Ist der Einsatz von Faser-Verbund-Werkstoffen (FVW) generell kritisch zu sehen?

- Gedanken eines Ingenieurs mit langer Faseranwendungserfahrung. -

Ralf Cuntze, Prof. Dr.-Ing. habil. VDI, *Ralf_Cuntze@t-online.de)*
Ehemals MAN-Technologie und Composites United sowie Fachnetzwerk CU Bau

Den Autor haben mehrere Motivationspunkte veranlasst, sich intensiv diesem Themenkreis privat zu widmen: Entwurf, Überarbeitung im Dezember 2026

(I) Als ‘Faserverbundingenieur‘ seit 1970 (*Herausgeber von VDI-2024, Bl.3 und ein Glossar bei Springer*) die Begriffsvermittlung: Ingenieure verstehen das im ‘toxischen Arbeitsgebiet‘ verwendete Wort Faser nicht, welches dort eine Bezeichnung für kleinste Faser-Bruchstücke im µm-Bereich ist. Für Ingenieure ist die Faser ein sehr langer biegsamer Faden.
(II) Als früherer GROWIAN-Blatt-Verantwortlicher: Über durch Medien gestreute Verunsicherung, wenn ein CFK-Rotorblatt herunterfällt oder ein Auto einmal brennt.
(III) Als ehemaliger Gründer und CU Bau-Arbeitsgruppenleiter u.a. pfad-orientierter ‘3D-Druck‘: Einsatz von CarbonFasern (CF) im CarbonBeton nebst zugehörigem Recycling**.**
Teil 1 hat der Autor nach Anregung als zusammenfassende Form seiner ursprünglichen Ausarbeitung von 2023 erstellt. *Teil 2* entstand damals nach einem Gespräch mit Dr. Meyer-Plath (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, BAuA) „*Es wäre schön, einen strukturmechanischen Parameter zu finden, der die unterschiedliche Aufsplitterungsgefahr der verschiedenen CF erklären hilft und damit der Partikelmenge F_{WHO} im kritischen WHO-Bereich*“.

1 Problemkreis und Wissen um Exposition sowie Toxizität von CarbonFaser Partikeln 2
1.1 Problem 2
1.2 -Definitionen von Faser, Staub und Exposition mit Größenangaben 2
1.3 Materialquelle und Entstehung der kritischen F_{WHO}-Partikel 3
1.4 Auftreten von Partikeln im kritischen WHO-Größenbereich, also der F_{WHO} 3
1.5 Unterschied Asbest, PAN-basierte CF und Pech-basierte CF 5
1.6 Entsorgung von Partikeln 6
1.7 Risikobewertungs-Betrachtungen 7
1.8 Einflußparameter-Untersuchungsmodelle zum Entstehen kritischer Mikro-Partikel 7
2 Untersuchungen zu Carbo-Break-Testdaten und weitere Test-Überlegungen 8
2.1 Splitting Tensile Strength Test (Brazilian) für Erklärung der Kugelmühlen-F_{WHO} 8
2.2 Untersuchung CarboBreak-Test-Ergebnissen bezüglich Zugdehnungsarbeits-Parameter 8
2.3 Herstellung von PAN- und Pech-basierten CF 11
2.4 Finite Element Analyse der CF-Mikrostruktur 13
2.5 Messung der Bruchzähigkeit der laser-angekerbten CF (Werkstoffeigenschaft) 13
3 Anhang 17
3.1 Recycling 17
3.2 Erfüllung der Motivationspunkte, Fazit mit Empfehlungen 20
3.3 Begriffe 21
3.4 Literatur 23

1 Problemkreis und Wissen um Exposition sowie Toxizität von CarbonFaser Partikeln

1.1 Problem

Gesundheitliche Auswirkungen auf die Lunge haben sowohl zu große Feinstaubmengen als auch zu viele Faserpartikel F_{WHO} der sogenannten WHO-'Faser'-Größe, F_{WHO}, *Fig.1*. Die Lungenbläschen (Alveolen) liegen im Größenbereich 60 bis 200 µm. Negativen Einfluß hat dabei geringe Bio-Löslichkeit des Materials im Körper, was ein Hinweis auf Kanzerogenität ist. Es wird plausibel, dass zu viel Feinstaub in der Luft (Aerosole) die Alveole 'zumacht'. Durch zu viele staubbedingte Partikel kleiner als die WHO-'Faser'-Größe kann also ebenfalls eine Gefährdung hervorgerufen werden. Schwere Parikel werden von der Nasenschleimhaut und dem Flimmerepithel der Bronchien zurückgehalten. Ein weiteres Problem ist: Längliche steife fadenförrmige Bruchstücke können die Makrophagen durchstechen, was zum Absterben der Makrophagen (*amöbenartige Freßzellen, die den Abbau durch Auflösen, 'Brechen' bei löslichen Partikeln besorgen und anschließende Entsorgung*) und zu Karzenogenität führen kann. Speziell von Interesse sind in dieser Zusammenstellung CFK (CarbonFaserKunststoff) und CarbonBeton.

Da die un-löslichen CF-WHO-'Fasern' praktisch nicht abgebaut werden, müssen die Makrophagen in den Alveolen (Lungenbläschen) das Entsorgen der Bruchstücke bewerkstelligen können, was heißt, dass 'Herausgängigkeit'zu realisieren, *Fig.2*. Die Makrophagenlebensdauer von einigen Wochen entscheidet mit über den Entsorgungs- oder 'Abreinigungs'-Erfolg. Kernfrage nach der Asbestproblematik ist: Wie schnell kann der Körper die betreffenden Faser-Bruchstücke abbauen oder entsorgen? Stellen sich die inhalierten Faser-Bruchstücke, wie hier von der CF, oder die kleineren Nano-Partikel als sehr schlecht biolöslich dar, kann dies zu einer dauerhaften Entzündungsreaktion und weiteren Problemen führen.

Makrophagen sind in der Lage, Mikroorganismen wie Bakterien, Viren oder Toxine zu erkennen und zu vernichten. Sie identifizieren und beseitigen Erreger, die in den Körper eines Menschen eingedrungen sind. Zeitabhängig schaffen sie bei löslichen Partikeln erfolgreiche Abreinigungsarbeit. Bei nicht-löslichen Partikeln ist diese möglich in Abhängigkeit von der Biegsamkeit, also der Steifigkeits-Höhe.

1.2 -Definitionen von Faser, Staub und Exposition mit Größenangaben

Modell Feinstaub: Nach Untersuchungen zur Lungengängigkeit von Partikeln wird nach ihrem aerodynamischen Partikel-Durchmesser. unterschieden, der dem aerodynamischen Durchmesser Ø 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 ($Ø_{aero}$ < 10 µm = 0.01mm, PM 10)
* Lungengängiger Feinstaub ($Ø_{aero}$ < 2.5 µm, PM 2.5. lungenbläschengängig)
* UltraFeine Partikel ($Ø_{aero}$ < 0.1 µm, PM 0.1. Sogar lungengewebegängig)."

Modell WHO-'Faser', WHO-Kriterium für kritische Partikel F_{WHO}: Faser-Bruchstück mit einem Durchmesser Ø < 3 µm, einer Länge L > 5 µm sowie einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von L/ Ø > 3:1. Das klinisch krebser-regungsbekannte spezielle (Staub-)Partikel WHO'Faser' wird also geometrisch *länglich* modelliert. Sogenannte WHO'Fasern' sind somit praktisch eine Untergruppe von Staubpartikeln.

CarbonFasern: Standardfaser PAN-CF, Ø = 7 µm (wie Toray T300), teuere höchstmodulige (mesophase)Pech-CF mit 7 und 10 µm (Marktanteil < 10%). Die weniger festen Pechfasern haben einen kombinierten Vorteil: Sehr hoher E-Modul, praktisch Null-Wärmeausdehungskoeffizient und relativ hohe Wärmeleitfähigkeit gehen hauptsächlich in Weltraumbauteile und Verglühen beim Wiedereintritt in die Atmosphäre. ** "*Original CF sind unkritisch*!".

Da die WHO-Größe F_{WHO} kleiner als der Durchmesser üblicher CF ist, muss das Faserbruchstück den Durchmesser verringern: Dies kann geschehen durch Aufsplitterung bei der mechanischen Bearbeitung

oder auch durch thermische Schädigung bei Brand und in Abfallverbrennungsanlagen (*Fasern verbrennen nicht wegen zu niedriger Temperatur)* sowie kombiniert mechanisch-thermisch. Beim thermischen Prozess ist natürlich eine dünnere CF kritischer.

Um eine Staub-Exposition beurteilen zu können, muss diese quantitativ beschrieben werden. Dies geschieht für Stäube mit Faserbruchstücken in der Einheit sogenannter WHO-'Fasern', d.h in Anzahl von WHO'Fasern' pro Kubikmeter Luft, also F_{WHO} / m³. Festgelegt sind eine Akzeptanzkonzentration (AK) mit 50000 F_{WHO} / m³ als tägliche Exposition über ein ganzes Arbeitsleben und eine maximale, die sogenannte Toleranz-Konzentration (TK) von 250000 F_{WHO} / m³. Längliche, steife Partikel sind toxikologisch kritischer als runde Partikel. Im Bereich zwischen AK und TK wird mittleres Risiko angenommen, darüber besteht so hohes Risiko, dass Arbeitsplatz-Schutzmaßnahmen verpflichtend umzusetzen sind.

1.3 Materialquelle und Entstehung der kritischen F_{WHO}-Partikel

Theoretisch können bei FVW alle Bausteine verantwortlich sein: Faser, polymere oder mineralische Matrix (*CarbonBeton*), Beschlichtung der Faser zur besseren Handhabung, Beschichtung der Faser als Schutz (*Carbon-Matten)*, sowie etwaige weitere Zusatzstoffe. Es muss also, aufwandsbedingt notwendig, der schwierige Weg des Aussortierens der wesentlichen Einflußparameter zur Entstehung solcher kritischer Partikel F_{WHO} gefunden werden.

Beim Bearbeiten, beim Recycling und im Betrieb können durch mechanische Bearbeitung oder thermische Beanspruchung (Oxidation) von den relativ spröden CF-Bauteilen CF-Bruchstücke F_{WHO} entstehen. Sprödigkeit sagt vereinfacht aus, in welchem Maß sich ein Werkstoff plastisch verformen lässt, bis Mikrorisse entstehen. Die spröden Carbonfasern sind üblicherweise in eine Matrix eingebettet. Wenn man also solche Bauteile schneiden muss, dann geht dies nur mit sehr schnell drehenden Sägen und Schleifscheiben. Bei langsam drehenden Werkzeugen splittern die Bauteile auf. Insofern ist das Bearbeitungsverfahren sehr beachten. Eine vorhandene CF-Neigung zum Splitterbruchverhalten führt unter entsprechender Beanspruchung zu den kritischen Splitterbruchstücken F_{WHO}. Dabei führt das Splitterbruchverhalten von (m)Pech-CF zu vielfach mehr solcher F_{WHO}.

