

Optimierung der Faserprobenahme im Hinblick auf Größenseparation und Maximierung der Massenausbeute zur Untersuchung der Toxikologie von Faserbruchstücken beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

Optimization of fiber sampling according to size separation and maximization of quantity of mass to study the toxicology of fiber fragments during laser cutting of fiber reinforced composites

**J. Walter^a, V. Wippo^a, P. Jäschke^a, S. Kaierle^{a, c},
N. Rosenkranz^b, J. Bünger, G.A. Westphal^b**

^a Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH), Hollerithallee 8, 30419 Hannover, Deutschland

^b Institut für Prävention und Arbeitsmedizin (IPA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Institut der Ruhr-Universität Bochum, Bürkle-de-la-Camp-Platz 1, 44789 Bochum, D.

^c Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA), An der Universität 2, 30823 Garbsen, D.

Schlagworte: Laserschneiden, Faserverbund-Werkstoffe, Faserbruchstücke, Toxikologie
Keywords: laser cutting, fiber-composite materials, fiber fragments, toxicology

Zusammenfassung

Beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen (FVK) mit kurzgepulster Laserstrahlung mit einer mittleren Leistung von 1,5 kW wird lokal eng begrenzt durch Strahlungsabsorption eine sehr große thermische Energie eingebracht, die die Matrix zusammen mit der Faserverstärkung innerhalb kürzester Zeit zersetzt und eine große Anzahl an luftgetragenen und lungengängigen Faserbruchstücken generiert. Die zur Untersuchung der Toxikologie erforderliche Masse wird mit konventionellen größenseparierenden Probenahmesystemen auch bei erweiterter Probenahmedauer (> 60 Min.) nicht erreicht. Ebenso ist eine nachträgliche Abtrennung der entsprechenden Faserfraktionen mit den verfügbaren Techniken (Sieben, Ultraschall etc.) nicht erfolgreich.

Deshalb werden neue strömungstechnische experimentelle Erfassungsgeometrien für das kontaminierte Prozessabgas zur Separation während der Probenahme untersucht und validiert. Ebenso werden unterschiedliche Filtermedien (Cellulosenitrat, Glasfaser-Planfilter) verglichen. Im sogenannten „Partikel-induzierten Zellmigrationstest“ (PICMA) kann die Toxizität der FVK-Stäube einschließlich der freigesetzten Faserfragmente evaluiert werden. Existierende Kenntnislücken im Hinblick auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz werden so geschlossen.

Die von Wirbeln geprägte Strömung der luftgetragenen Gefahrstoffe von der Prozesszone in die Umgebung ist hauptsächlich bestimmt durch die Druckluftkühlung der FVK-Oberfläche. Strömungsmessungen und -visualisierungen sollen zeigen, wie ein Teil der freigesetzten Gefahrstoffe sich in der unmittelbaren Umgebung zum Prozess und der resultierenden, von der Oberfläche weg gerichteten, typischerweise turbulenten Strömung unkontrolliert verteilt. Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Partikel und Faserfragmente werden somit möglich.

Einleitung

Bei der Bearbeitung von FVK können einatembare Stäube, einschließlich faserartiger Bruchstücke entstehen, die eine Gefährdung der Beschäftigten darstellen. Um diese Gefährdung einzuschätzen und ggf. notwendige Schutzmaßnahmen zu treffen, müssen die toxikologischen Eigenschaften der Emissionen bestimmt werden. Durch systematische Probenahme mit konventioneller Technik (Abb. 1) wird gezeigt, dass die Morphologie / Geometrie und die Dimensionen der freigesetzten Fasern und Faserfragmente ein potenzielles Risiko darstellen. Gesundheitliche Auswirkungen von Partikeln werden bestimmt durch deren entzündliche Eigenschaften. Die Einwanderung von Entzündungszellen in die Lunge ist daher ein zuverlässiger toxikologischer Endpunkt für die Untersuchung von Partikeln (Ma-Hock et al. 2009). Auf Zellebene kann die Einwanderung von Entzündungszellen mit dem „Partikel-induzierten Zellmigrationstest (PICMA)“ nachempfunden werden (Westphal et al. 2015, Westphal et al. 2019a). PICMA bildet an Zelllinien die Fähigkeit von Entzündungszellen nach, in die Richtung von entzündlichen Botenstoffen (Chemokinen, Zytokinen) zu wandern. Partikel unterschiedlich starker Entzündungswirkung erzeugen ein unterschiedliches Ausmaß dieser Zellwanderung. PICMA ist daher ein geeignetes *in vitro* Modell zur Untersuchung entzündlicher Partikeleigenschaften. Ergänzend wird die Zelltoxizität bestimmt. Die für toxikologische Untersuchungen erforderlichen Mengen an potenziell gefährlichen Faserfragmenten für Untersuchungen im PICMA können mit der konventionellen Technik allerdings nicht gesammelt werden. Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Partikel und Faserfragmente werden durch Strömungsmessungen und -visualisierungen möglich, die zeigen, wie ein Teil der freigesetzten FVK-Fragmente sich infolge der Gasentstehung in der Prozesszone und der resultierenden, von der Oberfläche weg gerichteten, typischerweise turbulenten Strömung unkontrolliert in der Luft in der Laserkabine verteilt. Die von den Stäuben überwundene Distanz von der Prozesszone zum Messgerät ist bedingt durch die geringe Dichte der entstehenden FVK-Stäube erheblich. Zudem orientieren sich faserförmige FVK-Bruchstücke in Flugrichtung, so dass die Reichweite solch faserförmiger Stäube sehr viel weiter ist als die granulärer Stäube mit einer höheren Dichte.

