

## Mechanisches Recycling von faserverstärkten Kunststoffen

# Faserstäube beim FVK-Recycling

Bei der Zerkleinerung von faserverstärkten Kunststoffen werden Faserbruchstücke freigesetzt, die sich auf Haut und Kleidung absetzen, zu Juckreiz führen und eingeatmet werden können. Im Projekt „Faserstäube“ wurde untersucht, wie toxisch die Faserbruchstücke sind und welche Zerkleinerungstechnik am besten geeignet ist, um die Freisetzung von einatembaren Fasern zu verhindern – oder zumindest zu verringern.



© Adobe Stock; Von hywards

Die Nachfrage nach faserverstärkten Kunststoffen ist seit vielen Jahren steigend [1], da sie sich mit ihren gewichtsspezifischen und mechanischen Eigenschaften gut für Leichtbauanwendungen eignen. Insbesondere Organobleche mit Glasfasergeweben werden vermehrt im Automobilssektor eingesetzt, um Ressourcen und Gewicht zu sparen [2]. Daher ist davon auszugehen, dass zukünftig große Mengen faserverstärkten Abfalls anfallen, der recycelt werden muss. Eine nachhaltige Möglichkeit besteht im werkstofflichen Recycling – also der Weiterverarbeitung von thermoplastischen, faserverstärkten Abfällen zu kurzfaserverstärktem Rezyklat.

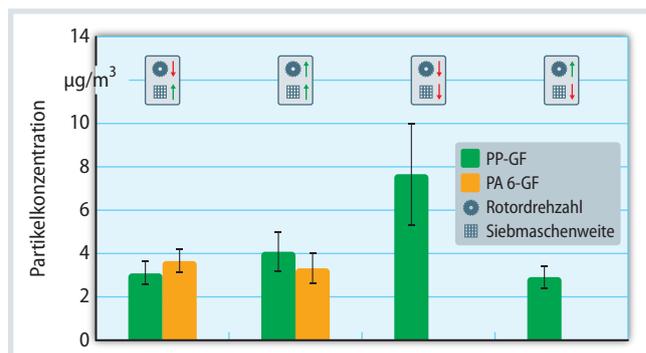
Ein Aufbereitungsschritt des werkstofflichen Recyclings besteht in dem Zerkleinern des Aufgabeguts. Faserverstärkte Kunststoffe können beim Zerklei-

nern zu einatembaren Faserbruchstücken zerfallen, die in einigen Fällen toxisch sind [3,4]. Als besonders gesundheitsgefährdend gelten Fasern mit WHO-Charakteristik. Dies sind faserförmige Partikel, deren Länge  $> 5 \mu\text{m}$ , deren Durchmesser  $< 3 \mu\text{m}$  und deren Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis  $> 3:1$  beträgt [5].

Das Ziel des Projektes Faserstäube ist es daher, Kenntnisse über die Mechanismen zu erlangen, die die Entstehung von wiederverwertbarem Mahlgut begünstigen und die auf der anderen Seite die Freisetzung von gesundheitsgefährdendem Faserstaub vermindern.

Bisherige Untersuchungen zur Zerkleinerungstechnik haben gezeigt, dass die Qualität des Mahlguts von vielen Parametern abhängt. Um eine möglichst enge Partikelgrößenverteilung mit großer Korngröße zu erhalten, wird bei unverstärkten Kunststoffen empfohlen, eine möglichst schneidende Beanspruchung in das Material zu initiieren [6], eine möglichst große Siebmaschenweite zu wählen [6, 7], sowie einen Sprödebruch zu verhindern [8]. Das Initiieren eines Sprödebruchs, etwa durch eine hohe Belastungsgeschwindigkeit, durch sprödere Materialien oder entsprechende Zerkleinerungstechnik, führt dazu, dass die Rissfront der Messerschneide vorseilt und das Material somit unkontrolliert zerteilt. Dadurch entsteht ein hoher Feinanteil im Mahlgut [9, 10].