Das Mahlen in einer Kugel-Mühle wird beim CarboBreak-Projekt als Worst-case-Scenario für mechanische Bearbeitungsverfahren angenommen (*mechanisches Beanspruchungsmodell ist 'räumlicher Kugeldruck auf eine Zylinderoberfläche', s.a. physikalische Erklärung des Verfassers, später*) und davon dann die Mahl-Ergebnisse untersucht. Hier wäre es für den Anwender in der Industrie sehr schön zukünftig zu erfahren: Wie sind die oben genannten klassischen Bearbeitungsverfahren im Vergleich zu sehen? Man müsste eigentlich also die unterschiedlichen Spannungszustände bei den unterschiedlichen Real World-Bearbeitungsverfahren aufwendig modellieren, um qualitative Unterschiede aufzeigen zu können. Solche unterschiedlichen Beanspruchungsüberlegungen sind aber essentiell für ein angestrebtes Ranking seitens der BauA. Für den Anwender wäre es dabei schön, eine Arbeitsschutzmaßnahme festzulegen, die dann alle minderschweren Bearbeitungsszenarien abdeckt unter Berücksichtigung der Expositionsdauer. Der Schweregrad eines Ereignisses ist natürlich dabei abzubilden.

1.4 Auftreten von Partikeln im kritischen WHO-Größenbereich, also der F_{WHO}

Exposition (eigentlich *Ausgesetztsein gegenüber gefährdenden Bedingungen*): Hängt als Menge der eingeatmeten F_{WHO}-Partikeln vom einzelnen Ereignis und den vorliegenden Schutzmaßnamen ab. Es ist somit wichtig, in der Praxis angewandte mechanische Bearbeitungsverfahren bei Expositionsmessungen in ihrer Durchführung zu analysieren, damit man dann die erhaltenen Fraktionen an unterschiedlichen Partikeln vergleichend bewerten kann. Eine Expositionsmenge hängt ab von den Bearbeitungsverfahren, Arbeitsplatzbedingungen und getroffenen Schutzmaßnahmen.

CF-Toxizität: Die bisher vorgestellten Studien zur Toxizität der Faser deuten auf eine geringere toxische

Wirkung hin im Vergleich zu bekannten kanzerogenen Materialien wie Asbest, Veränderungen als Vorstadium von Krebs konnten nicht gefunden werden. Demgegenüber werden aber seit Jahrzehnten CFK-Implantate eingesetzt. Nach einer NASA-Studie ist die toxische Wirkung von CF geringer als von Asbest und Silica-Stäuben. Der Abbau der Partikel hängt von ihrer Länge ab. Die zugehörige maximale

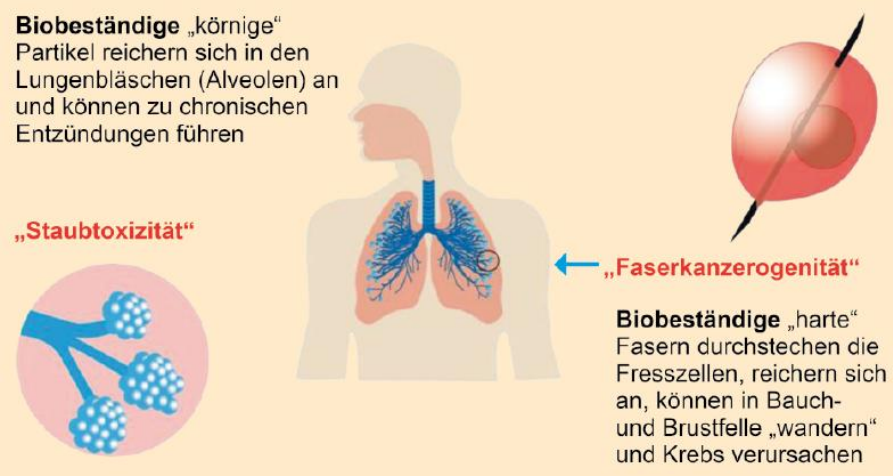


Fig. 1: Gesundheitliche Auswirkungen eingeatmeter schwerlöslicher Partikel. (Brandau-Pollak),

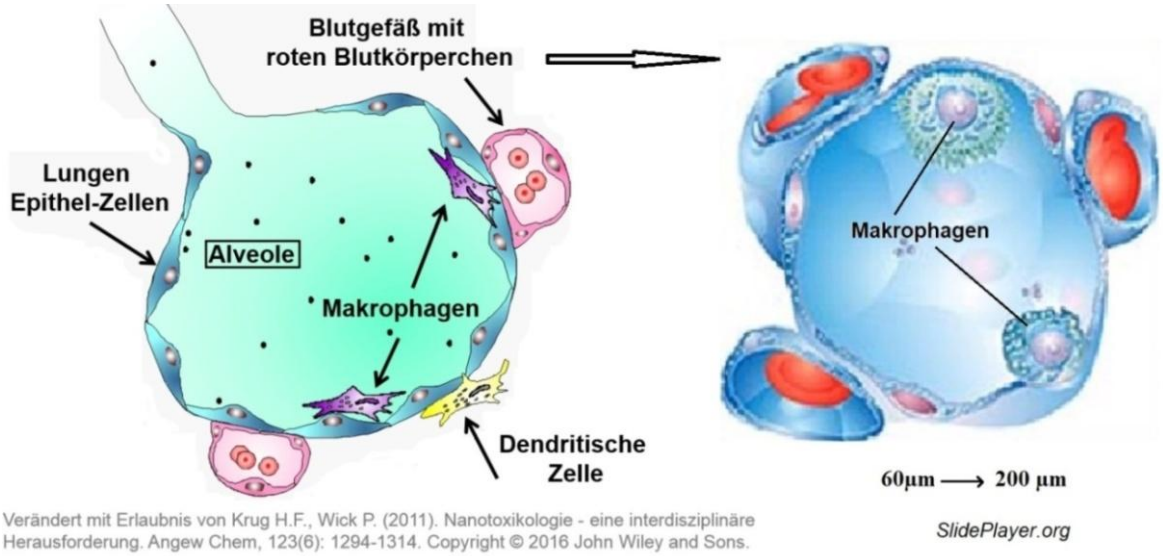


Fig. 2: Alveole mit Makrophagen

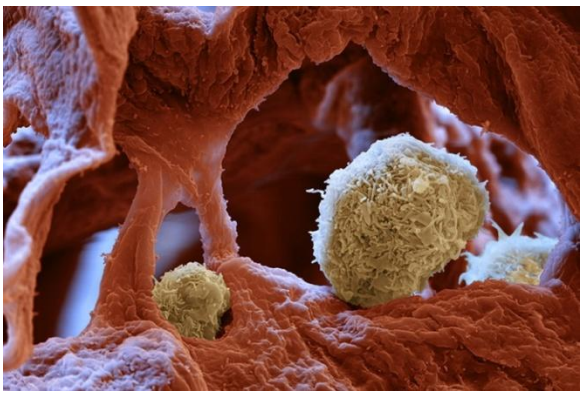


Fig. 3: Makrophagen (beige) sorgen im Lungengewebe (rot) dafür, dass die Atmung trotz Angriff z.B. durch Grippeviren sicher-gestellt ist. (ETH Zürich, Copyright: Eye of Science

Verweildauer muss kleiner als die Makrophagen-Lebensdauer sein. Da sich die unlöslichen CF-Typen biegen lassen (*siehe Knotentest in Fig.4*) und die dünneren umso besser, dürften die Makrophagen solche Partikel beim Entsorgen biegen können. Selbstverständlich hat auch die unglatte Bruchoberfläche einen gewissen, 'bremsenden' Einfluss beim Entsorgen durch die Makrophagen. Dass Faserbruch verkleinern hilft und damit für schnellere Entsorgung verantwortlich sein kann, ist dem Autor statisch nicht erklärlich.

Natürlich können prinzipiell auch die anderen Bruchstücke von CFK kanzerogen wirken.

Gefährdung = Exposition x Toxizität (*üblich ist ein Multiplikations-Modell*

Nur wenn eine hinreichend hohe Menge an F_{WHO}-Partikeln entsteht, ist Gefährdungspotenzial gegeben oder wenn eine extreme Staubkonzentration (Overload) von Teilchen kleiner als F_{WHO} zur Überforderung der alveolen-eigenen Entsorgung führt.

Zeitliche Dauer der Exposition: Bei den anzustellenden Risikobetrachtungen sind Auftretenshäufigkeit und Dauer immer einzubeziehen.

1.5 Unterschied Asbest, PAN-basierte CF und Pech-basierte CF

Asbest (asbestos, deutsch ‚unvergänglich') ist eine Sammelbezeichnung für verschiedene natürlich vorkommende, faserförmige kristallisierte Silikat-Minerale mit Ø bis herab zu 2µm, die je nach Aufbereitungsgrad technisch verwendbare Fäden unterschiedlicher Länge ergeben, die wiederum aus einer Vielzahl parallel verlaufender einzelner Fibrillen aufgebaut sind. Diese Fibrillen haben Durchmesser im Bereich Ø < 0.2 µm. Bei entsprechender Beanspruchung können also Wolken von Asbest-Bruchstücken entstehen. Damit ist die Asbestfaser keine klassische kristalline Faser im Sinne einer Glas- oder Carbon-Faser. *Fig.4* zeigt die unterschiedliche Struktur von einem Asbest'faser'komposit und von Carbon-Fibrillen. Asbest ist chemisch sehr beständig, unempfindlich gegen Hitze und nicht brennbar [WIKI 06.10.2022]. Asbest weist lediglich eine fadenförmige Struktur auf.
Fig.5 ordnet Asbest in eine entzündliche Gefährdiungshierarchie ein.

Das hochspröde, mineralische Asbest zerbricht leicht in kritische F_{WHO}-Partikel, bei einer CF muss man hingegen Gewalt anwenden. Eine PAN-CF ist noch so flexibel, dass man die bekannte Knotenschleife noch recht weit zuziehen kann, bis zuletzt der Bruch eintritt, *Fig.6*. Selbst bei der noch spröderen UHM-Pech-CF ist eine Knotenschleife noch machbar, also ist bei der CF mehr Biegsamkeit gegeben, was essentiell für eine bessere Alveolen-Herausgängigkeit spricht. Nicht nur bei Pech-CF entstehen F_{WHO}-Partikel sondern auch bei PAN-CF, allerdings nur einige Prozent der entstehenden Partikel und weniger als 10% der Pech- F_{WHO} CF-Menge. Bruchoberflächen von CFs sind in *Fig.7* dargestellt.

