

Charakterisierung von Stäuben, die bei der mechanischen Zerkleinerung von CFK entstehen

Thomas Krampitz, Sophia Thüm und Holger Lieberwirth

1.	Charakterisierungsmethoden	236
2.	Gefährdung durch Stäube hinsichtlich der Gesundheit	237
3.	Vorgehensweise	238
4.	Zerkleinerungsprodukte und Kenngrößen der Zerkleinerung	239
5.	Spezifische Staubmenge, die bei der Zerkleinerung entsteht	240
6.	Charakterisierung des kohlenstofffaserhaltigen Staubes	242
7.	Schlussfolgerungen	245
8.	Quellen	246

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gehören zu den Verbundwerkstoffen, die aufgrund ihrer vergleichbar guten Werkstoffeigenschaften bei einem zugleich spezifisch geringem Gewicht für Leichtbauanwendungen mit hohen mechanischen Ansprüchen eingesetzt werden. Die CFK-Werkstoffe finden sich deshalb mittlerweile in fast allen Anwendungsbereichen für anspruchsvolle Leichtbaustrukturen wieder. Diese umfassen neben dem Fahrzeugbau unter anderem die Bereiche Sport, Elektrotechnik oder Energiewirtschaft. Die weltweite Verarbeitungsmenge an CFK lag laut der Studie der Industrievereinigung verstärkter Kunststoffe (AVK) bei etwa 83.000 t im Jahr 2014. Auf die Region Europa entfallen davon etwas weniger als 29.000 t/a [8].

Bei den hergestellten Produkten handelt es sich überwiegend um langlebige Wirtschaftsgüter, bei denen zumeist erst in mehreren Jahren hohe Rücklaufmengen zu erwarten sind. Derzeit treten jedoch bereits Abfallmengen aus der Produktion auf, die einer Behandlung zugeführt werden müssen. Sind in den vergangenen Jahren noch weitgehend sortenreine Abfallchargen angefallen, nehmen mittlerweile Abfallmengen zu, bei denen sich die faserverstärkten Strukturen in Mischbauweise im Verbund mit anderen Werkstoffen befinden. Die CFK-Werkstoffe sind somit in den Produkten integral verbaut, wodurch ihre separate Behandlung deutlich erschwert wird. Dies deutete schon die FOREL-Studie aus dem Jahr 2015 an, in der sich die Fahrzeugbaubranche zu einer deutlichen Ausweitung der Mischbauweise bekannten [4].

Für die separate stoffliche Verwertung der CFK-Abfälle sind die Verbunde in Mischbauweise aufzuschließen oder die sortenreinen großflächigen Strukturen zu zerkleinern.

In beiden Fällen wird eine mechanische Beanspruchung in Zerkleinerungsmaschinen erforderlich, in denen im Prozess ungewollte kohlenstofffaserhaltige Stäube freigesetzt werden. Zwar werden diese Stäube abgesaugt, allerdings sind kaum Angaben zur Staubmenge oder zu den granulometrischen Eigenschaften der Faserstäube bekannt. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der sehr breit gefächerten Werkstoffeigenschaften der CFK-Werkstoffe in Abhängigkeit von den Prozessgrößen sehr unterschiedliche Ergebnisse für die Staubemissionen zu erwarten sind. Um eine unkontrollierte Ausbreitung der Stäube in den Recyclingprozessen oder -produkten zu verhindern, müssen zukünftig gezielte Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Aus Sicht der Anwender ist deswegen zu klären, inwieweit Zusammenhänge zwischen den werkstofflichen Eigenschaften des Aufgabegutes (Verbundstruktur) sowie den Prozessbedingungen (Beanspruchung) und der Staub-Charakteristik bestehen. Im Rahmen kleintechnischer Versuche soll deshalb ein Beitrag zur Erlangung von Datengrundlagen geschaffen werden. Dabei beziehen sich die Betrachtungen auf ausgehärtete kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe mit Epoxidharzmatrix (CFK) unterschiedlicher Herkunft.

1. Charakterisierungsmethoden

Stieß [13] definiert Stäube als in Gasen (meist Luft) dispergierte Partikelkollektive, mit Partikelgrößen zwischen etwa 10 nm und 10 µm. Bild 1 zeigt an einigen wenigen Beispielen die Partikelgrößenbereiche, in denen verschiedene Stäube vorkommen. Die Partikel werden entsprechend ihrer Partikelgröße in die Staubklassen zugeordnet.

Bei den kohlenstofffaserhaltigen Stäuben handelt es sich um ein Dreikomponenten-Stoffsystem bestehend aus Kohlenstofffasern, Epoxidharzmatrix und Restverbunden, deren Partikelgrößen bestimmt werden müssen. Die charakteristischen Abmessungen von Fasern weichen allerdings sehr weit von einer idealen Kugelform ab.

