

Bewertung der Untersuchungen zu den Gefahren und zur Toxikologie von Faserbruchstücken beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

Evaluation of studies on the hazards and 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 Leibniz Universität Hannover, 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

Der Einsatz von Faserverbundkunststoffen (FVK) bei neuen Leichtbaukonzepten führt u. a. zur Einsparung von CO₂-Emissionen. Die trennende Bearbeitung von FVK erfolgt im hier beschriebenen Fall mit kurzgepulster Laserstrahlung bei einer mittleren Leistung von 1,5 kW. Dieser Prozess führt dazu, dass die Matrix zusammen mit der Faserverstärkung innerhalb kürzester Zeit zersetzt und eine große Anzahl an luftgetragenen und lungengängigen Faserbruchstücken generiert wird. Die zur Untersuchung der Toxikologie erforderliche Masse (mind. 200 mg lungengängige Fasern) von Faserbruchstücken wird mit einer angepassten strömungstechnischen Erfassungsgeometrie zur Größenseparation, während der Filterbeaufschlagung im Prozessabgas, erzeugt. Die Methode eignet sich nicht zur Bestimmung der Anzahl an Faserbruchstücken. Deshalb werden parallel weitere Filtermedien (Cellulosenitrat Planfilter, goldbedampfte Kernporenfilter) zur Probenahme und standardisierten Auswertung mittels REM eingesetzt. Die Toxizität der FVK-Stäube kann anschließend im sogenannten „Partikel induzierten Zellmigrationstest“ (PICMA) evaluiert werden. Existierende Kenntnislücken im Hinblick auf den Arbeits- und Gesundheitsschutz werden so geschlossen.

Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Partikel und Faserfragmente werden mit Strömungsmessungen und -visualisierungen möglich. Die von Wirbeln geprägte, turbulente Strömung der luftgetragenen Gefahrstoffe ist von der Prozesszone in die Umgebung von der FVK-Oberfläche aus weg gerichtet. Auf Basis der Projektergebnisse lassen sich für das Laserstrahltrennen von Faserverbundwerkstoffen effektive Schutzmaßnahmen für die Beschäftigten, Ausrüstung und die Umwelt ergreifen.

Einleitung

Bei der FVK-Verarbeitung entsteht alveolengängiger Staub, einschließlich Faserfragmenten, der für die Beschäftigten gefährlich sein kann (Walter, 2014). Um dieses Risiko einzuschätzen

und die notwendigen Schutzmaßnahmen ergreifen zu können, ist es notwendig, die toxikologischen Eigenschaften der Abgase zu ermitteln. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Partikeln und Faserbruchstücken hängen von ihren entzündlichen Eigenschaften ab. Daher ist die Migration von Entzündungszellen in die Lunge ein wichtiger Toxizitätsindikator für Partikeltests (Ma-Hock et al., 2009). Auf zellulärer Ebene kann die Migration von Entzündungszellen mithilfe des „Particle Induced Cell Migration Assay (PICMA)“ modelliert werden (Westphal et al., 2015, Westphal et al., 2019). Darüber hinaus wurde die Zytotoxizität bestimmt. Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten von Partikeln und Faserfragmenten werden durch Strömungsmessungen und Visualisierungen gezogen. Die freigesetzten FVK-Bruchstücke breiten sich von der Oberfläche weg unkontrolliert aus, wegen einer typischen turbulenten Strömung durch die Luft in der Laserkabine. Aufgrund der geringen Dichte des FVK-Staubs geht die Verbreitung weit über die unmittelbare Bearbeitungszone hinaus. Außerdem ist festzustellen, dass die faserigen FVK-Fragmente in Flugrichtung ausgerichtet sind, wodurch die Reichweite, solcher faserförmiger Rauche deutlich größer ist, als die von dichterem granulären Rauch. Dank der systematischen Probenahme entsprechend der angepassten Technologie (Abb. 1) wurden genügend Faserfragmente gesammelt und stehen für die Toxizitätsprüfung bereit.