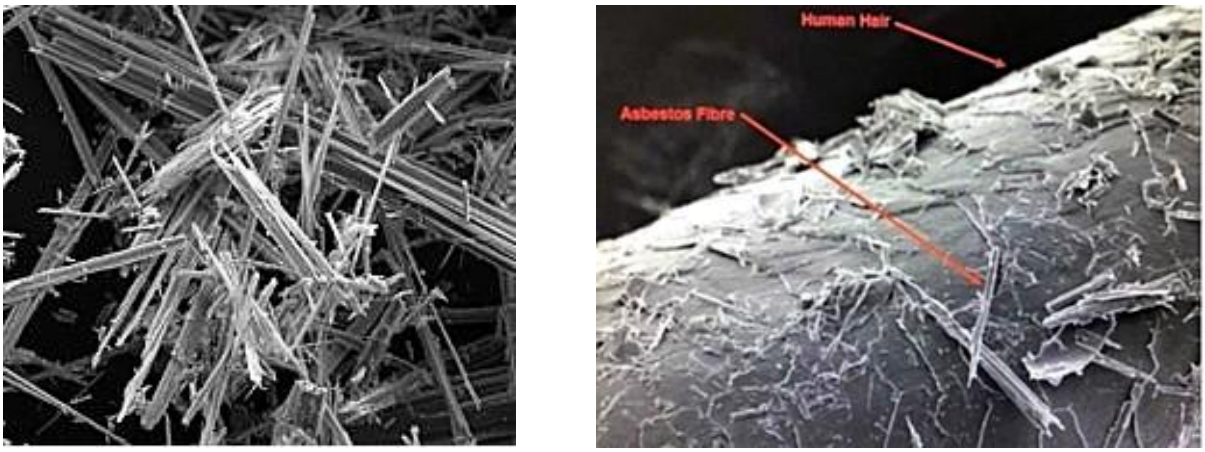


Fig. 4: (links) Asbest'faser'komposit. Anthophyllite_asbestos_SEM.jpg (1024×1024) (wikimedia.org). (right) Roher brauner Asbeststein [Adobe Stock241745935. Fig. 2-12: Asbest'faser'ablagerungen auf einem Haar [rb ASBESTOS CONSULTANTS, 2023]

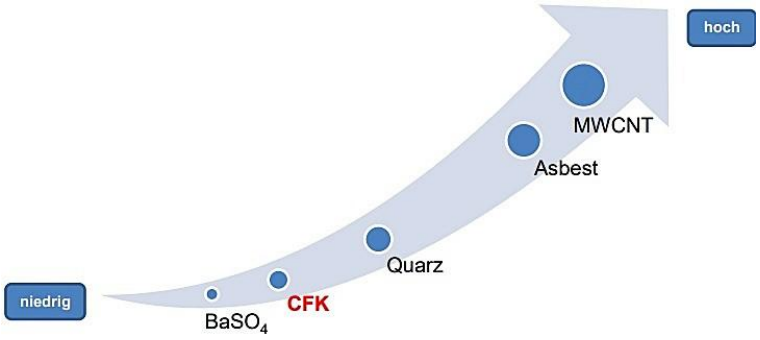


Fig. 5: Gefährdungspotential ‚inflammatorische (entzündliche) Hierarchie' ausgewählter Stäube von Fasern und Partikeln im PICMA (angelehnt und modifiziert nach Schremmer, 2015). [Keß20]. $BaSO_4$ = Bariumsulfat.
Für PAN-CF und Pech-CF mit Matrix basierend auf Epoxidharz + Härter (aromatisches Amin)

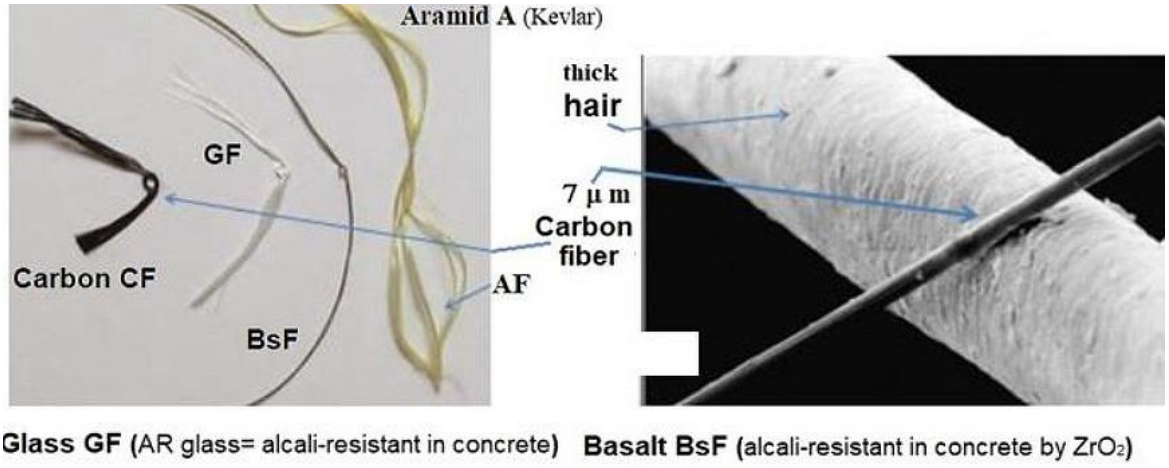


Fig. 6: Einige Fasersorten, die zur Bauteilverstärkung herangezogen werden, wie CF, Glasfaser, Aramidfaser, Basaltfaser und auch Polymerfasern.
(links(Knotentest, (rechts) Faer-Haar-Größenvergleich

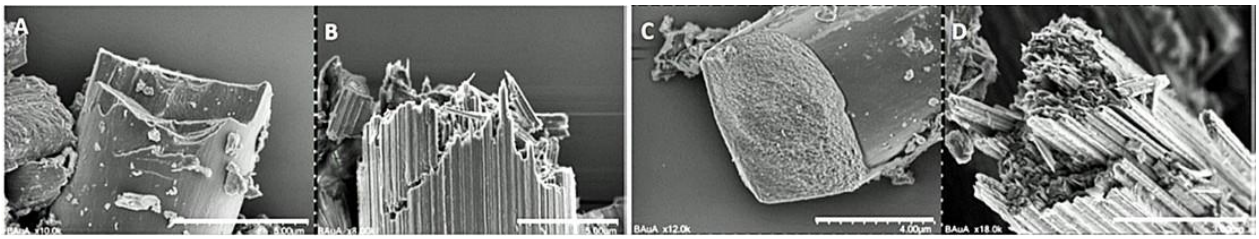


Fig. 7: Bruchfläche von CF für (A) PAN-CF und (B) Pitch-CF; Interne Mikrostruktur von (C) PAN-CF und (D) Pitch-CF; CF-Fragmente, die in den Abrasionsexperimenten entstanden sind. (Courtesy (BauA), BMBF-Forschungsprojekt CarboBreak

1.6 Entsorgung von Partikeln

Die Makrophagenlebensdauer von einigen Wochen entscheidet mit über die Entsorgung von Partikeln.

Bio-lösliche Partikel:

Abbau durch Auflösen und 'Hinausschieben'.

Nicht lösliche Partikel:

Hohe Bio-Beständigkeit bewirkt starke Toxizität. Bruchstücke mit kurzen Verweilzeiten, die schnell aufgelöst oder abtransportiert wer-den, sind weniger risikobehaftet.

Die Biegsamkeit ist ein Parameter, der die Entsorgung des unlöslichen F_{WHO}-Partikels mit bestimmt. Bei gleichem Elasizitätsmodul dürfte bei schlanken dünneren Partikeln (D kleiner) die Entsorgung leichter möglich sein. Die zugehörige Formel für die technische Biegesteifigkeit $E{\cdot}I$ mit dem

Flächenträgheitsmoment I lautet für einen angenommenen runden Querschnitt: $E \cdot I = E \cdot \pi \cdot \mathrm{D}^4 / 64$ und macht dies sichtbar.

1.7 Risikobewertungs-Betrachtungen

Technische Anwendungen verlangen, dass man bei Risikobetrachtungen nicht nur auf etwaiges Gefährdungspotenzial schaut sondern auch auf Auftretenshäufigkeit und Andauer eingedenk „*Ein giftiger Stoff kann keine Auswirkungen haben, wenn es keine Exposition über eine gewisse Zeit gibt".* Eine Risiko-Bewertung basiert auf der Wahrscheinlichkeit (*Eintrittswahrscheinlichkeit oder Häufigkeit oder Dauer eines gefährlichen Ereignisses)* und dessen Schwere (*Auswirkung oder Konsequenzen des Ereignisses*):

Risiko = **Schweregrad (Gefährdungspotential)** • **Auftretenshäufigkeit** (Dauer).

Wahrscheinlichkeit und Schwere werden durch Reihen oder Spalten dargestellt im Multiplikationsmodell von Wagterveld [Wag20] durch die Matrixreihe Exposition (*Länge, Steifigkeit, Wasserlöslichkeit, Bio-Löslichkeit*) und die Matrixspalte Gefahr (*Staub, Grad der Agglomeration, F_{WHO}-Konzentration*). Für den Autor kann dieses Modell die Auftretenshäufigkeit nicht richtig berücksichtigen, wie er es von der Anwendung der Risikomatrix in der Raumfahrt kennt. Das muss zukünftig besser bedacht werden, um die ‚kritisch gesehene' CF-Anwendung realistischer bewerten zu können. Die untere Tabelle müsste man natürlich anpassen.

Risiko = Gefährdungspotenzial (S) • Auftretenshäufigkeit (OF).
Gefährdungspotenzial ist kritische Menge kombiniert mit Toxizität (Multiplikation?).

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 volles 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.

Table: Risiko-Abschätzungsschema in der Raumfahrt

		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					

„Ein gewisses 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 die Anforderung im Rahmen aller mechanisch bearbeiteten Werk-/Bau-Stoffe zu sehen. Es wird ein Maßstab für all diese Materialien benötigt, sinnvolle Schutzmaßnahmen sind anzuwenden, um etwaige Gefährdungen zu minimieren".

1.8 Einflußparameter-Untersuchungsmodelle zum Entstehen kritischer Mikro-Partikel

Um nach der ‚Asbestzeit' sicher zu bleiben, müssen prinzipiell alle entstehemden Mikro-Partikel betrachtet werden, egal ob bei Nanomaterial im 3D-Druck, neuen Naturfasern oder bei CarbonBeton. Eine

vollständige Untersuchung ist somit nicht durchführbar. Nur ein vergleichender Weg ist gangbar zur Reduzierung des riesigen Erforschungsaufwands.

Auf Molekül-Ebene: Frau Professor Andrea Hartwig (KIT) versucht diesen vergleichenden Weg zu gehen. Die Ergebnisse sollten später eine Aussage für die höhere Ebene der Mikropartikelgröße erlauben.