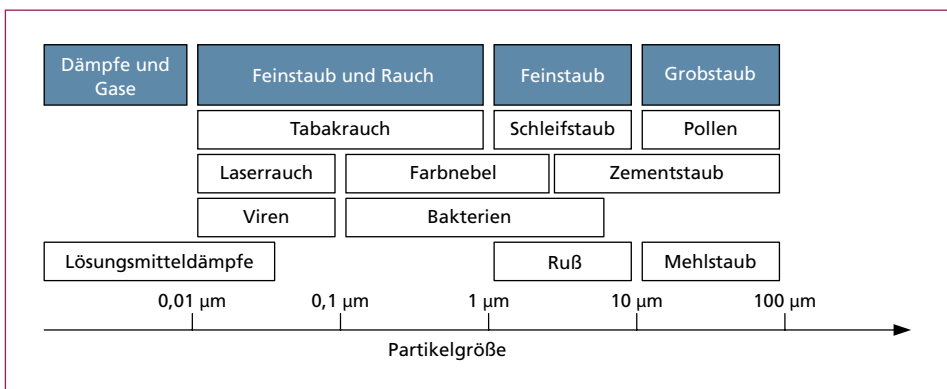


Bild 1: Übersicht über die Staubpartikelgrößen

Quellen:

Meißner, S.: Erfassung und Beseitigung luftgetragener Schadstoffe. CITplus; 12/2015; ULT AG, Löbau, 2015

Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1. Kennzeichnung von Partikeln und dispersen Stoffsystemen. Berlin: Springer-Lehrbuch, 2009; ISBN 978-3-540-32551-2

Bei der Charakterisierung von Fasern muss auf das Verhältnis zwischen Faserlänge und -durchmesser geachtet werden. Die Betrachtung über Äquivalentdurchmesser oder nur einer Partikelabmessung würde die Aussagekraft charakteristischer disperser Eigenschaften schmälern. Es müssen immer mehrere charakteristische Abmessungen betrachtet werden.

Stieß [13] definiert die Partikelgröße von Fasern deswegen über die Hauptabmessungen mit der Faserlänge $L \equiv x$ und dem Faserdurchmesser $d \ll x$. Die charakteristischen Abmessungen zeigt Bild 2. Das Volumen der Einzelfaser V_{Faser} ergibt sich dann nach Stieß gemäß Gleichung 1:

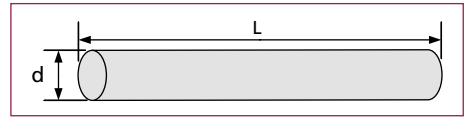


Bild 2: Partikelgröße bei Fasern

$$V_{\text{Faser}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot L \quad (1)$$

Zur Erfassung charakteristischer Partikelabmessungen werden in der Partikelmess-technik zumeist optische Verfahren angewendet, mit deren Hilfe ein Bild von den Einzelpartikeln der Analysenprobe (Fotografie oder Monitorbild) erstellt wird. Jedes abgebildete Partikel wird einzeln vermessen und nach einer charakteristischen Abmes-sung einer bestimmten Klasse zugewiesen. Grundvoraussetzung ist eine ausreichend große Zahl von Partikeln, sodass eine statistisch sichere Aussagekraft erreicht wird [13].

Stieß gibt an, dass *das optisch gewonnene Bild der Projektionsfläche durch Grauwert-abstufungen mit ausreichend hoher Auflösung digitalisiert wird. Das zeilenweise Abtasten des Bildes liefert dann elektrische Signale, die als Basis für die Auswertung dienen. Als Größe der Partikel können definierte statistische Längen, aber auch Fläche und Umfang der Projektionsfläche dienen. Nachteilig kann unter Umständen der grundsätzliche Informationsverlust über die räumliche Ausdehnung der Partikel sein, der allen Bildauswertungen anhaftet. Die optischen Verfahren zählen die Anzahl der Partikel in den Klassen. Die Zählverfahren haben als Mengenart die Anzahl woraus sich Anzahlverteilungen ergeben. Methoden zur Umrechnung in andere Mengenarten gibt Stieß an [13].*

2. Gefährdung durch Stäube hinsichtlich der Gesundheit

Bei der Zuordnung der Stäube zu den jeweiligen Gefährdungsklassen sind teilweise unterschiedliche Definitionen gebräuchlich. Einerseits richtet sich die Einordnung in die Gefährdungsklassen nach dem aerodynamischen Durchmesser der Partikel. Die Fraktionen unter etwa $10 \mu\text{m}$ werden als *lungengängig* eingeordnet und der Klasse PM10 zugeordnet. PM10 steht für *Particulate Matter < 10 μm* , den Massenanteil der Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$, den Stieß wie folgt definiert: Der aerodynamische Durchmesser d_{ae} eines unregelmäßigen Partikels der Dichte ρ_p ist definiert als der Durchmesser derjenigen Kugel mit der Dichte $\rho_K = 1 \text{ g/cm}^3$, die die gleiche Sink-Geschwindigkeit hat, wie das unregelmäßig geformte Partikel [13].

Aus den charakteristischen Partikelabmessungen der optischen Verfahren lassen sich deshalb nur schwer Rückschlüsse auf die Einordnung in die PM-Klassen ziehen. Andererseits macht die Weltgesundheits-Organisation (WHO) Angaben über Partikelabmessungen, die mit einer Gesundheitsgefährdung in Zusammenhang gebracht werden. Als kritisch gelten Partikeln mit den Abmessungsmerkmalen Faserdurchmesser $d < 3 \mu\text{m}$ und einem Längen- zu Dicken-Verhältnis größer > 3 . Weiterführende Angaben machen die Quellen [3, 5, 10, 11].

Zur weiteren Beurteilung der Gefährdung müssten zusätzliche Aspekte wie die biologische Wirksamkeit der Partikel oder die Exposition gegenüber Umwelteinflüssen bekannt sein. Dies war nicht Gegenstand der vorgestellten Untersuchungen.