Inwiefern sich diese Zusammenhänge auf die Entstehung luftgetragener, einatembare Faserbruchstücke übertragen lassen, ist bisher nicht bekannt und wird daher im Rahmen des Projektes „Faserstäube“ untersucht.

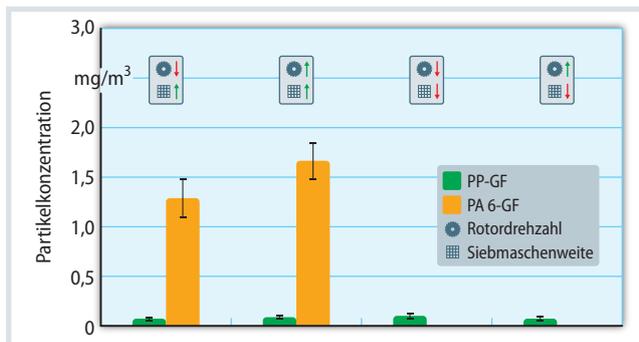


**Bild 1.** Massebasierte Nanopartikelkonzentration, die bei der Zerkleinerung der PP-GF- und PA-6-GF-Organobleche bei unterschiedlichen Zerkleinerungsparametern entstanden ist.

Quelle: KTP; Grafik: © Hanser

**Luftgetragene Faserstäube messen und analysieren**

Für die Untersuchungen zur Entstehung des luftgetragenen Faserstaubs werden glasfaserverstärkte Organobleche aus Polypropylen (PP, Tepex dynalite 104-RG600(x)/47%) und Polyamid 6 (PA 6, Tepex dynalite 102-RG600(x)/47%) der Bond Laminates GmbH (Lanxess) mit einem Einwellenschredder Weima Smart Cutter WSC 250–400 der Weima Maschinenbau GmbH zerkleinert. Dabei werden die luftgetragenen Stäube analysiert. Ein Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) misst die Partikel im Nanometerbereich (9,8–414 nm), wohingegen ein Aerodynamic Particle Sizer (APS) die Partikel im Mikrometerbereich (0,5–20 µm) analysiert. Luftgetragener, einatembare Faserstaub wird mit einem VC25-Sammler auf einem Cellulosenitratfilter abgeschieden und gewogen. Die Rotordrehzahl des Einwellenzerkleinerers wird von 6–120 U/min variiert und die Siebmaschenweite von 10–20 mm. Die Untersuchungen mit geringer Siebmaschenweite sind lediglich mit den PP-GF-Organoblechen durchgeführt worden. Die Organobleche werden mit einer Aufgabegröße von 250x250 mm und einem Durchsatz von 1 kg/100 s für ca. 120 min aufgegeben. Diese Parameter-einstellungen werden in den Bildern 1, 2 und 3 durch entsprechende Piktogramme und Pfeile wiedergegeben. Die Analyse der Toxizität der Faserstäube erfolgt durch einen Zelltoxizitätstest mit einer Rattenmakrophagen-Zelllinie („Lungenreinigungszellen“). Hierzu wurden die Zellen einer aufsteigenden Menge des gewonnenen Glasfaserstaubs ausgesetzt und die Beeinträchtigung des Energiestoffwechsels als Maß für die Zelltoxizität mit dem Fluoreszenz-basierenden AlamarBlue Test ermittelt.



**Bild 2.** Massebasierte Partikelkonzentration im mikroskaligen Größenbereich, die bei der Zerkleinerung der Organobleche bei unterschiedlichen Zerkleinerungsparametern entstanden ist.

Quelle: KTP; Grafik: © Hanser



**Bild 3.** Einatembare Staubmasse, die bei der Zerkleinerung der Organobleche entstanden ist. Die Staubmasse ist durch die Masse des Aufgabeguts sowie die Menge der gefilterten Luft in m³ normiert worden.