Nach den Struktur-Eigenschaften: Hier sind neben der CF-Bio-Beständigkeit zwei Größen wichtig.

Geometrie: rund, länglich bis lang

Steifigkeit duktil (schlaff) ⇔ spröde (starr), erfordert Untersuchung Steifigkeit + Sprödigkeit.

Kehren et.al, [Keh19], haben für PAN-CF unter mechanischer Beanspruchung gefunden, dass für diese weniger F_{WHO} als bei einer Pech-CF entstehen sowie, dass PANCF > Ø = 3 µm eher rechtwinklig zur Faserachse brechen, während PechCF zu Splitterbruch neigen und dadurch mehr F_{WHO} erzeugen.

2 Untersuchungen zu Carbo-Break-Testdaten und weitere Test-Überlegungen

2.1 Splitting Tensile Strength Test (Brazilian) für Erklärung der Kugelmühlen-F_{WHO}

Der traditionelle brasilianische Scheibentest ist ein indirekter Zugfestigkeitstest für Gesteine, Beton und spröde Baustoffe, bei dem eine Kreisscheibe diametral gedrückt wird, um die Zugfestigkeit effizient und abzuschätzen. Die erhaltene Spannungsverteilung entlang der Belastungsachse des Probekörpers wird in der unteren Figur dargestellt. Während die Enden der Probe unter Druckspannung stehen, befindet sich der Rest des belasteten Durchmessers unter Zugspannung, wobei der Maximalwert im mittleren Teil der Probe erreicht wird. Der Zugspannungs-Versagenswert (= Zugfestigkeit) wird über die Formel $R^t = 2 \cdot F / (\pi \cdot D \cdot t)$ bestimmt, wobei *t* die Scheibendicke und *D* der Durchmesser sind.

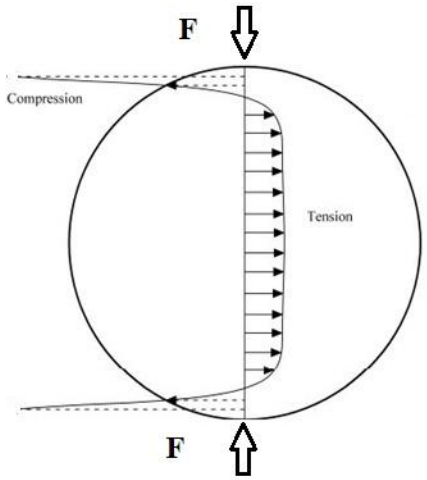


Fig.8: Gedrückte CarbonFaser

Compressive and tensile stresses distribution along the loading axis of a sample during a Brazilian Test (ASTM, 2017)

Wie schon der Test-Name besagt: Dieses strukturmechanische Modell belegt die hohe Aufsplitterungsgefahr bei der extremen Kugelmühlen-Druckbeanspruchung.

2.2 Untersuchung CarboBreak-Test-Ergebnissen bezüglich Zugdehnungsarbeits-Parameter

CarboBreak-Projektbeschreibung der 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 Freisetzungsverhalten von alveolengängigen Bruchstücken aus reinen Fasern und Faserverbundwerkstoffen bei mechanischer Beanspruchung zu untersuchen*.“

Zunächst wird angenommen, dass die Zugdehnungs-Arbeit einen Hinweis auf die Unterscheidung des Aufsplitterungsrisikos gibt. Die mechanische Formel für diesen Parameter ergibt sich aus der Zugdehnungs-Arbeit bei Bruchdehnung der sich linear elastisch verhaltenden CF, so dass sich für die volumeneinheits-bezogene Zugdehnungs-Arbeit ergibt: $\sigma \cdot \varepsilon = E \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon \Rightarrow E \cdot \varepsilon^2$.

Annahme "*Je größer der Parameter-Wert Zugdehnungsarbeit, desto kleiner die Splittergefahr*".

Wie vermutet, kommen für Standard-Pech-CF sehr niedrige Werte heraus und für Standard-PAN-HM-CF (<380 GPa) hohe Werte. Bei den steifen PAN-UHM-CF (> 380 GPa) kommt der Parameter 'Zugdehnungsarbeit' in die Nähe des Pech-CF-Bereichs. Hohe grafitisierungsgebundener Steifigkeit hat also negativen Einfluß und bedeutet gleichzeitig mehr Sprödigkeit als eine betrachtete 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 wohl noch einen Parameter liefern könnte. Bei einigen außerhalb liegenden Werten in *Fig.7* müsste 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. *Fig. 9* komplettiert mit zwei SEM-Bildern den Unterschied zwischen einer bestimmten PAN-CF und einer bestimmten Pech.-CF. Die unterschiedliche Kristallstruktur ist erkennbar.

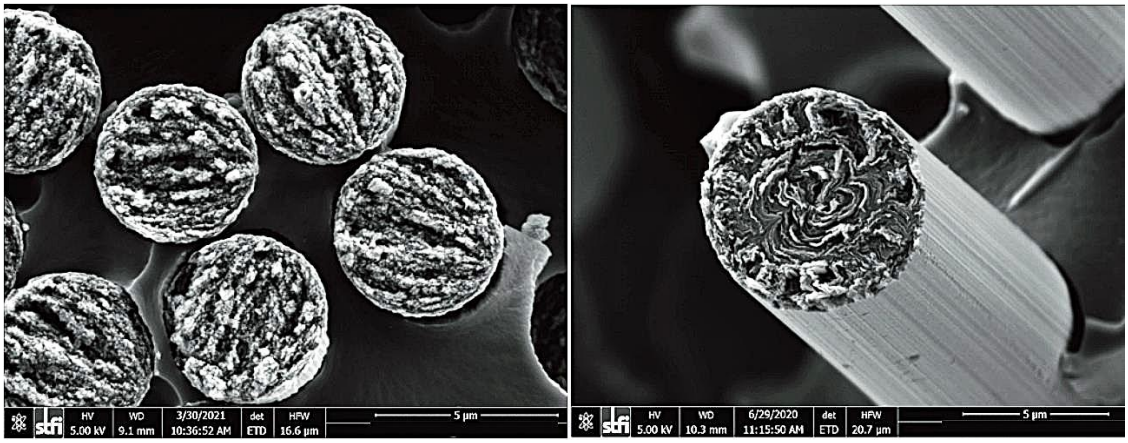


Fig. 9: SEM images of the fracture surfases of a PAN-CF (Sorte) and a pitch-CF with similar mechanical properties [CarboBreak]]
Institut für Gefahrstoff-Forschung (IGF) https://www.igf-bgrci.de › Microsites › IGF › Schlema_IX Ergebnisse der Morphologischen Charakterisierung. S. Plitzko Schlema IX 21.03. Beispiel Carbonfasern:Bruchstücke mit kritischer Morphologie, [BAuA-Info]

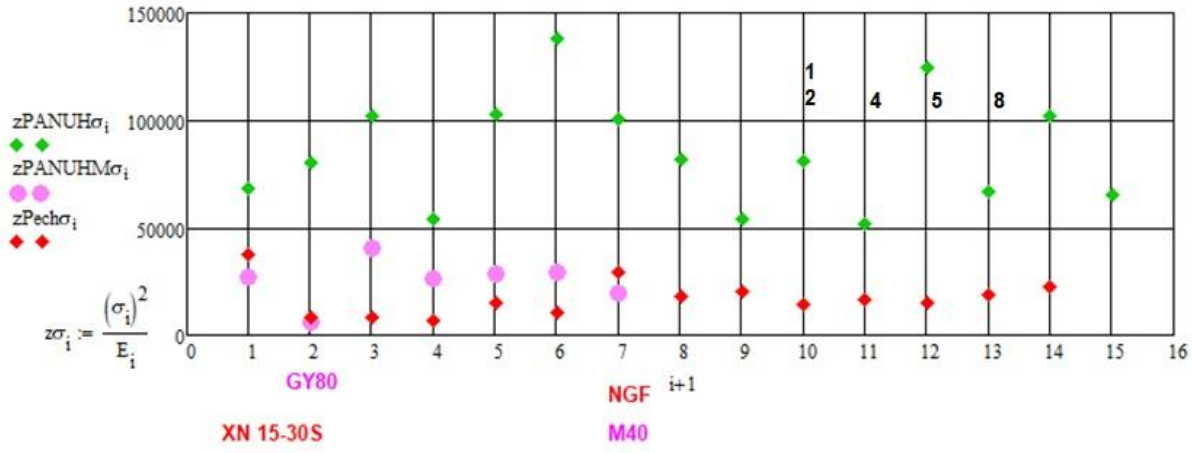


Fig.10, Parameter 'Zugdehnungsarbeit':steifigkeitsunterschiedlich CFs farbig gekennzeichnet. Daten aus der CarboBreak Tabelle 1

Ergebnis: Die Zugdehnungsarbeit, eine Werkstoffeigenschaft, erfasst das Arbeitsvermögen inklusiv Steifigkeit recht gut für die Standard-PAN-CF, für die UHM-PAN-CF gibt es Ausnahmen. Hierzu wollte Frau Dr. Güttler (IVW) prüfen, ob der Graphitisierungsprozeß die UHM-PAN-CF zu ähnlicher ungünstiger innerer Kristallstruktur führt, wie man dies morphologisch bei der aufsplitternden Pech-CF vorfindet.

*CarboBreak–Ergebnis „*A smaller initial carbon fiber diameter was observed to reduce the propensity to form fragments of WHO-fiber morphology*": Dass CF mit Ø < 7 µm zu weniger Aufspaltung neigen, bedarf einer mechanischen Erklärung. Dieses können nur mikromechanische Finite Element-Berechnungen bei verläßlichem Werkstoff-Mikrodateninput klären. Dazu ist aber der nicht einfache Beanspruchungszustand bei der vorliegenden Bearbeitung richtig zu modellieren.

*CarboBreak–Ergebnis "*Densities above 1.95 g/cm^3 are considered WHO-fragments-critical*": Generell die Dichte als Parameter zu nehmen kann zufällig richtig sein. Umkehrschluss: Dies schließt aber fahrlässig einen großen Teil der auch als kritisch betrachteten UHM-CFs aus. Sind diese dann als unkritisch zu sehen, wäre dann die Gegenfrage?

*In wieweit der CF-Durchmesser Einfluß auf die Aufsplitterungsneigung nimmt, ist nicht geklärt. Hier wäre eine strukturmechanische Untersuchung auf Basis einer Finite-Element-Analyse durchzuführen.

Tabelle 1: Liste der Precursor PAN und Pech und ausgewählte CF-Typen. Zusammenstellung der CF-Kenngrößen aus den erhaltenen CarboBreak Daten

	Carbo Break-	Fiber	Pan	ρ g/cm^3	R_f MPa	E_f GPa	$\varepsilon_{fracture}$ %	Ø µm
	Bezug	*HT, IM, HM*	k					
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

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.11*).