3. Vorgehensweise

Als Versuchsgut dienten einerseits Modellstücke aus Neuwarenplatten des Herstellers Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG sowie CFK-Produktionsabfälle eines Fahrzeugbauers. Bei den Musterstücken handelte es sich um einen Schichtverbund aus Innenlagen, bestehend aus mehreren Lagen unidirektionaler (UD) Gelege mit einem Versatz von $0^\circ/90^\circ$, und Decklagen, bestehend aus Gewebe mit einer Gesamtwandstärke der CFK-Platte von etwa $2 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$. Als Harzsystem wurde ein CP007 Epoxidharz gewählt, welches Verarbeitungstemperaturen bis 180°C zulässt und damit typische Eigenschaften aufweist, die im Fahrzeugbau für tragende Leichtbaustrukturen zur Anwendung kommen. Die Musterplatten wurden mit den Abmessungen $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ gefertigt. Tabelle 1 und Bild 3 zeigen die charakteristischen Eigenschaften der verwendeten CFK-Platten. Für die Produktionsabfälle des Fahrzeugbauers gab es keine genaueren Werkstoffkenndaten. Die Stücke wiesen bei unregelmäßiger Form Wandstärken zwischen 2 und 5 mm auf.

Eigenschaft	Einheit	Prüfnorm	Wert
Faservolumenanteil	Vol.-%		60
Zugfestigkeit (bei 0°C)	MPa	DIN ISO 527	1.900
E-Modul (bei 0°C)	GPa	DIN ISO 527	135
Biegesteifigkeit	MPa	DIN ISO 14125	2.050

Tabelle 1:

Herstellerangaben für die Lamineigenschaften des UD-Geleges der Musterplatten (Beanspruchung in Faserrichtung)

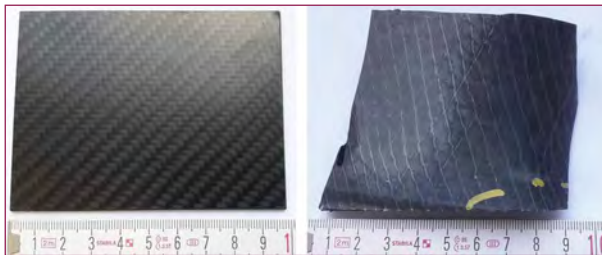


Bild 3:

CFK – Musterplatte (links), Produktionsabfall CFK-Fahrzeugbauers (rechts)

Die Versuche erfolgten in einer kleintechnischen Hammermühle der Bauart Geb. Jehmlich GmbH/Nossen, die eine kombinierte schnelle Reißbeanspruchung der Probestücke in Verbindung mit Schlag und Prall erzeugt. Die Beanspruchung ist mit

den Bedingungen in einem konventionellen großtechnischen Schredder vergleichbar [6]. Die Verweilzeit im Prozessraum lässt sich über eine Austragsklappe steuern. Die Mühle verfügt zudem zur Messung der eingetragenen Energie über eine mechanische Drehmomentmessung sowie eine Drehzahlregelung für die Einstellung verschiedener Beanspruchungsgeschwindigkeiten zwischen 25 und 60 m/s. Die Rotorbreite betrug 340 mm, der Rotordurchmesser 300 mm (400 mm Schlagkreis). Die im Prozessraum entstandenen Stäube wurden über eine Absaugung dem Prozessraum entnommen. Zur Gewinnung von Staubproben wurde eine diskontinuierliche Staubmessung eingesetzt, die sich an der Richtlinie VDI 2066 zur gravimetrischen Bestimmung der Staubbela-dung orientierte. In den durchgeführten Versuchen wurde der Aufbau dahin gehend modifiziert, dass der gesamte Luftstrom durch die Filterhülse geführt wurde. So konnte der gesamte Staub aufgefangen und bilanziert werden. Im Fokus der Untersuchung lag dabei nicht die Bestimmung der Staubbela-dung des Luftstromes, sondern die Bestimmung der spezifischen Staubmenge im Verhältnis zur Aufgabegutmenge an CFK.

Zur Filterung des Volumenstromes wurde eine handelsübliche Plattenbox mit einem Filter der Klasse F7 (Abscheidegrad von 80 bis 90 % bei einer Partikelgröße von 0,4 μm) ausgerüstet und gemäß VDI 2640 nach einer Beruhigungszone eingebaut [14]. Messun-gen von Kruhme [9] nach VDI 2640 ergaben eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 8,2 m/s im Rohr vor dem Filter.

Das Versuchsprogramm umfasste verschiedene Beanspruchungsgeschwindigkeiten (30 m/s, 50 m/s, 60 m/s) und verschiedene Verweilzeiten (2 s, 5 s, 10 s), wobei die Aufgabegutmenge jeweils zwischen 180 g und 250 g lag. Das Zerkleinerungsgut sowie der dabei entstandene Staub wurden nach jedem Durchlauf entnommen und charak-terisiert. Die Versuche erfolgten in einer studentische Arbeit von Pagel und Köhler [7].

4. Zerkleinerungsprodukte und Kenngrößen der Zerkleinerung

Die in der kleintechnischen Hammermühle zerkleinerten plattenförmigen CFK Muster-stücke zerfielen in unterschiedlich große Bruchstücke. Ausgewählte Stückgrößenklassen der Zerkleinerungsprodukte sind in Bild 4 ersichtlich.