Quelle: KTP; Grafik: © Hanser

**Einfluss der Prozessparameter**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Rotordrehzahl zu einer Zunahme der Partikelkonzentration und zu einer Erhöhung der einatembaren Staubfraktion führt. In Bild 1 ist zu erkennen, dass die Nanopartikelkonzentration insbesondere bei großer Siebmaschenweite durch die Zunahme der Drehzahl für beide Materialien an-

maag.com

PUMP & FILTRATION SYSTEMS >

PELLETIZING & PULVERIZING SYSTEMS >

RECYCLING SYSTEMS >

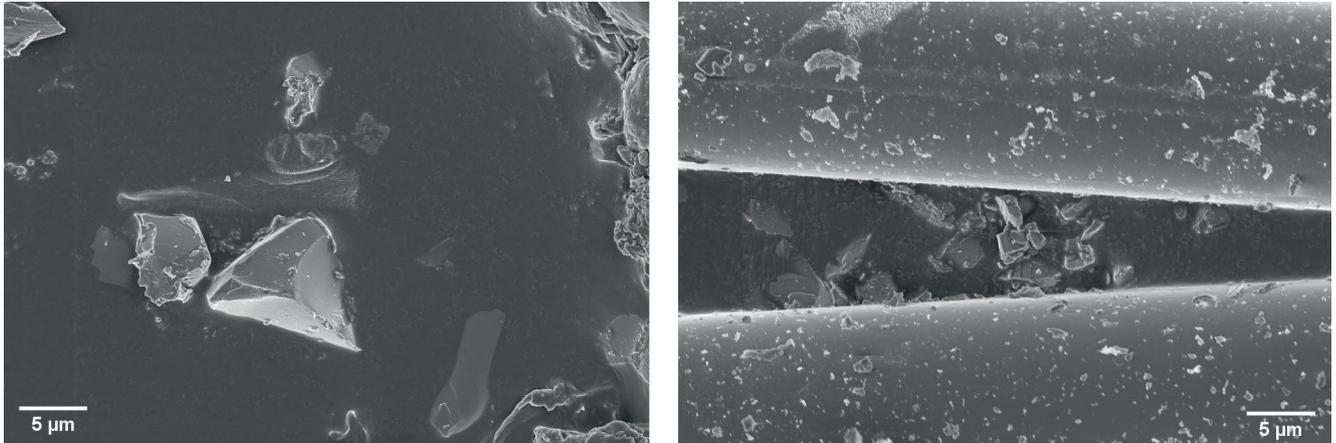
DIGITALIZATION >

Die MAAG Group ist Partner der kunststoffverarbeitenden Industrie weltweit. Unsere integrierten Lösungen für Pumpen- und Filtrationssysteme sowie Pelletizing-, Pulvermühlen- und Recyclingsysteme zeichnen sich durch hervorragende Leistungen für anspruchsvolle Kundenanforderungen aus.

a DOVER company

**NEXT LEVEL SOLUTIONS**

Integrated Systems for Polymer Processing



**Bild 4.** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Glasfaserstäube, welche bei der Zerkleinerung der PA-6-GF Organobleche entstanden sind. © KTP

## Info

### Text

**Lisa Tölle, M.Sc.**, ist seit 2019 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Kunststofftechnik an der Universität Paderborn (KTP) beschäftigt.

**Dr.-Ing. Matthias Hopp** ist seit 2017 Oberingenieur am KTP.

**Prof. Dr. Jürgen Bünger** ist Facharzt für Arbeitsmedizin und seit 2005 Leiter des Kompetenz-Zentrums Medizin, Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzliche Unfallversicherung an der Ruhr-Universität Bochum (IPA).

**PD Dr. Götz Westphal** ist Fachtoxikologe GT und seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPA tätig.

**Nina Rosenkranz** ist seit 2007 medizinisch-technische Assistentin im Bereich Arbeitsmedizinische Forschung und Beratung am IPA.

**Dr. rer. nat. Christian Monsé** ist seit 2009 als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim IPA beschäftigt.

### Dank

Die Autoren danken der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens, die aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) erfolgt. Zudem gilt der Dank den Unternehmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss.

### Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/onlinearchiv](http://www.kunststoffe.de/onlinearchiv)

### English Version

Read the English version of the article in our magazine *Kunststoffe international* or at [www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)

steigt. Dieser Zusammenhang kann ebenfalls für die Partikelkonzentration im mikroskaligen Größenbereich (**Bild 2**) sowie für die Faserstaubmasse, die auf dem Filter abgeschieden worden ist (**Bild 3**), beobachtet werden. Die Erkenntnisse bestätigen die oben genannten Zusammenhänge, dass eine höhere Rotordrehzahl zu einem spröderen Bruchverhalten der thermoplastischen Kunststoffe führt, wodurch ein höherer Feinanteil des Mahlguts – und auch eine vermehrte Freisetzung einatembare Faserstäube – entsteht. Dass dieser Zusammenhang bei dem Zerkleinern mit geringerer Siebmaschenweite für das PP-GF im mikro- und nanoskaligen Größenbereich nicht erkannt werden kann, liegt daran, dass es durch die erhöhte Reibung zwischen Rotor und Material zu einer elektrostatischen Aufladung der Partikel kommt. Diese führt dazu, dass die Partikel an der Wandung des Schredders haften oder aneinander agglomerieren.

Eine Verringerung der Siebmaschenweite führt zu einer Erhöhung der einatembaren Faserstaubmasse (**Bild 3**) für beide Drehzahlen. Einerseits führt die Verringerung der Siebmaschenweite dazu, dass die maximale Partikelgröße verringert wird, andererseits wird die Verweilzeit des Materials im Mahraum erhöht [6, 7]. Das Material muss häufiger zerteilt werden, bis es klein genug ist, um den Mahraum zu verlassen. Auch im nano- und mikroskaligen Bereich kann bei geringer Drehzahl eine deutliche Erhöhung der Partikelkonzentration durch die Reduzierung der Siebmaschenweite erkannt werden. Dieser Effekt ist für die hohe Drehzahl aufgrund der elektrostatischen Aufladung nicht

ersichtlich (**Bilder 1 und 2**). Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die Zerkleinerung von PA-6-GF-Organoblechen im Vergleich zu den PP-GF-Organoblechen zu einer höheren Partikelkonzentration im mikroskaligen Größenbereich und zu einer höheren einatembaren Staubmasse führt. Dies begründet sich durch das sprödere Bruchverhalten der Organobleche durch den Einsatz des spröderen Matrix-Materials PA 6.

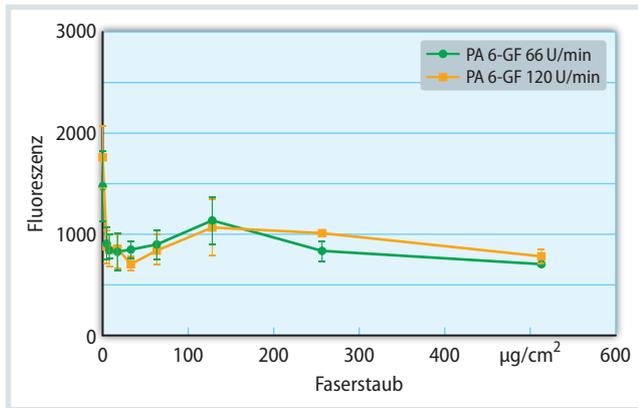
Die bekannten Zusammenhänge aus der Zerkleinerungstechnik zum Erzielen einer engen Partikelgrößenverteilung lassen sich also größtenteils auch auf die Vermeidung von luftgetragenen Faserstäuben übertragen.

### Einschätzung entstehender Stäube und Handlungsempfehlung

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Faserstäube vom Cellulosenitratfilter zeigen neben einigen langen Glasfasern auch keilförmige Glasfaserbruchstücke, die einatembare (<5 µm) und daher potenziell gesundheitsschädlich sind (**Bild 4**). Diese Ergebnisse unterstützen die Erkenntnisse aus den gemessenen Partikelkonzentrationen. In Europa dürfen allerdings Glasfasern eingesetzt werden, wenn sie keine ausgeprägte Biopersistenz aufweisen (EU-Richtlinie 97/69/EG). Bruchstücke aus Glasfasern, die solcherart die Voraussetzungen für eine Zulassung in der EU erfüllen, weisen trotz ihrer Abmessungen keine chronische Toxizität auf, da sie nicht in den Atemwegen persistieren; vorausgesetzt, es findet keine dauerhafte Exposition statt, die ständig Entzündungsgeschehen auslöst.