Fig.11 : 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 fadenförmige Gestalt annehmen können. (rechts) REM CF,MAN-Technologie (1975)

2.3 Herstellung von PAN- und Pech-basierten CF

.. Wenn strukturmechanische Treiber des CF-Aufsplitterns gesucht werden, muss der kristalline Aufbau betrachtet werden, welcher durch den Herstellprozess entsteht. CF werden mit zwei Hauptmethoden hergestellt, nämlich Polyacrylnitril (PAN) und Pech. 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

PAN CF: Prozess-Schritte [Keß20]):

1) Temperatur-Behandlung des PAN im Bereich von 200 bis 400°C in Luft unter Streckung durchgeführt, um die stabilisierte Faser zu erhalten
2) Karbonisierung im Temperaturbereich von 800 bis 1500°C unter sauerstofffreien Bedingungen, um Verunreinigungen zu entfernen und die Kristallinität des Kohlenstoffs zu verbessern.
3) Graphitisierung, um die Leistungsfähigkeit von CFs weiter zu verbessern, ist ein 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.

Pech-CF: Prozess-Schritte. Diese sind zusammengefasst nach:
https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/carbon-fiber:

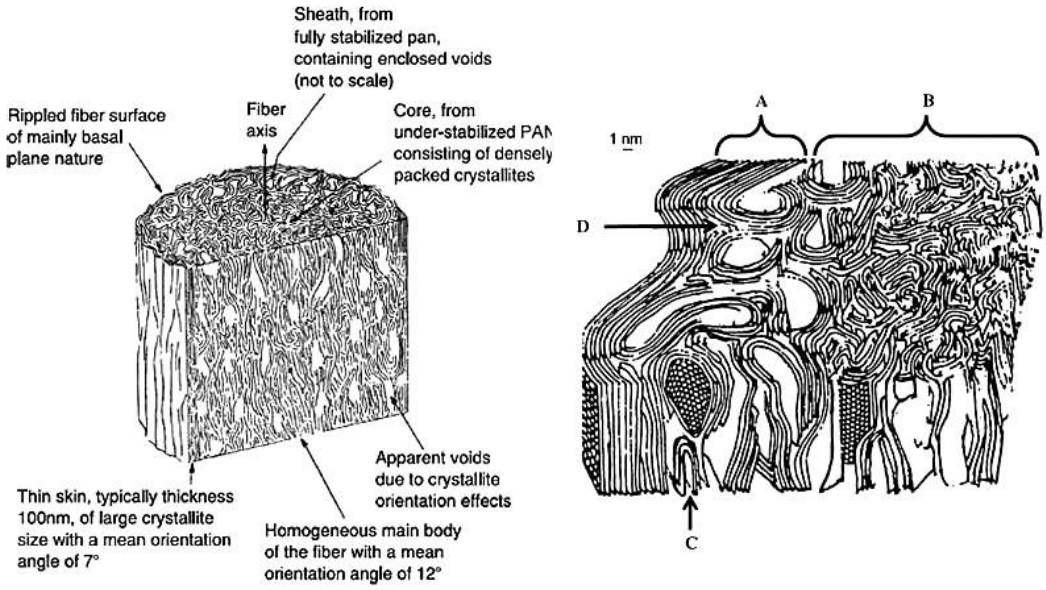
1) Schmelzspinnen: Methode zur Faserherstellung durch schnelles Abkühlen eines Schmelzmaterials; aufgrund der schnellen Abkühlraten kann die Mesophase-Pitch stark ausgerichtet werden. Mesophase-Pitch kann geschmolzen gesponnen werden, aber aufgrund seiner Fließeigenschaften kann der Prozess schwierig sein. Die Viskosität von Mesophase-Pitch ist sehr temperaturabhängig, daher muss die Temperatur genau kontrolliert werden.
2) Oxidation/Vorkarbonisierung: Wird verwendet, um die Fasern zu vernetzen, sodass sie nicht mehr geschmolzen oder verschmolzen werden können. Dieser Schritt ist äußerst wichtig, da er Fasern erzeugt, die bei den hohen Temperaturen der anschließenden Karbonisierungs- und Graphitisierungsschritte stabil sind.
3) Karbonisierung: Prozess zur Entfernung aller nicht-organischen Elemente. Alle Elemente außer Kohlenstoff werden entfernt. Dies wird erreicht, indem die Fasern bei hohen Temperaturen in einer sauerstofffreien Umgebung erhitzt werden. Dieser Schritt entfernt alle Verunreinigungen aus den Fasern und hinterlässt kristalline Kohlenstoffstrukturen.

4) 4) Graphitisierung: Prozess, bei dem die Fasern bei hohen Temperaturen behandelt werden, um die Ausrichtung und Orientierung der kristallinen Bereiche entlang der Faser Richtung zu verbessern. Wenn die kristallinen Bereiche ausgerichtet sind, bietet das einen hohen *R*f.

CFs werden eingeteilt in: ultrahochmodulig (UHM), hochmodulig (HM), mittelmodulig (IM), Standard-Elastizitätsmodul-Typ (HT) und niedriger Elastizitätsmodul-Typ (LM).). PAN-CF können nach Rovingsorten unterschiedlicher Einzelfaser-Anzahl unterteilt werden. ‚Kleine' Rovings (Einzelfaserbündel) bestehen aus mit 3 bis 24k CF-Einzelfasern (Filamenten), die oft für Hochleistungs (*High Performance HP)*-CFs verwendet werden. Die 'großen' Rovings (*heavy tows genannt*) verfügen über 48 bis 320k Einzelfasern, die vor allem für weniger anspruchsvolle Anwendungen eingesetzt werden, wie im Bauwesen.

Es wurde festgestellt, dass Pech-CF in ihrer Kristallstruktur schichtartiger im Gegensatz zu den körnigeren PAN-CF sind. Es wäre zu prüfen, ob das auch annähernd für die F_{WHO} -pechähnliche UHM-PAN-CF gilt [ww.angewandte.org _ 2014 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 5262 – 5298].

Die Basiseinheit in den meisten CF ist der Stapel turbostratischer Schichten. *Fig.12* 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 aufwendige mechanische Modellierung der CF-Mikrostruktur.



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

Fig.12: 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

Fazit, bisherig: Bei der Pech-CF (Teilbilder B und D in *Fig.4*)) war eine deutliche Aufsplitterung zu sehen. PAN precursor–basierte CF splittern weniger als die Pech precursor-basierten CFs. Damit sind diese weniger kritisch.

Ein kristallines Material ist ein polykristalliner Festkörper, was bedeutet, dass er aus vielen kleinen, einzelnen Kristallen besteht, die als Körner bezeichnet werden. Dort, wo diese einzelnen Körner aufeinandertreffen, bilden sie Grenzflächen, Bereiche mit kleinen Ungänzen und damit entscheidend für

das Gesamtverhalten des Materials. Eine gröberkörnige Mikrostruktur fördert die Rissablenkung und erhöht die Energie, die die Ausbreitung eines Bruchs hemmt.

2.4 Finite Element Analyse der CF-Mikrostruktur

Die Ergebnisse von CarboBreak erlauben es noch nicht bereits Schlüsse zu ziehen inwieweit neben den Pech-CF auch UHM-PAN-CF als kritisch einzustufen sind. Diese beiden CF-Sorten sind wohl kristallverwandt, was zu anderem Aufsplitterungsverhalten führt als bei den nicht so graphitisierten Standard-PAN-CF. Eine Untersuchung der Kristallstruktur wäre hilfreich.

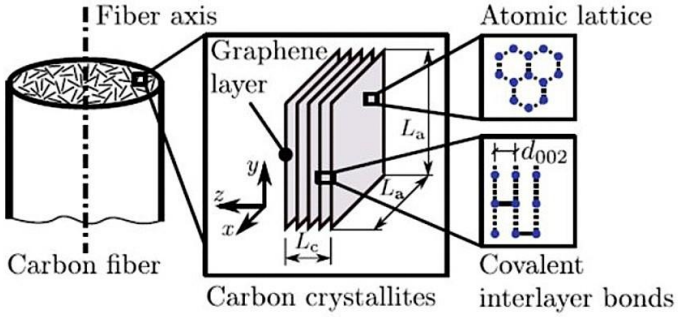


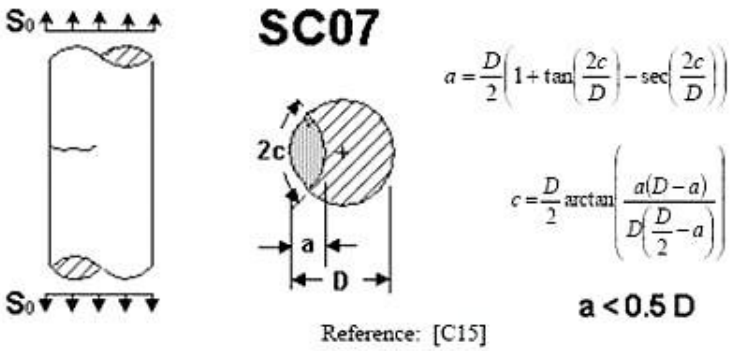
Fig.13: Nanostructure of a PAN-CF [Todt10]

Dazu werden kristallografische Nano-Werkstoffparameter für die CF benötigt. Damit könnte man auf Basis der Erfahrungen von Frau Dr. Todt gezielte mikromechanische FE-Berechnungen durchführen, um Unterschiede im Aufsplitterungsverhalten aufzuspüren.

2.5 Messung der Bruchzähigkeit der laser-angekerbten CF (Werkstoffeigenschaft)

CF-Bruchanalyse: PAN-CFs splittern weniger in Längsachse als die spröderen Pech-CFs, womit letztere kritischer sind. Dieses Verhalten wird durch die Sprödigkeit des Materials bestimmt, da spröde Werkstoffe niedrige Bruchzähigkeit haben. Unterschiedliche Bruchzähigkeitswerte der CFs kennzeichnen also vielleicht unterschiedliche Aufsplitterungsgefahr und wären ein möglicher Einflußparameter.
Der Parameter Bruchzähigkeit könnte also in einem Sprödbruch-Zugversuch an einer laser-gekerbten Einzelfaser zu einer Charakterisierung des CF-Werkstoffs abgeschätzt werden. 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 $K_{Ic} = \sigma_{\text{Bruch}} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$.

Dabei berücksichtigt der sogenannte Geometriefaktor Y, dass der Wert theoretisch nur bei unendlich großen Platten unabhängig von den Abmessungen des Probekörpers ist. Also muss für den vorgesehen Probekörper ‘Angekerbte Einzelfaser‘ die entsprechende Funktion aufgesucht werden. Dies war möglich durch das dem Autor zugängliche Manual „NASGRO Reference Manual Version 9.01 Final; December 2018. Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software”.