Bild 4: Zerkleinerungsprodukte der Hammermühle aus den CFK-Musterplatten

Aus Bild 4 wird ersichtlich, dass die CFK Platten im Zerkleinerungsprozess einer teilwei-sen Delaminierung unterliegen, sodass sich sehr unterschiedliche Stückformen im Zer-kleinerungsprodukt ergeben. Aus der Partikelgrößenverteilung der Zerkleinerungspro-dukte ist die obere Partikelgröße x_{90} ablesbar, mit der sich das Zerkleinerungsverhältnis

im Prozess in Bezug zur Abmessung des Aufgabegutes bestimmen lässt. Daraus wird ersichtlich, dass sich die zwei untersuchten CFK Werkstoffe unterschiedlich im Zerkleinerungsraum verhalten, da das Zerkleinerungsverhältnis von Aufgabegut zu Zerkleinerungsprodukt verschieden ausgeprägt ist. Der CFK-Produktionsabfall des Fahrzeugbauers wird sehr viel stärker zerkleinert als die CFK-Musterplatten. Die Ursache kann im strukturellen Aufbau der CFK-Werkstoffe liegen.

In Bild 5 ist die spezifische Zerkleinerungsarbeit für die Zerkleinerung der CFK-Strukturen im vorgestellten Versuchsaufbau abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte der Versuche sehr stark streuen. Die Zerkleinerung der Musterplatten auf 10 mm würde in der Hammermühle etwa eine spezifische Zerkleinerungsarbeit von 20 kWh/t erfordern. Die Leerlaufleistung der Maschine wurde mit etwa 1,5 KW gemessen. Die Produktionsabfälle des Fahrzeugherstellers ließen sich mit einem geringen Arbeitsaufwand zerkleinern, bzw. es ergeben sich bei gleichem Arbeitsaufwand feinere Partikelgrößenverteilungen als mit den Musterplatten.

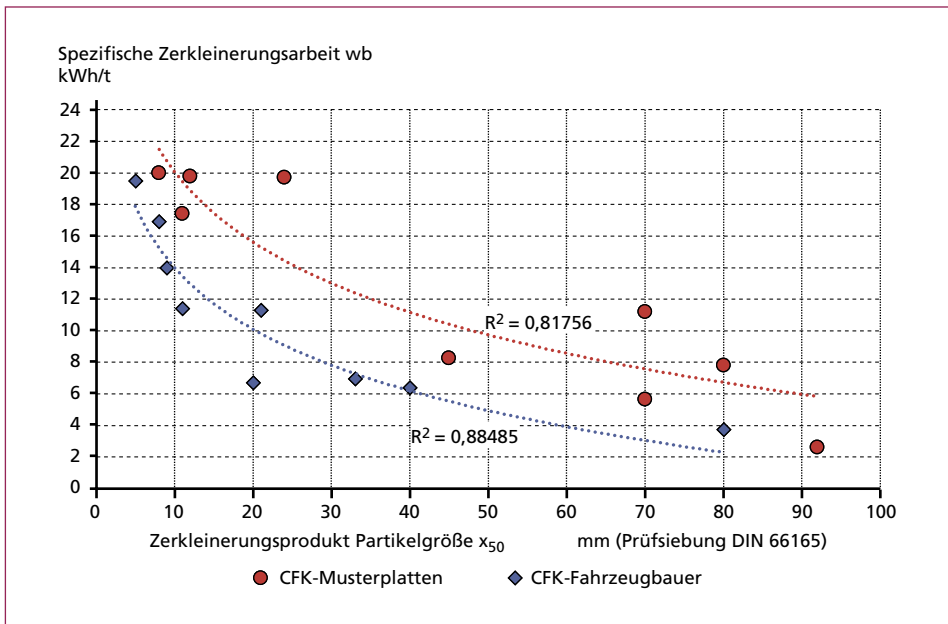


Bild 5: Spezifische Zerkleinerungsenergie in Abhängigkeit von der Partikelgröße x_{50} in der Hammermühle

5. Spezifische Staubmenge, die bei der Zerkleinerung entsteht

Zur Ermittlung der im Versuch erzeugten Staubmenge wurde der Staubfilter vor- und nach jedem Versuchsdurchlauf gewogen. Da aus Sicht des Anwenders der Bezug zum Aufgabegut für die Prozessbeurteilung ein wichtiger Aspekt ist, wird die spezifische Staubmenge in g Staub pro kg CFK im Aufgabegut ermittelt. In Abhängigkeit von den

Prozessparametern sowie den werkstofflichen Einflussgrößen des CFK Aufgabegutes ergeben sich in Bezug zur Aufgabegutmenge die in Bild 6 verdeutlichten Zusammenhänge. Darin ist gut zu erkennen, dass für die spezifische Staubmenge kaum Abhängigkeiten von den Prozessparametern ersichtlich werden. Die Schwankungsbreite für die spezifische Staubmenge ist zu hoch, als dass Abhängigkeiten von der Beanspruchungsgeschwindigkeit als auch von der Verweilzeit im Prozessraum ersichtlich werden. Ungewöhnlich ist der kaum messbare Staubmengenzuwachs mit zunehmender Verweilzeit. Dies lässt die Vermutung zu, dass nur beim ersten Kontakt mit den Hämmern eine erhohnte Staubbefreiung geschieht. Andererseits liegen zwischen den zwei CFK-Werkstoffen Unterschiede vor, da die CFK-Strukturen des Fahrzeugbauers bei der Zerkleinerung eine spezifisch höhere Staubmenge freisetzen, wobei auch die Schwankungsbreite zunimmt. Dies kann von der komplexeren Struktur der CFK-Stücke mit unterschiedlicher Ausrichtung der Fasern herrühren.

