Carbon(long)Fiber-Reinforced - ThermoPlastic
CLP	CLP-Verordnung regelt Einstufung und Kennzeichnung von gefährlichen Stoffen, Gemischen
CMC	Ceramic Matrix Composites
CNT	Carbon NanoTubes (Kohlenstoffnanoröhren). Einwandig und mehrwandig
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease = chronische Lungenerkrankung
EP	EPoxy (thermoset, Duroplast)
DFG	Deutsche Forschungs Gemeinschaft
DGVU	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DWCNT	Double-walled carbon nanotubes (zweiwandige Kohlenstoffnanoröhren)
FCM	Fiber Composite Materials
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund (generell zu bevorzugen, da allgemeiner als FVK)
FVK	Faser-Verstärkter-Kunststoff (bei Bewehrung zu benutzen) (Faserverbundkunststoff ist IKV(Prof.Menges)-eigene Wortprägung)
FRC	Fiber-Reinforced Composite (should not be used in case of short fibers!)
sFRC	(short)Fiber-Reinforced Concrete (matrix improvement)
GBS	
GFK	Glas-Faser-Kunststoff
HAR-FO	High Aspect Ratio-Fiber Object, L/Ø > 3

HP	High Performance
HM	High Modulus
HST	High Strength Tensile
HT	High Tensile
IPA	Institut für Prävention und Arbeitsmedizin
IFA	Institut für Arbeitsschutz der DGUV
IUPAC	
KIc	Bruchzähigkeit spröder Werkstoffe
LAGA	Bund/Länder Gemeinschaft Abfall
LCA	Life Cycle Assessment (<i>Treiber für Carbon Beton</i>)
MAK	Maximal zulässige Arbeitsplatz-Konzentration (<i>für Styrolverdunstung bereits benutzt</i>)
MMC	Metal Matrix Composites
MRO	Maintenance, Repair, Overhaul
OMC	Organic Matrix Composites
PAK	Polyzyklisch Aromatische Kohlenwasserstoffe (etliche krebserregend, Grenzwert < 1 mg/kg)
PAN	Polyacrylnitril (precursor)
PM	Particulate Matter
PMC	Polymer Matrix Composites
rCF	recycled Carbon Fiber (<i>RCF is not correct! Leads to confusion within construction terms</i>)
rConcrete	Recycled concrete
R	resistance, strength design allowable
RAL	Reichsausschuss für Lieferbedingungen.
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REM	RasterElektronenMikroskop
SAA	Standardarbeitsanweisung
SBP	
SEM	Scanning Electron Microscope
SMC	Sheet Molding Compound containing short fibers = flächige Pressmasse (CF-SMC, GF-SMC), Spritzguss
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoff
TP	Thermo Plastic (matrix)
TS	Thermo-Set (matrix)
UHPC	Ultra-High-Performance Concrete ($f_c > 150$ MPa)
V_f	fiber Volume
VBG	Verwaltungs-BerufsGenossenschaft
WIWeB	Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe
WHO	World Health Organization
WHO-FO	WHO-‘Fiber’ size Object: $\emptyset < 3 \mu\text{m}$, Länge $L > 5 \mu\text{m}$, $L/\emptyset > 3$
WWFE	World-Wide-Failure-Exercise (on UD strength criteria)

Note: Civil Engineering, see *Fig.12-2*, und Glossarerstellung

Die Erstellung auch dieses Glossars [Cun19] wurde dadurch erschwert, dass sich einige Begriffe von der ursprünglichen Definition entfernt haben und dass z. B. der Buchstabe C seit langem auch für Verbundwerkstoffe (composites) und Kohlenstoff (carbon), Beton (concrete), Keramik (ceramics) und Druck (compression) verwendet wird. Häufig wird der Begriff Beton anstelle von Mörtel verwendet, wenn das Bauteil statisch bewehrt wird.