Reference: [C15]

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

		Tensile loading					
		a-np			*c-np*		
	*R/t⇒	0.25	0.5	2.0	0.25	0.5	2.0
a/c	*a/t*	$F_o = K / S_o\sqrt{\pi a}$					
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. 14: Thumbnail crack in a solid cylinder. Surface crack case SC07 Manual NASGRO Reference Manual Version 9.01 Final; December 2018. Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software

Bestimmung der Sprödigkeit bei CarbonFasern

Die Anwendung des vollständigen Modells erfordert mehrere Annahmen:

- CF ist ein sehr sprödes Material
- Die Rissinstabilität, ausgedrückt durch die Formel, kann auf Mikrometerebene (Mikromechanik) für diese spröden Materialien angewendet werden!
- Der vom Laserstrahl geschnittene Querschnitt ist einfach ein Kreisquerschnitt, kann aber auf die elliptische Form eines typischen Risses übertragen werden
- Das 'Modell für einen Vollzylinder', angegeben als SC07 im NASGRO-Dokument, ist anwendbar. Erfahrungen haben gezeigt, dass der Einfluss gering ist, das Modell kann auch im µm-Bereich verwendet werden
- Die Risstiefe a wird durch die Lasernkerbtiefe angegeben
- Durchmesser D = Ø = 0.007 mm, UHM 60J
- Die aufgebrachte Bruchspannung an den Faserenden ist Zugkraft F geteilt durch die Querschnittsfläche: F / A
- Der Querschnitt, der vom Laserstrahl angekerbt wird, kann auf die elliptische Form eines typischen SC07-Risses übertragen werden. Der Unterschied in der Oberfläche wird vernachlässigt, da er bei allen getesteten Fasern gleich ist. In der zu SC07gehörigen Tabelle C15: Für R/t = 0, also einen Vollzylinder mit *R* = 0 (*t* = *Wandstärke* = *R*), ist ungefähr a/t = 0,3 zu erwarten, ergibt c/t = 0,35 und damit *Y* = 1,6.

„Zugversuch an Einzelfasern nach ISO 11566“ (*Zwick-Röll hat eine solche Prüf-Vorrichtung, Fig. 15*): Hierbei wird die einzelne Faser mit Hilfe eines Papierrahmens in den gezeigten Feder-Schraub-Probenhalter eingespannt. Die einzelne Faser im Bereich Ø 7µm 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 1Newton-Bereich auf. Die Dehnungsermittlung wird über den Traversenweg bestimmt.

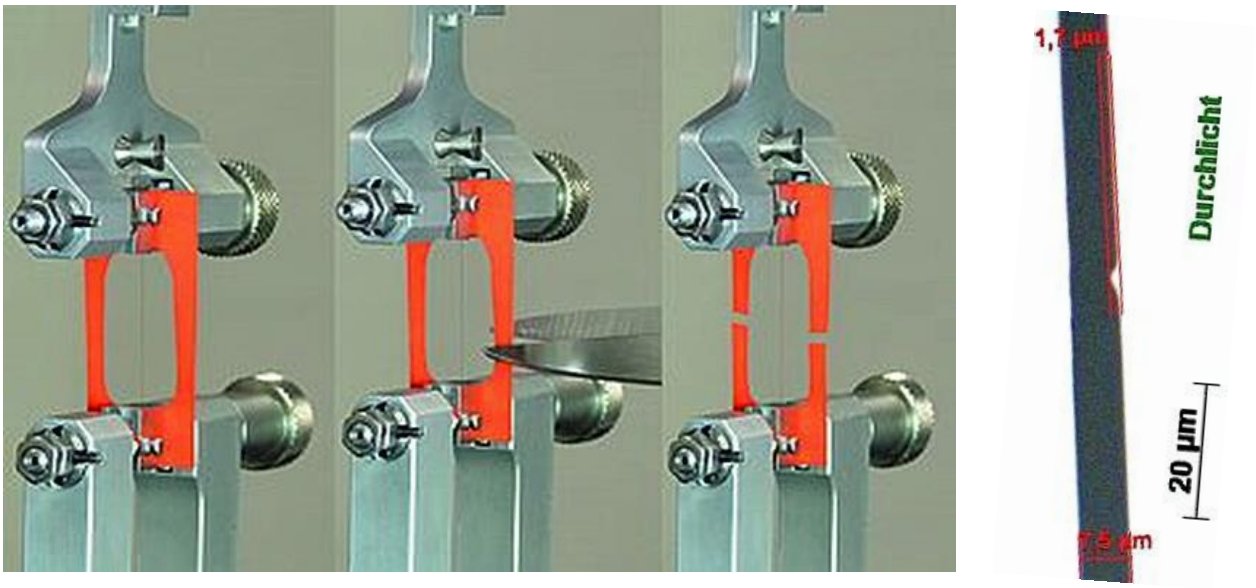


Fig. 15: (links) Zugversuch an Einzelfasern nach ISO 11566. (rechts) angekerbte Einzelfaser

Nachfolgend ist eine mit dem Programm MathCad durchgeführte Beispielrechnung 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.

In der Tabelle 8b (Seiten 89 und 90, Kapitel 2.0 Ermüdungsrissausbreitungsanalyse) sind die Anfangsfehlergrößen c angegeben, um eine Rissausbreitungsanalyse zu ermöglichen. Jedoch ist dies nicht die volle Aufgabe hier. Es wird nur ein quantifizierbarer relativer Unterschied zwischen verschiedenen Fasern gesucht. Dies bedingt einige Annahmen:

* Bruchmechanisches Modell kann für dies spröde Material auf der µm-Skala angewendet werden
* Beschreibung folgt den Beziehungen für einen elliptischen Riss (siehe *Fig.14*), a < 0.5D.
* Eine vereinfachende Annahme: Der Querschnitt, der vom Laserstrahl geschnitten wird, ist nur ein Kreissegment, kann aber auf die elliptische Form eines typischen Risses übertragen werden.

Die Testidee konnte in Kaiserslautern vollständig umgesetzt werden, was beim Testen ein seltenes Glückserlebnis ist. Die Verwertung der Idee wurde bisher nicht gefördert.

Bruchzähigkeit der laser-angekerbten Einzelfaser(Werkstoffeigenschaft): Parameter erfasst das Sprödbruchverhalten des Faser-Werkstoffs. Die Durchführung der Versuche (Kosten, Bezahlung?) ist in Kaiserslautern möglich: Frau Dr. Schäfer, PZKL, mit Frau Dr.Güttler, IVW. Ein Versuchsprogramm würde die Fasertypen Standard PAN-CF, UHM-CF und Pech-CF erfassen. Die Festlegung der 3 auszuwählenden Fasern erfolgt nach Marktgröße und Wichtigkeit. Die Vielfalt von angewendeten PAN-CFs soll exemplarisch für Toray genommen werden, *Fig.16*.

Rechnung zur angekerbten Faser

Geometrie-Eingabedaten:

$$D = 0.007mm,\ a = 0.1 \cdot D,\ b = \frac{a \cdot (D-a)}{D \cdot (0.5 \cdot D - a)} = 0.225,\ c = 0.5 \cdot D \cdot a\tan(b) = 0.0008$$

Formel-Eingabedaten: $\sqrt{1000} = 31.6,\ t = 0.5D,\ R = 0,\ R/t = 0, a/t = 0.2,\ a/c = 0.90$

aus Tabelle 8b (für einen Hohlzylinder) der Geometriefaktor Y=1.5,

Tabelle liefert keinen Wert für einen Innenradius R = 0, klingt aber ab für R/t < 0.25.

Berechnung der Bruchzähigkeit:

$$K_{Ic} = \sigma^t \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y = 50 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0.1 \cdot D} \cdot 1.5 = 3.5MPa \cdot \sqrt{mm} = 3.5 \cdot \sqrt{1000}MPa \cdot \sqrt{m}.$$

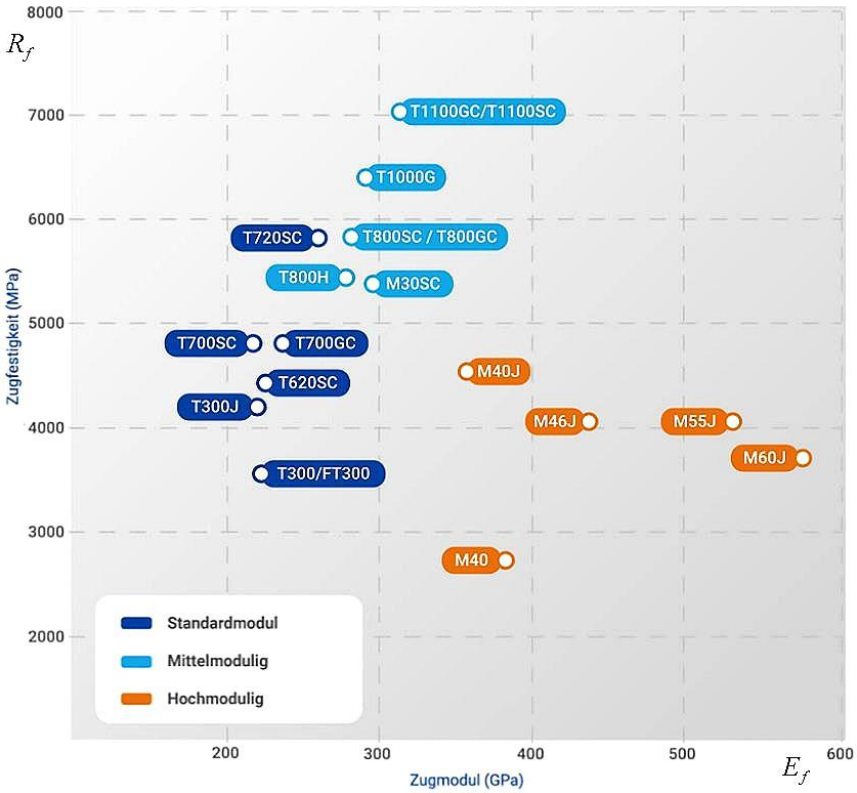


Fig. 16:
Toray's Klassifizierung ihrer Fasern (index f). Zug. R_f (E_f)

Noch ziemlich unbekannt, aber mit zunehmender CarbonBeton-Anwendung immer wichtiger ist die noch etwas unbekannte 'Faserverstärkung im Bauwesen'. *Fig. 17* zeigt die CF auf, die im Bauwesen verwendet werden und *Fig.18* schließlich faser-verstärkte Halbzeuge mit Polymer- und Mineralmatrix im Bauwesen.