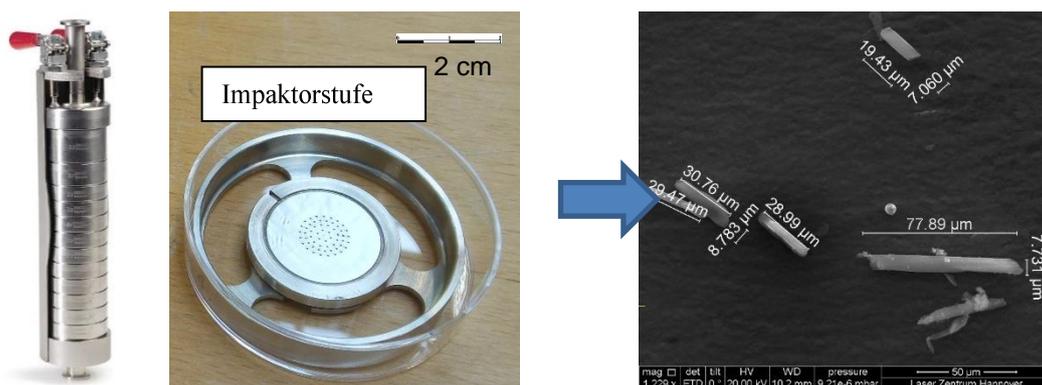


Abb. 1: Mittels 12-stufigem Kaskadenimpaktor und REM-Aufnahmen lässt sich zeigen, dass auch luftgetragene-/ lungengängige Faserbruchstücke (Länge < 50 µm) entstehen (Suttmann 2017).

Auf Basis der im Projekt RisoTto verbesserten Probenahme lassen sich spezifische, im Vergleich zu konventionellen Prozessen effektivere Maßnahmen (technisch, organisatorisch und persönlich) zum Schutz der Beschäftigten und der Umwelt realisieren (Walter, Wippo et al. 2021).

Vorarbeiten bzgl. Gefahrstofffreisetzung und Verschleppung

Hier ist die LZH-Datenbank (LZH 2017) zu nennen, welche für diverse Laserbearbeitungsprozesse Informationen zu Emissionsraten bzw. Quellstärken (Gefahrstoffmessung in der Prozessabluft nach TA-Luft 2002) und/oder Gefahrstoffbelastungen der Luft am Arbeitsplatz (Messung der inhalativen Exposition nach TRGS 402 2016) enthält.

Bei Suttman 2017, Hustedt et al. 2017, Walter et al. 2016 und Walter et al. 2017 wurden die aus laserbasierten Prozessen an CFK stammenden Emissionen und Immissionen, inkl. der faserförmigen Partikel, untersucht. Die untersuchten Prozesse wurden mit einem kurzgepulsten Scheibenlaser durchgeführt mit der Prozessstrategie des Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden. Außerdem waren bei verschiedenen Prozessen in den „CFK-Projekten“ der zugehörigen BMBF-Fördermaßnahme „Photonischer Leichtbau“ (Jaeschke et al. 2016) Grenzwertüberschreitungen in der Luft am Arbeitsplatz die Ausnahme.

An einem laserbasierten Rettungssystem-Demonstrator für Unfallszenarien (Hennigs et al. 2019 und Kaieler 2020) erfolgte stichprobenartig die Untersuchung der Gefahrstofffreisetzung während des Schneidens von Fahrzeugbauteilen, u.a. auch aus CFK (Walter et al. 2021).