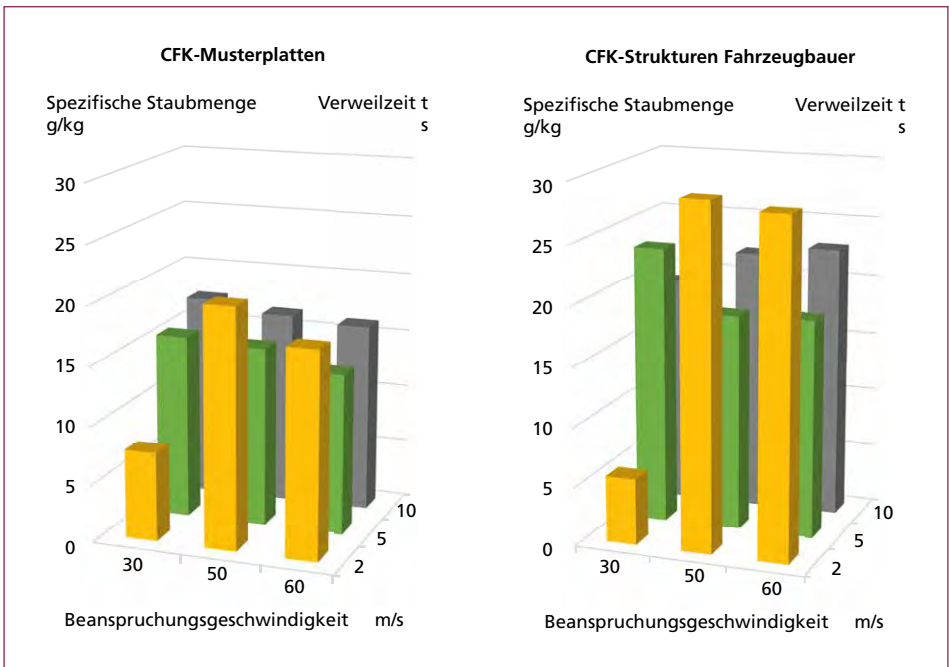


Bild 6: Spezifische Staubmenge für die zwei CFK-Aufgabegüter in Abhängigkeit von den Prozessparametern der Hammermühle

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass bei der Zerkleinerung von CFK-Werkstoffen spezifische Staubmengen von etwa 20 bis 30 g pro kg CFK Aufgabegut zu erwarten sind und sich die Staubmenge im betrachteten Größenbereich der Aufgabegutstucke weitgehend unabhängig von den Prozessparametern der Maschine einstellen. Bei der Betrachtung der spezifischen Staubmenge ist allerdings zu beachten, dass die Absaugung nur die in der Luft dispergierten Partikel entnimmt und Partikel gleicher Größe auch im Zerkleinerungsgut zurückbleiben können. Die im Filter ermittelte

Staubmenge entspricht einer Teilmenge des Zerkleinerungsgutes und ist zusätzlich zur Zerkleinerungswirkung auch von der Dispergierung der Partikel in der Maschine abhängig. Die Messwerte gelten deshalb nur für den gezeigten Versuchsaufbau in der genutzten Maschine.

6. Charakterisierung des kohlenstofffaserhaltigen Staubes

Abgesehen von den vorbereitenden Prozessstufen der Schutzklassierung sind für die Bestimmung der charakteristischen Partikelabmessungen optische Analysemethoden erforderlich, um mehrere charakteristische Abmessungen der Partikel aufzunehmen. Die Partikelgrößenbestimmung erfolgte mit einem handelsüblichen Messgerät der Firma Quantachrome GmbH & Co. KG der Serie CILAS 990 mit einem zusätzlichen Lichtmikroskop und der automatisierten Auswertesoftware ExpertShape. Der Messaufbau ließ Vergleichsmessungen der Partikelgrößenverteilung zwischen der Methode der Laserbeugung und der optischen Partikelvermessung zu.

Nach Dispergierung der Stäube in Isopropanol erfolgte zunächst die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung des Staubes mittels Laserbeugung. Die Ergebnisse sind in Bild 7 für unterschiedliche Beanspruchungsgeschwindigkeiten und die zwei verschiedenen Aufgabegüter zusammengefasst. Einerseits ergeben sich kaum erkennbare Unterschiede in den Partikelgrößenverteilungen in Abhängigkeit von den werkstofflichen Eigenschaften und den Prozessbedingungen der Maschine. Andererseits lässt sich ein Gehalt von etwa 10 bis 15 % der Partikelgröße $d < 10 \mu\text{m}$ in der Volumenverteilung $Q_3(d)$ (CILAS 990, Messmethode Fraunhofer) erkennen. Dieser Anteil kann als kritischer Feinstaub eingestuft werden. Tendenziell sind in den Stäuben der CFK-Produktionsabfälle des Fahrzeugbauers höhere Feingutgehalte zu erkennen.