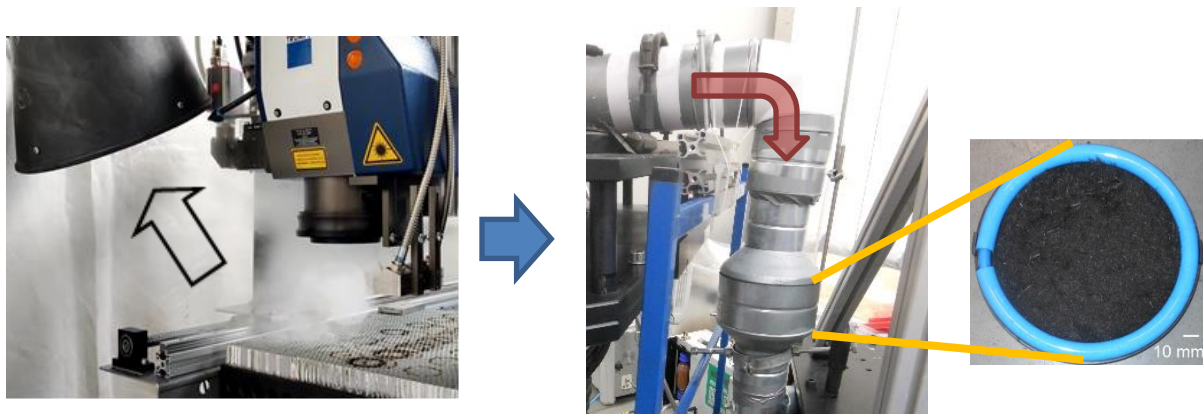


Abb. 1: Visualisierung der Erfassung mittels Nebelgenerator (Pfeil im linken Bild → Strömungsrichtung der Erfassung) und Aufbau für die angepasste Probenahme auf einem Planfilter im Abgas (Pfeil im mittleren Bild → Strömungsrichtung im Abgasrohr zum Probenahmefilter)

Die Probenahme mit herkömmlichen Systemen auf einem goldbeschichteten Kernporenfilter und die Auswertung anhand von REM-Bildern zeigen, dass Anzahl, Morphologie/Geometrie und Größe der freigesetzten Fasern und Fragmente Risiken darstellten.

Ergebnisse der Emissionscharakterisierung

Die Ergebnisse der Emissionscharakterisierung der Lasermaterialbearbeitung (Tabelle 1) von CFK-Materialien zeigen keine signifikanten Abweichungen von herkömmlichen mechanischen Abtragverfahren hinsichtlich der Emissionsraten von partikelförmigen Gefahrstoffen (Wertbereiche von 3,2 bis 20,8 mg/s) (LZH, 2017). Hierzu zählen auch Faserfragmente. Auch die Wirkung der Matrix ist erkennbar.

Bei Polyacrylnitril (PAN-basierten) Fasern in Epoxidharz treten deutlich höhere Emissionsraten als in Polyamid 6 (PA6) Matrix auf (Tabelle 2). Für Fasern auf Pechbasis stehen nur Daten in Epoxidharzmatrix zur Verfügung, sodass keine Einflüsse der Matrix verglichen werden können. Um den unterschiedlichen Anforderungen an die Charakterisierung von Fasersegmenten gerecht zu werden, wurde die Probenahme dahingehend modifiziert, dass zusätzlich zu den allgemein verfügbaren Probenahmesystemen (VDI-Richtlinien 2066, 3492, 3867) ausreichende Mengen erfasst werden.

Tabelle 1: Eingesetzte Prozessparameter für die Emissionscharakterisierung

Parameter	Laser	TruMicro 7050
Prozess		Abtragen
Art der Optik		Trumpf 3D PFO
Wellenlänge		1030 nm
Fokusbereich		d = 600 µm
Leistung		P = 1.500 W
Frequenz		f = 18,8 kHz
Pulsenergie		E _P = 80 mJ
Pausen		t = 500 ms
Hatchabstand		0,8 mm
Abstand zur Absaugung		100-250 mm

Für das Gravikon VC 25-System (Riediger, 2001) sind für die Toxizitätsprüfung keine ausreichenden nach Größe differenzierte Mengen sammelbar (min. 200 mg alveolengängige Fasern oder 25–30 mg luftgetragene Fragmente, die kürzer als 50 µm sind). Auf Basis des im Gravikon verwendeten Cellulosenitrat-Planfilters wurde im Abgasstrom eine Sammeleinheit integriert (Abb. 1), die selektiv überwiegend Fasern < 10 µm erfasst.

Die zur Konzentrationsbestimmung benötigten Proben wurden parallel über einen goldbedampften Kernporenfilter bei einem Volumenstrom von 12 l/min gesammelt. Hierzu werden die Fasermonitore direkt in den Abgasstrom eingebracht. Eine isokinetische Teilvolumenprobenahme ist bei dieser Anordnung nicht möglich und es wird nur das Probenahmenvolumen durch diese Filter in die Berechnung einbezogen.