Untersuchungen freigesetzter und verschleppter partikelförmiger Gefahrstoffe an handelsüblichen Fertigungsanlagen für laserbasierte additive Fertigung mit Metallpulvern im Pulverbettverfahren (LPBF) wurden von Walter et al. 2019 und Kaieler 2018 durchgeführt. Die im bestimmungsgemäßen Betrieb geschlossenen Anlagen in den zugehörigen Anlagenumgebungen ermöglichen nur im Verlauf der Bauteilentnahme, Nachbearbeitung und Reinigung einen direkten Kontakt mit Pulvern (Primärpartikeln) und Prozessemissionen (Sekundärpartikeln).

Vergleich konventioneller am Markt verfügbarer Probenahmesysteme

Während eines Laserstrahl-Abtragschneidprozesses von CFK wurde die Abluft erfasst und mit unterschiedlichen Sammlern auf Fasern und Faserfragmente beprobt. Dabei kamen ein Kaskaden-Impaktor und mehrere Probenahmepumpen mit verschiedenen Volumenströmen und mit Glasfaser-Planfiltern, Aluminiumfolien und goldbeschichteten Kernporenfiltern unterschiedlicher Durchmesser zum Einsatz (Abb. 2).



Name	Mess-Parameter	Ø Filter	Filtermaterial	Volumenstrom
ELPI®*	Partikelgrößenverteilung	25 mm	Alu-Filter	0,6 m³/h
Aircon 2®	Fasern/Faserbruchstücke	25 mm	Goldfilter	1,8 m³/h
ites®**	Gesamtaerosol	45 mm	QF-Planfilter	3 m³/h
Gravikon® VC 25	E-Fraktion	150 mm	QF-Planfilter	22,5 m³/h

* Electrical Low Pressure Impactor

** Steuerung für Probenahmepumpen

Abb. 2: Gegenüberstellung der konventionellen Verfahren zur Probenahme

Die ermittelte Partikelgrößenverteilung ist typisch für die Laserstrahlmaterialbearbeitung. Allerdings treten aufgrund der Leitfähigkeit der Faserbruchstücke im elektrisch basierten Messverfahren Artefakte auf (Abb. 3).

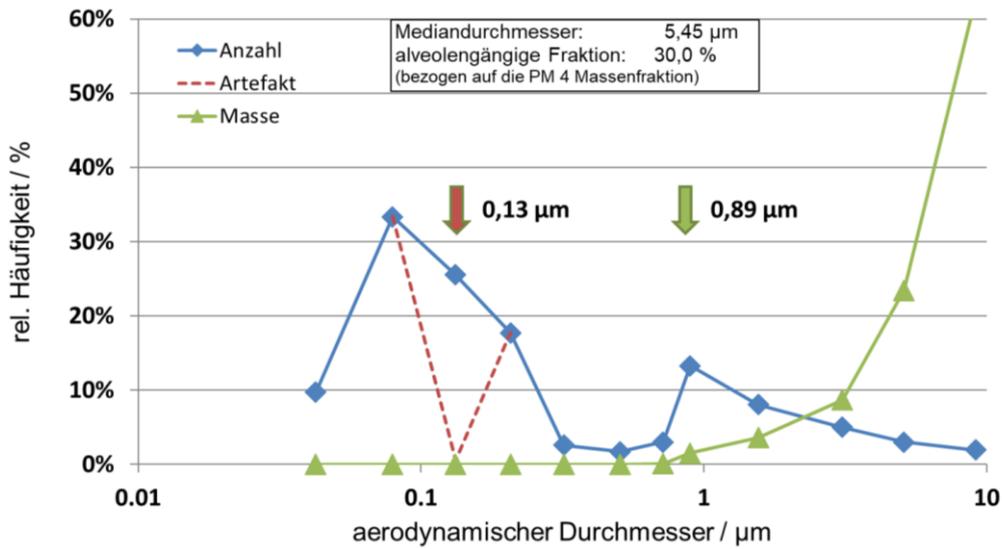


Abb. 3: Partikelgrößenverteilung mit Artefakt (rote unterbrochene Linie)

Während einer Messung wurde von einem Kohlenstofffaserfragment ein Kurzschluss in einer Impaktorstufe verursacht, so dass kein Messwert vom zugehörigen Elektrometer aufgenommen wurde. Um künftig Kurzschlüsse sofort zu erkennen, müssen die Rohdaten online bei der Probenahme direkt auf Plausibilität überprüft werden.



Abb. 4: Labyrinth zur Probenahme schematisch und verwendete Rückschlagklappen

Um eine Vorselektion der Faserbruchstücke zu erreichen, wurde mit einfachen Mitteln (durch konventionelle im Handel verfügbare Rückschlagklappen) aus der Lüftungstechnik ein Labyrinth aufgebaut und in die Erfassungstrecke integriert (Abb. 4). Dabei werden in Strömungsrichtung die gegeneinander versetzten Spalte in den Klappen immer schmaler (21, 14, 7 mm). Die Dimension der Spalte wurde erfahrungsbasiert gewählt. Im Experiment erreichen die langen (> 2 mm) Faserbruchstücke den Sammelfilter aus Cellulosenitrat nicht.