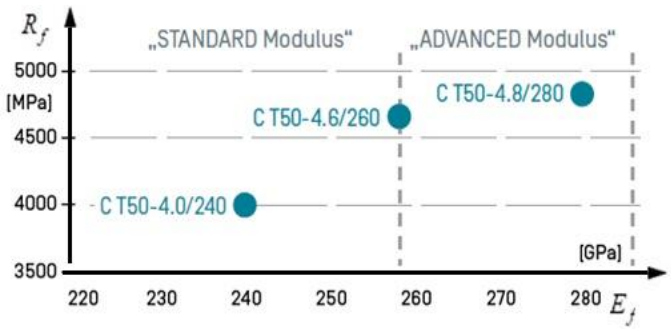


Fig. 17:
Zugfestigkeit (E-Modul) von Sigrafil-Einzel-Fasern 50k-Heavy Tows. ('dicke' Rovings) von SGL für das Bauwesen.
T300-Klasse.
50k ist 50000, R_f = 4000MPa, E_f =240 GPa. CT50 mit 235 MPa, $\varepsilon_{fracture}$ = 2 %

Bei gleicher Masse hat CFK eine mehrfache Zugfestigkeit und Steifigkeit von Stahl mit dem Effekt 1 kg CFK kann 5 kg Stahl im Beton ersetzen. Preis 2023: ca. 16 €/kg CF-Roving, 30€/kg Bewehrungs-CF-Matte. Nur mit einem energie-optimaleren Herstellprozess sind zukünftig noch Preisreduktionen zu erwarten (Seit 1970 -2020 ein Faktor 100 für einen 2k-Roving).

Erst eine Mengen-Orientierung (Daten 2023) hilft sinnvolle Recycling-Maßnahmen anzusteuern, speziell beim CarbonBeton.

150kt CF bedeuten 150kt/ 4.000.000kt = 0.004 % Rohöl.
CF total / Stahl = 1/10000. Beton / Rohöl = 1 , GF / CF ≈ 100.
Ein PKW verbraucht etwa *1 t Öl / Jahr, Hausheizung etwa 2 t Öl / year.*

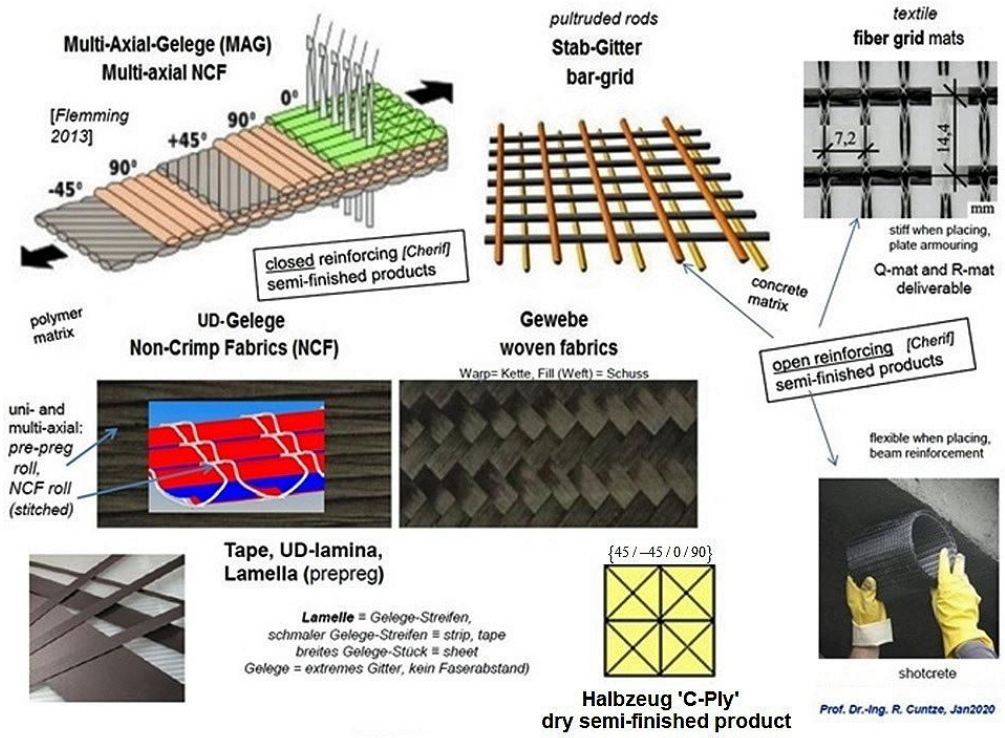


Fig.18:

Verstärkte Halbzeuge mit Polymer- und Mineralmatrix im Bauwesen

3 Anhang

3.1 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 ungewünschten letztendlichen Entsorgung.

Beispiel Windrotorblätter: Bis 2026 könnte somit jeder zweite Windenergiekonverter in Deutschland ans Ende seiner Betriebszeit gelangen. (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). Ein Weiterbetrieb ist zu prüfen unter Berücksichtigung steigender Wartungskosten oder es ist zu recyclen.

Nachhaltigkeit durch Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz bedeutet Recycling. Recycling ist ein Konzept, Werkstoff für einen erneuten Einsatz zu erhalten oder ein nutzbares Bau-Produkt zu erzeugen, das weiter verwertet werden kann und einen Markt findet. Beim Recycling werden wieder verwendbare Restwertstoffe gesucht: Polymere, Fasern, Beton, Stahl. Die Recyclingfasermenge rCF betrug in 2018

etwa 50 % der angefallenen ca. 25000 t CF / Jahr aus Produktionsabfällen, Prepreg-Kühlunterbrechungen, Schlechtteilen durch Herstellungsfehler, Windmühlenblättern etc. Dabei erfordern CFK mit seiner polymeren Matrix andere Recyclingmethoden als CarbonBeton mit seiner mineralischen Matrix.

Problem bei Verbundwerkstoffen ist, dass der Strukturwerkstoff gleichzeitig mit dem Produkt entsteht. Wunsch wäre also 'Design-to-Recycling', um nur minimalen Abfall von der Wiege bis zur Bahre zu erzeugen. Das Recyclen dieses Strukturwerkstoffs geschieht bei den beiden Matrixtypen gemäß

Polymere Matrix: Die grundlegenden Recyclingmethoden bei Vorliegen einer *polymeren* Matrix sind ‚Pyrolyse' oder die ;Solvolyse' zum chemischen Auflösen des Harzmaterials in der Matrix aus einem ausgedienten FKV-Bauteil, so dass Fasern und Harz wiederverwendet werden können. Dabei wird im Sinne der LAGA-Anforderungen seit einigen Jahren versucht (USA, nun auch in D) lösbare Verbindungen zu schaffen, die die Wiederverwendbarkeit ganzer-Bauelemente ermöglichen soll. Dabei wird ein hybrides Harzsystem verwendet aus temperatur-lösbaren (TP) und festvernetzten Anteilen (EP), die die gewünschte Matrix, das ausgehärtete Harzsystem, bilden.

M*ineralische* Matrix: In der CarbonBeton-Industrie heißt es für die *mineralische* Matrix im CarbonBeton-Bruch ‚Mechanisches Recycling', was bedeutet:

* ein ökologisch, sowie ökonomisch günstiges Verfahren möglich zu machen.
* Dabei gilt es neben den verwendeten Fasern (*nicht nur für die CF*) für das trennende Aufbrechen zu beachten: Beschlichtung (*Avivage*) der Fasern durch unterschiedliche Schlichte; Durchtränkung (*Imprägnierung*) des Faserstrangs durch unterschiedliche Matrices (Harzsysteme: EP, TP) und bauteilangepasste Schutz-Beschichtung des ausgehärteten Composite-Bauteils. Es ist neben den CF ein Mehrkomponenten-Gemisch
* Ein verfahrenstechnisch aufwendiges und teures Trennen der einzelnen Gemisch-Bestandteile im Bruch ist effizient einschließlich der Bruch-Korngrößen auszuführen, sowie die erhaltenen Anteile der für die Herstellung von Bauteilen benötigten Korngrößen der Sieblinie ist zu gewährleisten.
* Eine Verwendung der kleinsten Fraktion im '3D-Druck' (hier praktisch der *pfadorientierte Raupenguß*) ist schwierig wegen der benötigten Viskosität (*Zusatzmitteleinsatz*) und zeitlich veränderlichen Klebrigkeit während des Auftragens der Raupen übereinander.
* Eine Verwendung als Zuschlagstoff im Oberbau dürfte eine praktische Lösung zu sein.

Einige Fakten zu recycelten CarbonFasern rCF:

Unter andauernder statischer (Kriechgefahr) und mehr noch unter zyklischer Belastung (Ermüdung im Betrieb) sind rCF den Original-CF immer sehr unterlegen!

(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 pyrolisierte rCF.

(2) zumeist als CF-Kurzfaservliese und Garne zur Weiterverarbeitung erhältlich, was ein 'Down-sizing' darstellt.

(3) Die Verwertung von rCF als Kohlenstofflieferant in der Stahlproduktion wird untersucht.

(4) Design-to-Recycling ist zu beachten. Aufgrund des 'Downsizing der Festigkeit' müssen passende Produkte gesucht werden, die nicht mehr Hightec im Sinne höchster Beanspruchbarkeit sind, aber bezüglich sonstiger Funktionen sein könnten (s.o. LAGA-Anspruch).

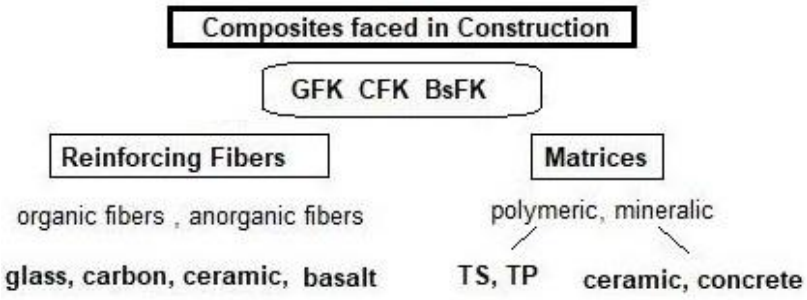
(5) Qualität- und Längen-zugeordenete Klassifizierung fehlt derzeit bein Rezyklat ebenso wie die Rückverfolgbarkeit aus welchem CFK die rCF stammen).

Auflagen der Regierung mit Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall LAGA

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 LAGA [*verstaerkte-beruecksichtigung-der-ressourcen-effizienz-bei-der-bewertung-der-nachhaltigkeit-im-bauwesen_langbericht_2_1629269218.pdf (laga-online.de)]* ansetzen. 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.

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 in Richtung kritischer 3µm Ø. Deswegen ist es wichtig, z.B. CF-Sportgeräte nicht mit dem Hausmüll zu entsorgen.