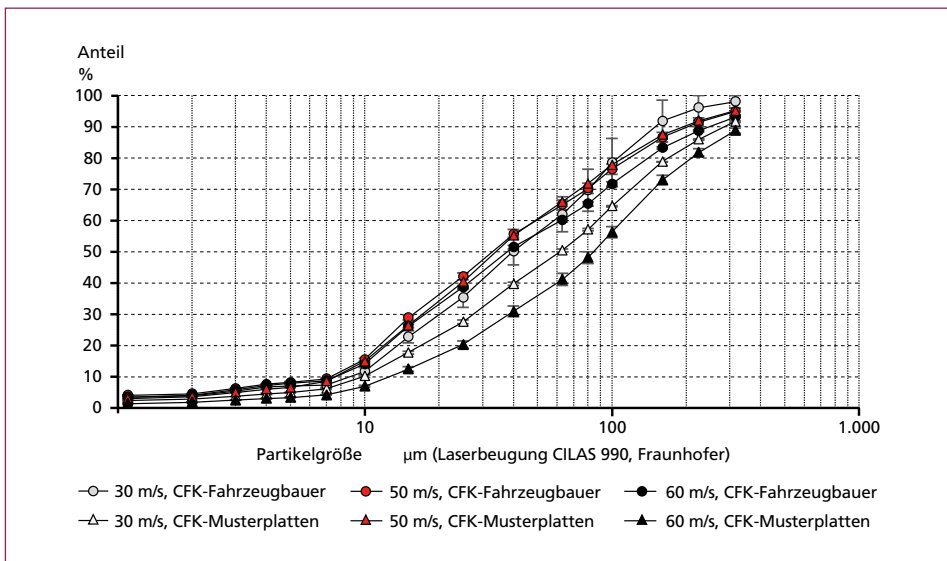


Bild 7: Partikelgrößenverteilung des kohlenstofffaserhaltigen Staubes (Laserbeugung), Verweilzeit 5 s

Für die optische Partikelvermessung wurden Proben mit der Pipette auf einem Glaträger unter dem Lichtmikroskop präpariert. Um Fehler zu minimieren, erfolgte die wiederholte Präparation auf dem Glaträger. Nach der Digitalisierung des Bildausschnitts erfolgten einerseits die Abrasterung des Glaträgers mit der wiederholten Aufnahme an verschiedenen Positionen und andererseits die Datenaufnahme der erkannten Partikelabmessungen in eine Datenbank über die integrierte Software, wie es Bild 8 verdeutlicht.

Für die Auswertung sind vor allem die Hauptabmessungen der Partikel von Bedeutung, die sich aus der rechteckigen Umrandung der Projektionsfläche ergeben. Die Abmessungen sowie die Projektionsfläche lassen sich aus der Pixelanzahl der Schattendarstellung ermitteln. Die verwendete Auflösung entspricht einem Wert von $0,61 \mu\text{m}/\text{Pixel}$. Um Fehler zu minimieren, wurden mehrere tausend Partikel vermessen und die charakteristischen Partikelabmessungen der Partikelbreite und -länge bestimmt. Daraus ergeben sich Anzahlverteilungen $Q_0(x)$, welche die Anzahl an Partikeln in einer definierten Abmessungsklasse beschreiben.

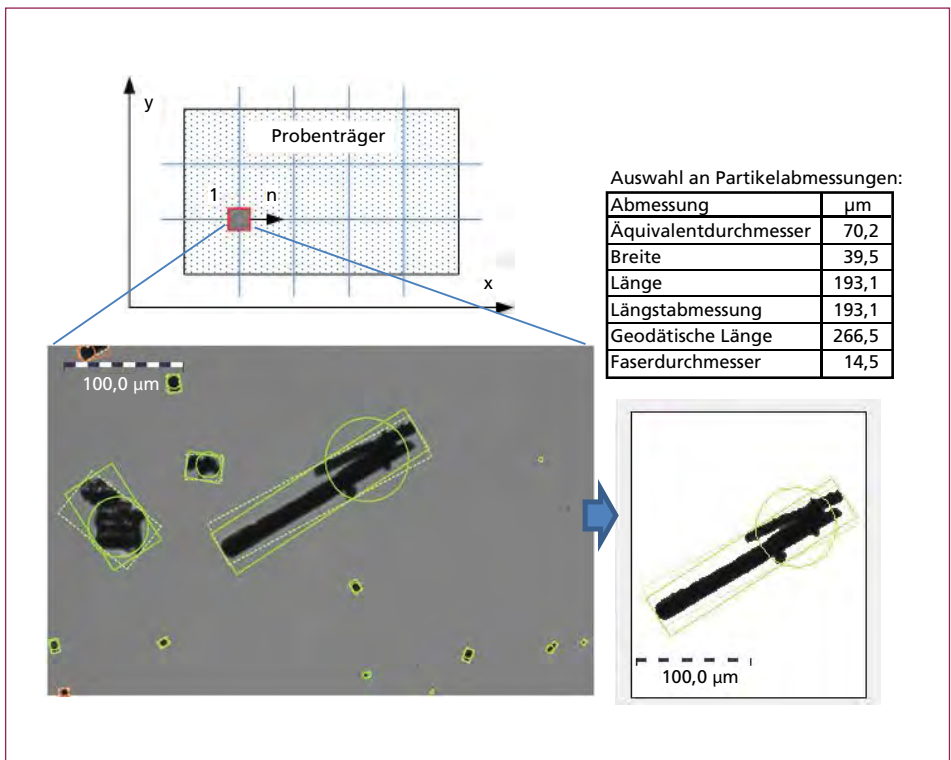


Bild 8: Schematische Darstellung der Datengewinnung aus der optischen Partikelvermessung

Aus jeder Versuchseinstellung wurden Staubproben entnommen, zwischen 1.600 und 3.500 Partikel optisch vermessen und in Klassen eingeteilt. In Bild 9 ist die Partikelverteilung bei der Beanspruchungsgeschwindigkeit von 50 m/s und 5 s Verweilzeit ersichtlich. Partikelabmessungen größer $400 \mu\text{m}$ werden nicht dargestellt. Da es sich um

ein Dreikomponentenstoffgemisch bestehend aus Epoxidharzmatrix, Kohlenstofffaser und Restverbunde handelt, kann keine Zuordnung zur Stoffkomponente vollzogen werden. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob es sich in den kleineren Klassen um Faserbruch oder Matrixpartikel handelt. Aus den Ergebnissen zeigt sich aber, dass Partikel vorhanden sind, die den WHO-Kriterien entsprechen.