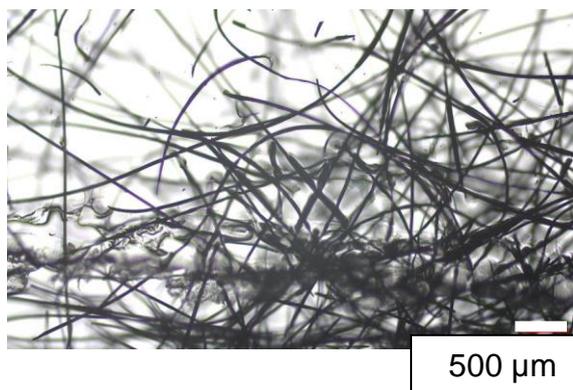
Ergebnisse der Emissionscharakterisierung

Die größte Emissionsrate ($20,8 \pm 0,45$ mg/s) tritt bei Pulsfrequenzen von 40 kHz auf und die kleinste Emissionsrate ($3,20 \pm 0,16$ mg/s) wird bei 10 kHz und gleichem Hatchabstand (0,8 mm) gemessen. Des Weiteren zeigt sich, dass bei gleichbleibender Frequenz (gleiche Pulsenergie) ein Zusammenhang zwischen den Emissionen zur Anzahl der Überfahrten besteht. Je mehr Überfahrten erforderlich sind, um den Abtrag vollständig durchzuführen, desto geringer ist die Emissionsrate pro Zeit.

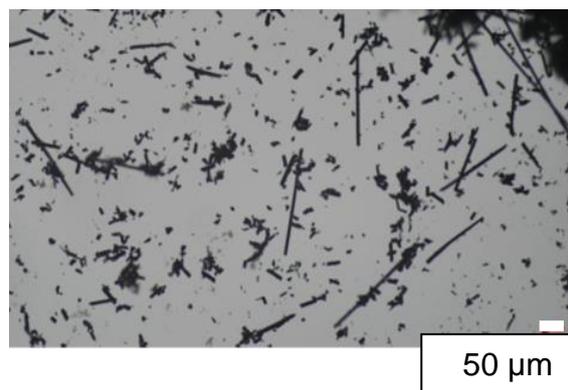
Toxikologie der Faserbruchstücke

Die Toxizität von Partikeln und Fasern wird hauptsächlich durch ihre entzündlichen Eigenschaften bestimmt. Faserfragmente bestimmen offenbar durch ihre Geometrie sowie die Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Abbauprozessen (Biopersistenz) den Grad der Toxizität (Donaldson und Tran 2004, Donaldson et al. 2008). Daher werden Fasern mit kritischen Dimensionen (WHO 1988) generell als besonders risikobehaftet angesehen und auch neue faserförmige Stoffe gelten als verdächtig.

Die lichtmikroskopische Analyse der mit dem Probenahmesystem Gravikon VC 25 gewonnenen Staubproben zeigt, dass sehr lange Fasern gewonnen wurden, die nicht suspendierbare Knäule bilden (Abb. 5). Bei diesen Analysen ist zu beachten, dass sich die Fasern in Flugrichtung ausrichten und offenbar sehr lange, nicht einatembare Fasern von dem Messsystem als „einatembare Staubfraktionen“ erfasst werden.



Nicht suspendierbare Faserfragmente



Suspendierbare Faserfragmente nach Behandlung in der Kugelmühle © IPA

Abb. 5: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Staubproben aus einer Laserbearbeitung des LZH (links) und der gemahlene Staubproben (15 Sekunden, 25 Hz und Raumtemperatur).

Die Proben sind in diesem Zustand (Abb. 5 links) nicht suspendierbar und können daher toxikologisch nicht untersucht werden. Alternativ zu dem erstellten Probenahmesystem (Abb. 4) wurden die Proben in einer Kugelmühle unter verschiedenen Bedingungen gemahlen. Nach dem Mahlen mit einer „großen Mahlkugel“ über 15 Sekunden bei 25 Hz und Raumtemperatur entstanden suspendierbare Staubfraktionen, die eine ausreichende Menge an intakten Fasern enthielten (Abb. 5 rechts).

Die nicht mit dem Laser bearbeiteten Ursprungsproben werden unter den gleichen Bedingungen gemahlen und das erhaltene Mahlgut vergleichend mit den biologischen Testsystemen untersucht. Vorausgesetzt, die Bearbeitung mit dem Laser führt zu toxischen Bruchstücken, müsste das auf diese Weise generierte Mahlgut stärkere biologische Effekte zeigen.