Tabelle 1: Ordnungsschema für Faser-Verbund-Werkstoffe FVW wie Faser-Kunststoff-Verbund FKV, Faser-Beton-Verbund FBV, Faser-Verstärkter-Beton FVB, CarbonBeton CB, BasaltBeton BsB, bi-direktional stabverstärkter Beton BDB, UHP-Carbon(kurz)Faser-Beton UHP-CFB. In grün, bereits früher festgelegte Begriffe. [Cuntze mit Kimm, Heppes, Diestel, Butler, Bielak]

isotrop	Normal-beton	Betonmatrix	Wasser + Zement (bspw. CEM I , CEM III + Gesteinskörnung (Sand, Kies, Schotter) + ggf. Zusatzmittel, wie z. B. Fließmittel, Verzögerer				Größtkorn > 4 mm ¹⁾ Größtkorn < 4 mm	Faserbeton StFB CFB AR-Glas, FB AR-Basalt, PP, PVA Spritzbeton
	Feinbeton ¹⁾		gitterartige Verstärkungsstrukturen 'Bewehrter Beton'					
FB(V)	CB GB BsB (vereinfachende Begriffe)	FVB	UDB		BDB	Textilbeton TB		polymer oder minerale Beschichtung
			Litze, Faserstrang, Stab	Stab-gitter-matte	R-, Q-Gitter-matte	gestickt Sandwich	Vlies (wirr bis orientiert, Kurzfaser bis Langfaser)	
anisotrop	Bewehrungsform		1D	2D Bewehrungsausrichtung		2D	2D – 3D	Kurz-, Langfaser 2D – 3D für Matrixverbesserung
FK(V)	GFK CFK AFK BFK BsFK NaturFK		UD-Schicht Lamelle		Gelege (MAG) Lamelle	Atlasgewebe Köpergewebe Leinwandgewebe	Gewirk Gestrick Geflecht	
isotrop	homogenisierbarer Faser-Kunststoff-Verbund FKV = Verbundwerkstoff		geschlossene Verstärkungsstrukturen				Spritzguss SMC, BMC	
	Duromer Thermoplast	Polymer matrix	Harzsysteme: Epoxide, Thermoplaste, mit Katalysatoren etc.				Faser-kunststoff FK	

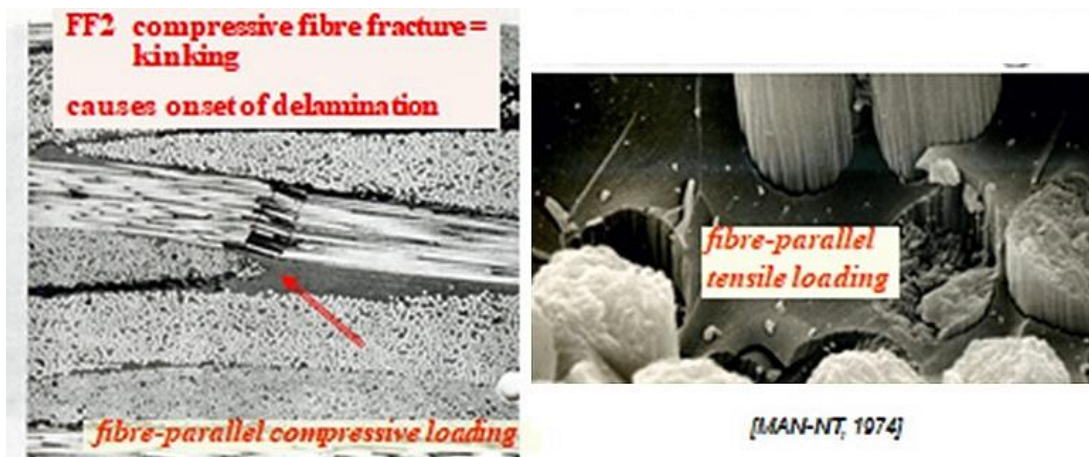


Fig.?: Fracture forms CFRP under tensile and compressive stressing Platz ??