Welche FaserVerbundwrkstoffe im Bauwesen möglich sind zeigt nachfolgendes Bild:



Überblick Composite-Materialien (BasaltFaserKunststoff BsFK, ThermoSet (TS, epoxy), ThermoPlastic (TP)

Untenstehendes Ordnungsschema gibt abschließend noch einen Überblick zu den vielen Kombinationsmöglichkeiten von FaserVerstärktemBeton (FVB) und FaserVerstärktemKunststoff (FVK):

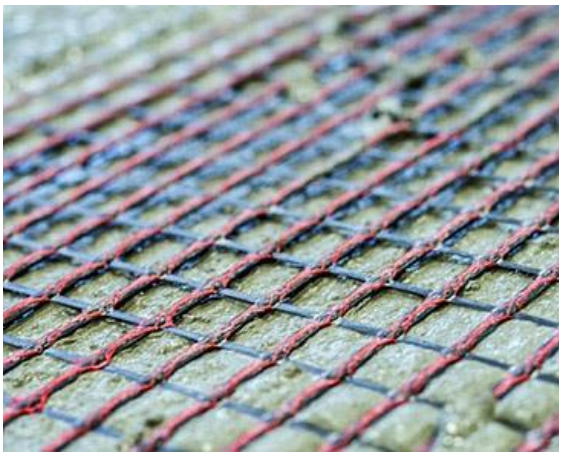


Ordnungsschema für Faser-Verbund-Werkstoffe FVW

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]

Das Recyclen beim CarbonBeton anders ist, macht unteres Doppelbild klar.





(links) Brückendecke Wurschen, (rechts) Carbonfaser-Bewehrungsmatten

3.2 Erfüllung der Motivationspunkte, Fazit mit Empfehlungen

Erfüllung der Motivationspunkte

I. Begriffsverwirrung: Unterschiedliche Faserbegriffe vermittelt.
II. Verringerung der Unsicherheit durch Darstellungen in den Medien, wenn ein CFK-Rotorblatt herunterfällt oder ein Auto einmal brennt: Hier sind CU und BAuA angesprochen, einfach formuliert für Klarheit zu sprechen.
III. Einsatz von CarbonFasern (CF) im CarbonBeton nebst Recycling: Gedanken des Autors zu realistischer Betrachtung vermittelt.

Fazit des Autors mit Empfehlungen

- Extreme Konzentrationen an F_{WHO} sind kritisch, da diese zur Überforderung der Entsorgungskapazität der Alveolen führt.
- CarboBreak: Eine zusammenfassende Aussage für PAN-CF (HM, IM + UHM) sowie mPech-CF (Pech-CF normalerweise nur genannt) für Standarddurchmesser Ø = 7 µm mit Anmerkungen zu Abweichung von den Standarddurchmessern wäre hilfreich bei PAN-CF für 5 µm und Pech-CF für 10 µm.
- 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 z. B. aber nicht am Bau verwendet)
- Keßeler 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“

- 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 zusammen eintritt, ist eine Gefährdung gegeben
- Schutzmaßnahmen werden auf Basis der gemessenen Expositionen an Arbeitsplätzen festgelegt
- Volumeneinheits-bezogene Werkstoffeigenschaft ‘Zugdehnungs-Arbeit‘ elastisch verhaltender CF erfasst mit $\sigma \cdot \varepsilon = E \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon \Rightarrow E \cdot \varepsilon^2$ das Arbeitsvermögen über den Steifigkeitsparameter E-Modul recht gut für die Standard-PAN-CF, aber es gibt leider für die eventuell kritischere UHM-PAN-CF Ausnahmen
- *Biegesteifigkeit*, Einfluß eines zylindrischen Partikel-Durchmessers auf Entsorgung: $E \cdot I = E \cdot \pi \cdot \mathrm{D}^4 / 64$: Bisher nicht richtig vergleichend untersucht
- *Sprödigkeit* mit Testvorschlag zwecks Abschätzung der potentiellen Splittergefährdung unterschiedlicher hochmoduliger PAN- und Pech-CF die vermutete Bruchzähigkeit mit dem Wert $K_{Ic} = \sigma_{\mathrm{Bruch}} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y$
- Zusammenhang Elastizitätsmodul-Bruchzähigkeit: $K_{Ic} = E \cdot (1 - \nu) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$
- Abschätzung der splitterverursachenden Zugfestigkeit R^{t} des gequetschten runden Partikels mit $R^t = 2 \cdot F / (\pi \cdot D \cdot t)$ möglich
- Hoffnung: Die früher durchgeführten, preiswerten Roving-Schlaufentests können als ‘Biegetests‘ zukünftig zur Vor-Klärung einer Faser-Kritikalität verwendet werden.

Abschließende Gedanken, Empfehlungen

Gemeinsam versuchen, dass neben den so sinnvollen Arbeitsplatz-Sicherheitsmaßnahmen und den notwendigen Sicherheitsvorsorgemaßnahmen keine unsinnigen Auflagen zu wachsenden Problemen der Leichtbauindustrie führen. 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 F_{WHO}), Stickdioxid sowie Schall-und Lärm.

Eine ordnungsgemäße Anwendungsempfehlung für faserverstärkte Verbundwerkstoffe (FVW) dem Nutzer herausgeben. Das setzt beispielsweise beim CarbonBeton die gleichen Anforderungen an den Arbeits- und Gesundheitsschutz voraus wie bei herkömmlichem Stahlbeton.

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.

Herausstellung der Bedeutung von Matrixpartikel der WHO Größe F_{WHO}

Die Förderung der erfolgreich in Kaiserslautern realisierten Testidee zur Bestimmung der Bruchzähigkeit als eine vielleicht die Aufsplitterung treibenden Parameter.

Ist der Einsatz von Faser-Verbund-Werkstoffen (FVW) generell kritisch zu sehen?

Nein, bei Beachtung aller Vorgaben.

3.3 Begriffe

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

Beschlichtung: Überzug der Fasern für textile Verarbeitung (Faserschlichte).

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

Beton und Mörtel: Verbundwerkstoff aus Zement + Zusatzstoffen + Wasser + Gesteinskörnungen + Zusatzmittel. (Zement dient als Bindemittel für die anderen Bestandteile

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 dienten 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 könnehttps://www.sager.ch/de-ch/file/zertifikate-1/saglan-biopersi-d773.pdf

Bruchzähigkeit: Widerstand eines Werkstoffs bei vorliegenden Rissen und Delaminationen

Degradation: Abbau der Werkstoffeigenschaften unter Last- und Umwelteinflüssen Partikel (from the latin word particula = small part): umfaßt generell flüssige und feste Teilchen wie Stäube, Flusen und Faser-Bruchstücke. Medizinisch werden längliche Partikel mit ‘Faser‘ bezeichnet

Duromer: 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)

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

Faden: ein aus Fasern zusammengesetztes, biegeschlaffes Gebilde, das eine dominierende eindimensionale Erstreckung sowie Gleichmäßigkeit in Längsrichtung aufweist

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 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)

Organische Fasern, Anorganische Fasern: Siehe Textilglossar 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

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, bestehend aus einer lasttragenden, steifigkeitsgebenden Faserverstärkung und einer Kunststoffmatrix als Bettungsmasse, die die Fasern stützt und schützt

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

Duromer: 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)

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

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)

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

Imprägnierung (Durchtränkung): durchtränkende Behandlung Matrix Roy

Injektion: Eindringen von fließfähigem Material unter Druck

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

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

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

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)

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

Polymer: organisches Material, zusammengesetzt aus Makromolekülen

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

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

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

Spalling: Abplatzen von Bruchstücken

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

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

Toleranzintervall (statistisches): Intervall in dem der spezifierte Teil p der Merkmalswerte liegt

toxisch: giftig

WHO-‘Faser‘ (F_{WHO}) : Einzelfaser-Bruchstück mit einem Durchmesser Ø 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!

3.4 Literatur

[Bäg19] Bäger D, Simonow B, Kehren D, Dziurowitz 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

[Cun06] Cuntze R: *Failure Conditions for Isotropic Materials, Unidirectional Composites, Woven Fabrics - their Visualization and Links*. https://www.ndt.net › cdcm2006 › papers › cuntze,

[Cun13] *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] *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] 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)

[Gro19] Anna Große', Romy Naumarn', Marcel Hofmann', Dominic Kehren', Daphne Bäqer', 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)

[Cun23] *Gedanken eines faseranwendungserfahrenen Ingenieurs zum Umgang mit Faser-Mikrobruch-stücken und Feinstäuben*. carbon-connected.de/Group/Prof.Ralf.Cuntze

bei Herstellung und Recycling faserverstärkter Bauteile.

[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).*

[Keh19] Dominic Kehren*, Barbara Simonow, Daphne Bäger, Nico Dziurowitz, 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

[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.

[LAGA19] LAGA (Bund/Länder Gemeinschaft Abfall): *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,
Lhttp://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.

[Mül21] Mülhopt S.: *CFC – Carbon FibreCycle Carbonfasern im Kreislauf*

[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

[Rie23] Ries G: SciLogs » Mente et Malleo » Schadstoffe » *Kohlefasern – wie gefährlich sind sie*? 15. Jan 2023

[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 916l Technische Regel für Gefahrstoffe*: Ver:zeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe*. Ausg. 3120'16. GMBl. (2016) Nr. 19. S. 378·390; zul. geänd. GMBl. (2018), Nr.15, S. 259

[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)

[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

Danksagung:

Die vorgestellte Kurzfassung basiert im Wesentlichen auf Arbeiten des Autors in 2022/2023. Der nicht geförderte Autor dankt:

* Dr.-Ing. Gabriele Gärtner, Ingenieurbüro Nidderau, für die intensive fachliche und mentale Unterstützung
* Dr.-Ing. Bastian Brenken, CU, für die Bearbeitung des CU-Informationspapiers‘ (2023), auf das der Autor gewartet hatte und das neuartige Ergebnisse enthält und nach Ergänzung überarbeitet wird (*neue Ausgabe kommt 2026*)
* Dres. rer. nat. Rolf Packroff und Asmus Meyer-Plath (beide von der BAuA), die mir/uns vor einigen Jahren ihr Wissen in ‘meinen‘ CU-Arbeitsgruppen vorgestellt haben. Dr. Meyer-Plath hatte mich im März 2023 gebeten, einen strukturellen Parameter aufzusuchen, der CF-Aufsplitterungsgefahr bewerten hilft.
* Dr. Michael Heine für seine wertvollen Anmerkungen (CU, Uni Augsburg, ehemals Industrie SGL)
* Dr. Barbara Güttler, IVW, für die Unterstützung der Testidee des Autors und mehr
* Dr. Anna Grosse, STFI Chemnitz, für die Diskussion der CarboBreak-Ergebnisse und die Lieferung von zugehörigen Materialdaten
* Dr. Mareike Schäfer für die erfolgreiche Durchführung des schwierigen bruchmechanischen Tests einer Einzelfaser.