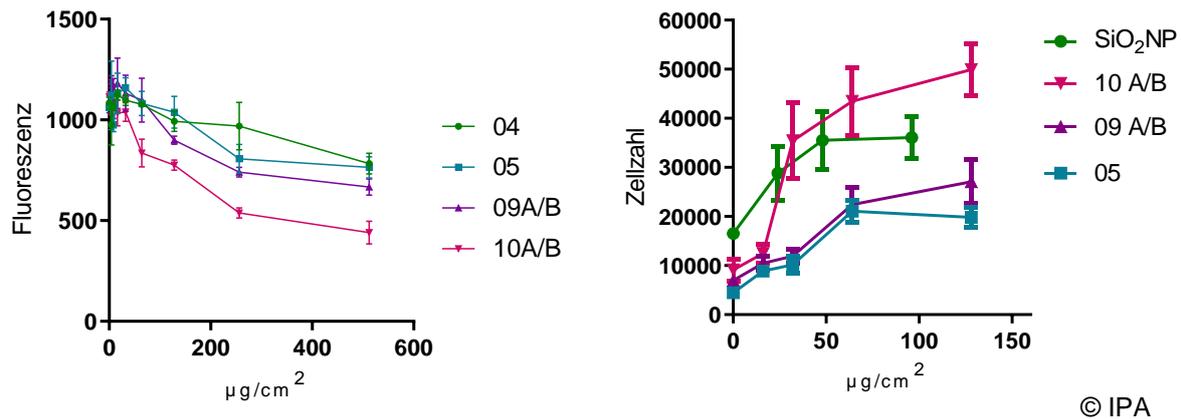


Abb. 6: Ergebnisse Zelltoxizitätstest (AlamarBlue Assay) und PICMA an 2 luftgetragenen Filterproben: (09A/B und 10A/B), Ausgangsmaterial (Probe 04 und 05) und der Kontrolle (SiO₂ Nanopartikel). rechts: aufgetragen ist die Vitalität der Zellen (hohe Fluoreszenz = hohe Vitalität) links: aufgetragen ist die Anzahl eingewanderter Zellen (Zellzahl) jeweils gegen die Konzentrationen der Untersuchungsmaterialien (µg/cm²).

Um die Proben biologisch untersuchen zu können, mussten sie gemahlen werden. Die Mahlung erfolgte für 2 x 30 Sekunden mit Stickstoffkühlung. Anschließend wurden die Proben gesiebt (< 200 µm). Die laserbehandelten, luftgetragenen Proben (Bez. 10 A/B und 09 A/B) waren zelltoxischer als die gemahlene Ausgangsmaterialien; am stärksten die Probe 10 A/B (Abb. 5). Übereinstimmend zeigt sich im PICMA, dass die laserbehandelte, luftgetragene Probe 10 A/B im Vergleich zu Probe 09 A/B und zu dem Ausgangsmaterial und der Positivkontrolle eine erkennbar stärkere Reaktion hervorruft (Abb. 6). Die Filterproben 09 A/B und 10 A/B unterscheiden sich allerdings lediglich durch die Materialstärke des Ausgangsmaterials. Das heißt die Bearbeitung der Probe 10 A/B dauerte länger und sie war somit einer höheren Temperatur ausgesetzt. Die Hitzeeinwirkung beeinflusst auf Basis dieses Ergebnisses möglicherweise die Toxizität lasergenerierter FVK-Stäube. Dies ist allerdings ein vorläufiges Ergebnis und bedarf der Überprüfung durch unabhängige Versuche gleicher Art. Dies schließt vergleichende Untersuchungen an PAN- und PECH-basierten Fasern ein sowie den Vergleich mit unterschiedlichem Matrixmaterial.

Geplante Fortsetzung der Untersuchungen

Das Ziel der Untersuchungen ist ein vertieftes Prozessverständnis zur Ableitung optimierter technischer, organisatorischer und persönlicher Schutzmaßnahmen.

Die Bewertung des Gefährdungspotenzials durch das Lasertrennen von FVK erfolgt wesentlich durch die toxikologische Analyse der aus der Laserprozesszone freigesetzten gas- und partikelförmigen Gefahrstoffe, wobei ein besonderes Augenmerk auf die entstehenden, evtl. gemäß WHO-Definition (WHO 1988) kritischen Fasern und Faserfragmente gelegt wird.