**Bild 5.** AlamarBlue Test für Glasfaserplatten, die mit unterschiedlicher Drehzahl, aber gleicher Siebmaschenweite zerkleinert wurden. Bis zur höchsten untersuchten Menge ist keine Zelltoxizität sichtbar.

Quelle: IPA; Grafik: © Hanser

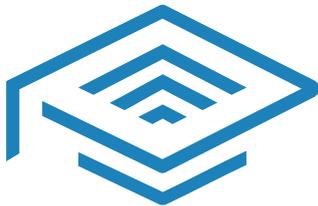


auch bei sehr hoher Staubkonzentration keine erhöhte Zelltoxizität. Auch die Erhöhung der Rotordrehzahl führt hier zu keinen Änderungen in der Bewertung der Toxizität.

Diese Untersuchungen geben lediglich einen kleinen Einblick in das Thema. Trotzdem zeigen die Ergebnisse deutlich, dass bei der Zerkleinerung faserverstärkter Thermoplaste einatembare Faserbruchstücke entstehen, deren Konzentration durch eine Reduzierung der Rotordrehzahl und eine möglichst große Siebmaschenweite verringert werden kann. Auch wenn diese Untersuchungen nahelegen, dass die Glasfaserbruchstücke zu keiner starken Toxizität in der Lunge führen, sollten Arbeitsschutzmaßnahmen gemäß TRGS 521 (Technische Regeln für Gefahrstoffe Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten) getroffen werden, da es aus Gründen des vorsorgenden Gesundheitsschutzes gilt, die Freisetzung von einatembaren Fasern zu verhindern. ■

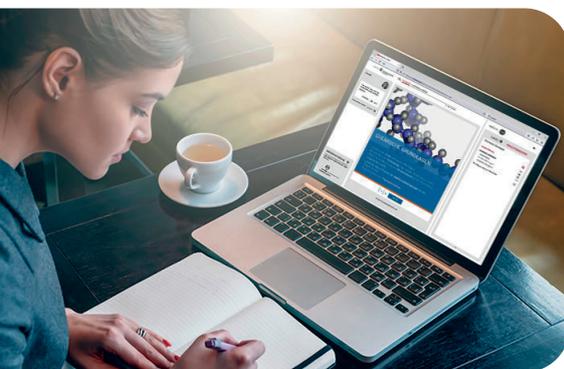
Untersuchungen zur Zelltoxizität der Glasfaserstäube, die bei der Zerkleinerung der PA-6-GF Organobleche auf dem Cellulosenitratfilter abgeschieden worden sind, haben diese Vermutung bestätigt. Die Bestimmung schädigender Partikelwirkungen erfolgte durch den AlamarBlue-Test (Invitrogen, Life Technologies Corporation, Eugene, USA). Der Test misst die Energieladung der Zellen

als Maß für die Toxizität unter Verwendung des Fluoreszenzfarbstoffs und Redox-Indikators Resazurin. Eine Abnahme der Fluoreszenz zeigt Zelltoxizität an. In **Bild 5** sind die Ergebnisse des Tests gezeigt. Die Fluoreszenz ist gegen die Konzentration der zugegebenen Partikel aufgetragen. Sie bleibt auch bei sehr hohen Staubkonzentrationen unverändert. Der AlamarBlue-Test zeigt somit



# eCampus Kunststoff

Powered by  
HANSER & SKZ



Bringen Sie die Weiterbildung Ihrer Mitarbeiter auf das nächste Level:

Mit dem **eCampus Kunststoff**, der neuen adaptiven Lernplattform für die Unternehmensweiterbildung.

Jetzt kostenlose Demoversion testen!

Erster Kurs: Werkstoffkunde I

[www.eCampus-Kunststoff.de](http://www.eCampus-Kunststoff.de)