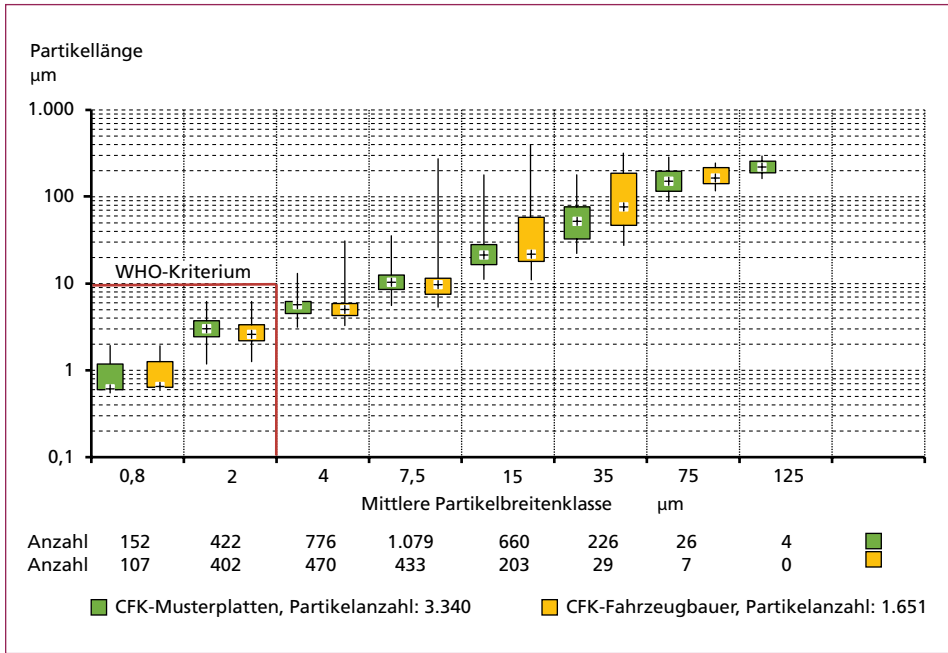


Bild 9: Partikelgrößenverteilung des Staubes, Partikellänge über der mittleren Partikelbreitenklasse, Messgerät CILAS 990, ExpertShape, Messbereich 0,6 bis 400 µm, Versuch 50 m/s, 5 s Verweilzeit

Filamentdurchmesser von Einzelfasern weisen nach Nestler [12] in der Regel zwischen 4,7 µm und 7 µm auf und können somit der mittleren Breitenklasse 7,5 µm zugeordnet werden. Auffällig sind in der Klasse die extremen Partikelabmessungen mit dem Verhältnis der maximalen Partikelabmessungen Breite zu Länge von bis zu 1:15, welche den Abmessungen 10 µm zu 150 µm entsprechen und damit auf Bruchstücke von Fasern hindeuten. Etwa ein Drittel der Anzahl der Staubpartikel (Anzahlverteilung) liegt in einem kritischen Partikelgrößenbereich nach den WHO-Kriterien. Aufgrund der unterschiedlichen Messmethodik zur Bestimmung der Partikelabmessungen sowie Merkmale der Stückgrößenverteilung ergeben sich differenzierte Angaben zum Gehalt an kritischen Fasern im Staub. Die Messmethodik muss daher mit angegeben werden.

Bei der Absaugung von feststoffbeladenen Gasen treten klassierende Trenneffekte im strömenden Fluid auf, die aufgrund vergleichbarer Strömungsbedingungen der Absaugung auch weitgehend Ergebnisse ohne signifikante Unterschiede liefert und den Einfluss der Prozessparameter der Zerkleinerungsmaschine auf die Partikelgrößenverteilung erwartungsgemäß gering hält und diese dann schlussfolgernd weitgehend

vernachlässigt werden können. Ersichtlich wird aber, dass der Anteil an kritischen Partikeln der WHO-Kriterien in den CFK-Strukturen des Fahrzeugbauers höher sind als in den Musterplatten, was auf werkstoffliche Beeinflussung der CFK-Strukturen bei der Staubeinstehung hindeutet. Die Aussagen decken sich weitgehend mit den Angaben der Messung mittels Laserbeugung.

7. Schlussfolgerungen

Die beiden untersuchten CFK Strukturen wurden in einer Hammermühle zerkleinert, die Stäube aufgefangen und charakterisiert. Da die Beanspruchung in der Maschine mit dem großtechnischen Shredder vergleichbar ist, können die Ergebnisse unter Beachtung der Modellgrenze tendenziell auf die industrielle Zerkleinerung im Shredder übertragen werden. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich nur auf ausgehärtete CFK mit Epoxidharzmatrix.