Die nachfolgend aufgelisteten Arbeitsinhalte sind vorgesehen:

- Zur Gewinnung von suspendierbaren Proben aus Faserbruchstücken werden zwei Alternativen verfolgt:
 1. Ein neu erstelltes Probenahmesystem (Abb. 4).
 2. Die Proben werden in einer Kugelmühle gemahlen (Abb. 5).
- Differenzierte Probenahme auf PECH und PAN basierte Fasern, sowie Einfluss der Matrix (Epoxy, PA6)

- Fortführung toxikologischer Untersuchungen und Bewertung der biologischen Entzündungseffekte durch faserhaltige Stäube aus der trennenden Laserbearbeitung von FVK, vor allem CFK und GFK, im „Partikel-induzierten Zellmigrationstest (PICMA)“ (Westphal et al. 2015)
- Aufspüren von Kontaminationswegen sowie die Verschleppung (Art und Menge) relevanter Gefahrstoffe (Faserfragmente / sphärische Partikel) im gesamten Arbeitsumfeld
- Bereitstellung einer generellen Gefährdungsbeurteilung als Ausgangspunkt für die von Herstellern und Betreibern durchzuführenden prozessspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen der gemäß ProdSG 2015 bzw. GefStoffV 2017
- Aufzeigen technischer und organisatorischer Maßnahmen gegen unbeabsichtigte Gefahrstoffexposition und Kontaminationsverschleppung bis in den häuslichen Bereich
- Empfehlungen zur Verbesserung der Arbeitsplatzgestaltung und von Arbeitsabläufen beim Lasertrennen von FVK als Ergänzung der existierenden Maßnahmenkataloge gemäß Neumann 2018 und DGUV 2017
- Messung der Temperaturen im Prozess
- Strömungsgeschwindigkeitsmessungen mittels Anemometer sowie Visualisierungen der Luftströmungen mit Hilfe von Nebelgeneratoren, um Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der freigesetzten Partikel und Faserfragmente ziehen zu können.
- Beispielhafte Aus- und Umrüstungen industrieller FVK-Laser Arbeitsplätze bzw. Anlagen zwecks Optimierung der Produktionsbedingungen und der Arbeitsschritte

Fazit

Als Ergebnis konnte ein vertieftes Prozessverständnis geschaffen werden. Dies erlaubt die Schließung existierender Kenntnislücken im Hinblick auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz. Die Toxizität der FVK-Stäube einschließlich der freigesetzten Faserfragmente wird bestimmt und existierende Grenzwerte auf ihre Anwendbarkeit überprüft.

Die Bewertung der Messdaten zu Emissionsraten, Exposition der Beschäftigten und Prozessumfeld sowie Beobachtungen zur Verschleppung führt zu einer Akzeptanzsteigerung der Laserbearbeitungsprozesse von FVK durch die Bereitstellung leicht zugänglicher Informationen und praktischer Hilfsmittel. Dafür werden neben einer speziellen Faserprobenahmetechnik auch konventionelle Strömungsmess- und -visualisierungsmethoden eingesetzt. Für die toxikologischen Untersuchungen kommt ein Partikel-induzierter Zellmigrationstest (PICMA) zur Anwendung. Die Ergebnisse des „Partikel-induzierten Zellmigrationstest (PICMA)“ können im Nachgang der Ableitung von Maßnahmen zur Minderung gesundheitsgefährdender Emissionen dienen, indem Prozessbedingungen identifiziert werden, die die Entstehung toxischer Stoffe bedingen oder meiden. Anhand der Bereitstellung von spezifischen Anforderungen und Handlungsanweisungen zu technischen und organisatorischen Maßnahmen sowie von Anweisungen zur PSA-Nutzung sinken die Kurz- und Langzeitrisiken für Beschäftigte und ihr Arbeitsumfeld. Letztendlich wird auf diese Weise nicht nur die Verschleppung von potenziell gefährlichen Rückständen bis ins häusliche Umfeld, sondern auch die Beschädigung von elektrischen Geräten und Anlagen vermieden.

Auf Basis der Projektergebnisse lassen sich spezifische, im Vergleich zu konventionellen Prozessen effektivere Maßnahmen (technisch, organisatorisch und persönlich) zum Schutz der Beschäftigten und der Umwelt sowie zur Vermeidung von Kontaminationsverschleppungen realisieren. Die Maßnahmen können ergänzende Lüfter, Ablufferfassungs- und Absaugeinrichtungen oder Bauteile bzw. Abschirmungen zur Unterdrückung unkontrollierter Luftströmungen beinhalten, um den speziellen Risiken der FVK-Laserbearbeitung entgegenzuwirken.

Dankesworte

Ein Großteil der Arbeiten wird gemeinsam von LZH und IPA im Rahmen des AiF-IGF-Forschungsprojektes Nr. 21629 N „Risikominimierung der Gefahren durch Kontamination im Arbeitsumfeld und Betrachtung der Toxikologie von Faserbruchstücken beim laserbasierten Trennen von Faserverbundkunststoffen“ (RisoTto) durchgeführt. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) für die Förderung und der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) für die Betreuung des Projektes.