Acknowledgement:

The non-funded author is grateful to:

- * Dr.-Ing. Gabriele Gärtner, Ingenieurbüro Nidderau for the intensive substantial and mental support
- * Dr. Bastian Brenken, for editing above ‘CU-Informationspapier’, which I was waiting for and which involves novel results and will be edited after some rework and complementation
- * Dres. rer. nat. Rolf Packroff and Asmus Meyer-Plath (*both from BAuA*) to present to me/us their knowledge in my CU-Working Groups, some years ago
- * (Prof.) Dr. Michael Heine for his valuable comments (CU, Uni Augsburg, *formerly industry SGL*)
- * Dr. Barbara Güttler for supporting an author’s test idea and more
- * Dr. Anna Grosse, STFI Chemnitz, for the discussion of CarboBreak results and material data delivery
- * Dr. Mareike Schäfer for establishing the fracture-mechanics test.

Author: Prof. Dr.-Ing. habil. Ralf Cuntze VDI, CU Bau; Ralf Cuntze@t-online.de

Ehrenvorstand des praktisch von ihm gegründeten CU Bau.

1970-2004: MAN-Technologie (München and Augsburg). Headed the Main Department ‘Structural and Thermal Analysis’. > 50 years of life with fibers CF and AF (Aramid), GF, BF (Bor), BsF (Basalt), CarbonConcrete and ceramics.

Applications: ARIANE launcher family, CF Cryogenic Tanks, CF High Pressure Vessels, Wind Energy Rotors (GROWIAN Ø 103 m: GF, the CF curing process of the 35mm thick wall at the root could not be handled in 1979; WKA 60, AEROMAN), CF Space Antennas, CF-Gas-Ultra-Centrifuges for Uranium enrichment.

Since 2009 through 2021 with Carbon Composites e.V and thgen with Composites United (CU), founding and heading the working groups ‘Engineering’ and ‘Composite Fatigue’. The final years at CU: Extensive work on carbon concrete by founding and heading two additional working groups in Civil Engineering.

- * April 1970: First Carbon-Filament pieces in his fingertips
- * World-Wide-Failure-Exercises on UD-failure criteria: WWFE-I on 2D-UD, won) and WWFE-II (on 3D-UD, top-placed) 1993-2013)

[Cun23] Cuntze R: *Life-Work Cuntze - a compilation* (> 850 pages). Permanent download address: <https://www.carbon-connected.de/Group/Prof.Ralf.Cuntze>. Addressing his works on materials such as Fibers, Ceramics, Foam, Concrete, 3D-Print and 3D-Extrusion

[Cun06] Cuntze R: *Failure Conditions for Isotropic Materials, Unidirectional Composites, Woven Fabrics - their Visualization and Links*. <https://www.ndt.net> > cdc2006 > papers > cuntze,

[VDI 2014] German Guideline, Sheet 3, *Development of Fibre-Reinforced Plastic Components, Analysis*, Beuth-Verlag, 2006 (in German and English, author was editor, convenor and co-author)

[Cun13] Cuntze R: *Comparison between Experimental and Theoretical Results using Cuntze’s Failure Mode Concept model for Composites under Tri-axial Loadings – Part B of the WWFE-II*. Journal of Composite Materials”, Vol.47 (2013), 893-924

[Cun17] Cuntze R: *Fracture Failure Bodies of Porous Concrete (foam-like), Normal Concrete, Ultra-High-Performance-Concrete and of the Lamella - generated on basis of Cuntze’s Failure-Mode-Concept (FMC)*. NWC2017, June 11-14, NAFEMS, Stockholm

[Cun19] Cuntze R: *GLOSSAR Technical terms for composite components in civil engineering and mechanical engineering. Fachbegriffe mit Erklärung und Definition*. In: Fachbegriffe für Kompositbauteile – Technical terms for composite parts. 171 pages, Springer Vieweg, Wiesbaden (2019)