Bei der Messung der spezifischen Staubmenge und deren charakteristischen Partikelabmessungen überlagern sich die Einflussgrößen der Maschine mit der klassierenden Wirkung der Entstaubung. Zudem können feine Partikel, die nicht dispergiert werden, auch nicht in der Entstaubung gemessen werden. Die getroffenen Aussagen beziehen sich deshalb nur auf den Versuchsbau und die eingesetzte Zerkleinerungsmaschine. Unterschiede in der Staubmenge, der Zerkleinerungswirkung und der Partikelgrößenverteilung sind eher auf den Einfluss der verschiedenartigen CFK-Werkstoffe und der CFK-Struktur zurückzuführen. Die Produktionsabfälle des Fahrzeugherstellers erzeugten vergleichsweise größere Staubmengen als die eingesetzten Referenzmuster. Zudem enthielten die Stäube der CFK-Produktionsabfälle einen deutlich höheren Anteil an feinen Partikeln der kritischen WHO-Klasse. Die Stäube wiesen in allen Partikelklassen der untersuchten CFK Werkstoffen große Breiten- zu Längenverhältnisse auf, was auf Kohlenstofffasern in den Stäuben hindeutete. Da die Fasern aufgrund ihrer Leitfähigkeit auch für Maschinen und elektrischen Anlagen gefährlich werden können, dürfen diese nicht in die Umgebungsluft gelangen.

Bei Betreibern von Aufbereitungsanlagen stehen naturgemäß die Prozesseinstellungen zur Optimierung des Durchsatzes oder die Kennwerte für den Aufschlussgrad und die Zerkleinerungswirkung der Zerkleinerungsmaschine im Vordergrund der Betrachtungen. Allerdings können bei Kenntnis der erzeugten Staubmenge und -charakteristik konstruktive sowie betriebliche Maßnahmen zu deren größtmöglicher Vermeidung oder Unterdrückung an der Stelle der Erzeugung eingeleitet werden, so dass sich die Querkontamination von Fasern in die Produkte sowie die Staubemissionen reduzieren lassen. Vorschläge wie von Metso Corporation mit einer Wassereindüsung in den Prozessraum [1], deren Wirksamkeit bisher allerdings nicht nachgewiesen wurde, können möglicherweise dazu dienen. Hier lassen sich neue Forschungsansätze ableiten.

Mit den Ergebnissen wird für die Zerkleinerung von CFK-Strukturen eine Datenbasis geschaffen, mit der die Abschätzung der Staubmenge für die Entsorgung der Stäube sowie die Abschätzung der Querkontamination in den Produkten ermöglicht wird.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept *Forschung für die Produktion von morgen* (Förderkennzeichen 02PJ2760-02PJ2763) und mit Mitteln aus dem Energie- und Klimafonds gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

8. Quellen

- [1] Bucher, K.: Weniger Staub beim Shreddern. Recycling magazine; 07/2016; S.33, 2016
- [2] DIN 66165: Partikelgrößenanalyse, Siebanalyse, Grundlagen. Deutsches Institut für Normung. 2004
- [3] DGUV: Bearbeitung von CFK Materialien; Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen bei der Bearbeitung von FCK Materialien. Berufsgenossenschaft Fachbereich Holz und Metall der DGUV (Hrsg.): FB HM-074, 2014
- [4] Gude, M. et al.: FOREL-Studie; Chancen und Herausforderungen im Ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität. Dresden: TU-Dresden Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, 2015; ISBN: 978-3-00-049681-3
- [5] Kern, A.: Fiese Fasern – Gefahr und deren Begegnung. Köln Wahn: 2013
- [6] Kirchner, J.: Mikroprozesse und Einflußgrößen bei der Zerkleinerung der Schrotte und Metalle in Shreddern mit horizontal angeordnetem Rotor. TU Bergakademie Freiberg; Freiburger Forschungshefte; Band 860; Dissertation. Freiberg: 2000; ISBN 978-3-86012-129-0
- [7] Köhler, A.; Pagel, F.: Charakterisierung von kohlenstofffaserhaltigen Stäuben in Zerkleinerungsprozessen. Freiberg : Institut für Aufbereitungsmaschinen; TU BA Freiberg; Projektarbeit, 2017
- [8] Kraus, T.; Kühnel, M.; Witten, E.: Composites Marktbericht 2015. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen: Industrieverein Verstärkte Kunststoffe AVK. Carbon Composites e.V. CCeV, 2015
- [9] Kruhme, S.: Inbetriebnahme eines kleintechnischen Hammerbrechers (Shredder) zum Verbundaufschluss von Leichtbauwerkstoffen und Durchführung von systematischen Zerkleinerungsversuchen. Masterarbeit; Institut für Aufbereitungsmaschinen; TU Bergakademie Freiberg, 2015
- [10] Max, D.: CFK-Gefährdungspotentiale bei der mechanischen Überbeanspruchung und bei Brand; Erste Erkenntnisse aus der Brandschutzforschung der Bundesländer. Kohlhammer, W.: Brandschutz; Juni 2014; 66. Jahrgang. Stuttgart: S.428, 2014. ISSN 0006-9094
- [11] Meißner, S.: Erfassung und Beseitigung luftgetragener Schadstoffe. CITplus; 12/2015; ULT AG. Löbau, 2015
- [12] Nestler, D.: Verbundwerkstoffe – Werkstoffverbunde. TU Chemnitz; Habilitationsschrift, 2012. S. 471
- [13] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1. Kennzeichnung von Partikeln und dispersen Stoffsystemen. Berlin: Springer-Lehrbuch, 2009; ISBN 978-3-540-32551-2
- [14] VDI 2640: Netzmessungen in Strömungsquerschnitten. VDI-Handbuch Energietechnik, 1993