Literatur

DGUV, 2017: „DGUV Information FB HM-092: Herstellung von CFK Bauteilen – Orientierungshilfe für die Gefährdungsbeurteilung bei der Serienfertigung“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung – DGUV (Hrsg.), Fachbereich Holz und Metall, Ausgabe 08/2017, Internet: https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen/infoblaetter/infobl_deutsch/092_cfk-bauteil.pdf, abgerufen am 18.06.2021.

Donaldson, K., Tran, C. L., 2004: „An introduction to the short-term toxicology of respirable industrial fibres“, Mutation Research 553 (1-2), S. 5–9.

Donaldson, K., Borm, P.J., Oberdörster, G., Pinkerton, K.E., Stone, V., Tran, C.L., 2008: „Concordance between in vitro and in vivo dosimetry in the pro-inflammatory effects of low-toxicity, low-solubility particles: the key role of the proximal alveolar region“, Inhalation Toxicology 20 (1), S. 53–62.

GefStoffV, 2017: „Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung)“, BGBl. I, S. 1643, Nov. 2010, zuletzt geändert durch BGBl. I, S. 626, März 2017.

Hennigs, C., Brodessaer, A., Meier, O., Grobelny, S., Bescherer-Nachtmann, K., Hustedt, M., Hermsdorf, J., Kaierle, S., 2019: „Safety issues concerning technical realization and usage of a mobile laser rescue device“, Proc. International Laser Safety Conference (ILSC), 18.–21. März 2019, Kissimmee, FL, USA, Artikel #1302, 9 Seiten.

Hustedt, M., Walter, J., Kaierle, S., Overmeyer, L., Baudrit, B., Kressirer, S., Pommer, C., Stübs, O., Werner, J., Heidemeyer, P., Bastian, M., 2015: „Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Prozessbedingungen bei der Laserbearbeitung von Kunststoffen auf die Freisetzung von partikel- und gasförmigen Emissionen sowie Bewertung des Gefährdungspotenzials“, AiF-IGF-Projekt Nr. 433 ZN, Abschlussbericht, Forschungseinrichtungen Laser Zentrum Hannover e. V. und SKZ - KFE gGmbH, Hannover/Würzburg, Shaker Verlag, Aachen.

Hustedt, M., Walter, J., Bluemel, S., Jaeschke, P., Kaierle, S., 2017: „Analysis of hazardous substances released during CFRP laser processing“, Proc. SPIE 10097, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VI, 100970Q, 18 Seiten, Doi: doi.org/10.1117/12.2249868.

Jaeschke, P., Hustedt, M., Kracht, D., 2016: „Photonischer Leichtbau – Photonische Verfahren und Werkzeuge für den ressourceneffizienten Leichtbau“, Laser Zentrum Hannover e. V., Koordination der Projekte der BMBF-Förderinitiative, Hannover, Internet: <https://www.lzh.de/de/verband-photonischer-leichtbau>, abgerufen am 18.06.2021.

Kaierle, S., 2018: „Minimierung der Gefahren durch Kontamination und Verschleppung im Arbeitsumfeld bei der laseradditiven Verarbeitung von Metallpulvern (MiGlaM)“, AiF-IGF-Projekt Nr. 19.935 N des LZH, Hannover, eingereicht über die Forschungsvereinigung des DVS, Laufzeit 02/2018–03/2021.

Kaierle, S., 2020: „Prozess- und Komponentenentwicklung, Systemintegration sowie Lasersicherheit für das laserbasierte Rettungssystem“, Teilvorhaben des Laser Zentrums Hannover e. V. im BMBF-Verbundprojekt Nr. 13N14140 „Innovatives Lasersystem zur Rettung bei komplexen Unfallszenarien“ (LaserRettung), Hannover, 10/2016–04/2020.

LZH, 2017: „Datenbank Lasersicherheit 2.0“, Laser Zentrum Hannover e. V. (Hrsg.), Hannover, 1997, Internet: <https://www.lzh.de/de/publikationen/lasersicherheit>, letzte umfassende Änderung 2017, abgerufen am 18.06.2021.

Ma-Hock, L., Burkhardt, S., Strauss, V., Gamer, A.O., Wiench, K., van Ravenzwaay, B., Landsiedel, R., 2009: „Development of a short-term inhalation test in the rat using nano-titanium dioxide as a model substance“, *Inhalation Toxicology* 21 (2), S. 102–118.

Neumann, V., 2018: „Gefährdungen durch Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe (CFK)“, Vortragsfolien, Institut für Gefahrstoff-Forschung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Institut an der Ruhr-Universität Bochum, 42 Seiten, Internet: http://www.igf-bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Microsites/IGF/Schlema_IX/Gefährdungen_durch_Kohlenstoffverstärkte_Kunststoffe_CF_K_-_Volker_Neumann.pdf, abgerufen am 18.06.2021.

ProdSG, 2015: „Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz)“, Bundesgesetz, letzte Neufassung: BGBl. I, S. 2178, 2179; 2012 I, S. 131 (November 2011), geändert durch BGBl. I, S. 1474 (August 2015).

Suttman, O., 2017: „Entwicklung von Prozessen zur CFK-Bearbeitung auf Basis eines fasergeführten ns-Hochleistungslasers“, Teilvorhaben des Laser Zentrums Hannover e. V. im BMBF-Verbundprojekt Nr. 13N12763 „3D Hochleistungs-Laserbearbeitung zur Qualitäts- und Durchsatzsteigerung für die prozesssichere, automatisierte Fertigung von CFK-Leichtbau-Strukturen“ (HoLQueSt 3D), koordiniert durch die Volkswagen AG, Wolfsburg, Schlussbericht, Hannover, 2013–2017.

TA-Luft, 2002: „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft)“, Verein Deutscher Ingenieure – VDI (Hrsg.), 2. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2002 (GMBl. 2002, Heft 25–29, 2002, S. 511–605).

TRGS 402, 2016: „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 402: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition“, Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe Januar 2010, geändert und ergänzt durch GMBl 2016, S. 843–846, 21.10.2016 [Nr. 43].

Walter, J., Hustedt, M., Staehr, R., Kaierle, S., Jaeschke, P., Suttman, O., Overmeyer, L., 2014: „Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics – investigation of hazardous process emissions“, *Physics Procedia* 56, S. 1153–1164.

Walter, J., Brodesser, A., Hustedt, M., Bluemel, S., Jaeschke, P., Kaierle, S., 2016: „Laser processing of carbon fiber reinforced plastics – release of carbon fiber segments during short-pulsed laser processing of CFRP“, *Physics Procedia* 83, S. 1021–1030.

Walter, J., Hustedt, M., Blümel, S., Jäschke, P., Kaierle, S., 2017: „Process emissions during laser processing of CFRP: measurement of hazardous substances and recommendation of protective measures“, *Proc. WLT Conference Lasers in Manufacturing (LiM 2017)*, Paper Nr. 200, 11 Seiten.

Walter, J., Griemsmann, T., Buchbender, I., Hustedt, M., Hoff, C., Hermsdorf, J., Kaierle, S., 2019: „Verschleppung von Gefahrstoffen im Verlauf der Prozesskette beim selektiven Laserschmelzen“, Vortragsband der 5. Fachtagung Gesundheits- und Arbeitsschutz beim Schweißen 2019, 07. Mai 2019, Halle, 7 Seiten.

Walter, J., Hennigs, C., Hustedt, M., Hermsdorf, J., Kaierle, S., 2021: „Potential health risks due to emission of hazardous substances during outdoor laser cutting“, *Proc. WLT Conference Lasers in Manufacturing (LiM 2021)*, Paper Nr. 237, 10 Seiten.

Walter, J., Wippo, V., Hustedt, M., Hermsdorf, J., Kaierle, S., Westphal, G.A., Brüning, T., 2021: „Minimierung der Risiken durch Kontamination im Arbeitsumfeld und Betrachtung der Toxikologie von Faserbruchstücken beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen“, 28. Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", 7.-9. September 2021 in Bremen.

Westphal, G.A., Schremmer, I., Rostek, A., Loza, K., Rosenkranz, N., Brüning, T., Epple, M., Bünger, J., 2015: „Particle-induced cell migration assay (PICMA): A new in vitro assay for inflammatory particle effects based on permanent cell lines“, *Toxicology in Vitro* 29 (5), S. 997–1005.

Westphal, G.A., Monsé, C., Walter, D., Brüning, T., Bünger, J., 2019: „Gefährdungsanalyse für Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe – PICMA-Test weist auf sehr geringe Entzündungswirkungen hin“, *IPA-Journal* 01/2019, S. 10–14.

Westphal, G.A., Rosenkranz, N., Brik, A., Weber, D., Föhring, I., Monsé, C., Kaiser, N., Hellack, B., Mattenklott, M., Brüning, T., Johnen, G., Bünger, J., 2019: „Multi-walled carbon nanotubes induce stronger migration of inflammatory cells in vitro than asbestos or granular particles but a similar pattern of inflammatory mediators“, *Toxicology in Vitro* 58, S. 215–223.

WHO, 1988: „Man-made mineral fibres and radon“, World Health Organization (WHO), International Agency for Research on Cancer (IARC), IARC-Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 43, Lyon, S. 59.