Anschließend werden die Faserfragmente mittels Rasterelektronenmikroskopie gezählt. Bei der Laserablation werden nur Fasern < 1 mm berücksichtigt, die den Filter erreichen und impaktiert werden. Fasern > 1 mm bilden mit Fasern > 10 µm teilweise Agglomerate und lagern sich auf horizontalen Flächen in der Laserkabine ab.

Tabelle 2: Messergebnisse im Abgasstrom Laserprozess mit ausgewählten Werkstoffen beim Abtragen

Werkstoff	PAN-Faser in PA6 Matrix	PAN-Faser in Epoxidharzmatrix	Pech-Faser in Epoxidharzmatrix
Emissionsrate [mg/s]	7,04 ± 0,6	13,9 ± 1,5	17,7 ± 1,5
Faserkonzentration [F/m ³]	2594	4737	5844

Der relative Fehler bei der Faserausählung beträgt dabei 10-15%.

Auf Basis der im Projekt RisoTto angepassten 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, 2022).

Toxikologie der Faserbruchstücke

Die Toxizität von Partikeln und Fasern hängt hauptsächlich von ihren entzündlichen Eigenschaften ab (Westphal, Rosenkranz et al., 2019). Es scheint, dass die Toxizität der Faserfragmente durch ihre Form und Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen und biologischen

Abbauprozessen (Biostabilität) bestimmt wird (Donaldson und Tran 2004, Donaldson et al. 2008). Folglich gelten Fasern mit kritischer Größe (WHO, 1988) und auch neue faserförmige Stoffe im Allgemeinen als besonders gefährlich.

Die lichtmikroskopische Analyse von Staubproben, die mit dem Probenahmesystem Gravikon VC 25 gewonnen wurden, zeigt, dass auch sehr lange Fasern (mehrere mm bis cm) in den Proben enthalten sind. Diese bildeten Agglomerate, die nicht suspendiert werden konnten. Bei diesen Auswertungen ist zu beachten, dass die Fasern in Flugrichtung ausgerichtet sind und es wird deutlich, dass lange, nicht einatembare Fasern vom Messsystem als „einatembare Staubfraktion“ erfasst werden. Die Proben konnten unter diesen Bedingungen nicht suspendiert werden und daher nicht unmittelbar auf ihre Toxizität analysiert werden.

Analog wurden die Proben unter unterschiedlichen Bedingungen in einer Kugelmühle vorbehandelt. Die nicht laserbehandelten Ausgangsprobekörper wurden unter den gleichen Bedingungen gemahlen und das resultierende gemahlene Material mit biologischen Testsystemen verglichen. Geht man davon aus, dass es durch die Laserbehandlung zur Bildung toxischer Bruchstücke kommt, hätte das so gewonnene Mahlgut eine stärkere biologische Wirkung.

Der PICMA zeigte im Vergleich, dass eine der luftgetragenen Faserproben, die mit dem Laser gewonnen wurden, eine deutlich stärkere Reaktion hervorrief als die übrigen Proben sowie das gemahlene Ausgangsmaterial und die Positivkontrolle. Dabei unterscheiden sich die Faserproben bei gleichen Prozessparametern nur in der Dicke des Ausgangsmaterials.

Dies bedeutet, dass die Proben unterschiedlichen Temperaturregimen ausgesetzt waren. Basierend auf diesem Ergebnis kann Hitze einwirkung die Toxizität von lasergeneriertem FVK-Staub beeinflussen. Hierbei handelt es sich jedoch um vorläufige Ergebnisse, die durch weitere Tests gegenwärtig überprüft werden. Dazu gehören vergleichende Untersuchungen von Fasern auf Basis von PAN und Pech sowie Vergleiche mit unterschiedlichen Matrixmaterialien.

Berücksichtigung der Temperaturentwicklung im Prozess

Wie vorherig gezeigt hängt die toxikologische Wirkung der Proben von dem Temperaturregime des Laserprozesses ab. In einer ersten Versuchsreihe wurde deshalb der Prozess in Abhängigkeit von der Werkstoffdicke mittel thermographischer Untersuchungen charakterisiert (Abb. 2). Im Folgenden wurden die Strömungsverhältnisse für die Kühlung der Prozesszone optimiert bzw. die Temperatur möglichst konstant gehalten. Dies konnte durch Anpassen der Pausen beim iterativen Abtragprozess und der Position des Crossjets durchgeführt werden. Dazu wurden die Prozesse durchgehend mittels Thermographie beobachtet, um Abweichungen zu erkennen und im Temperaturprofil abweichende Proben auszusortieren.

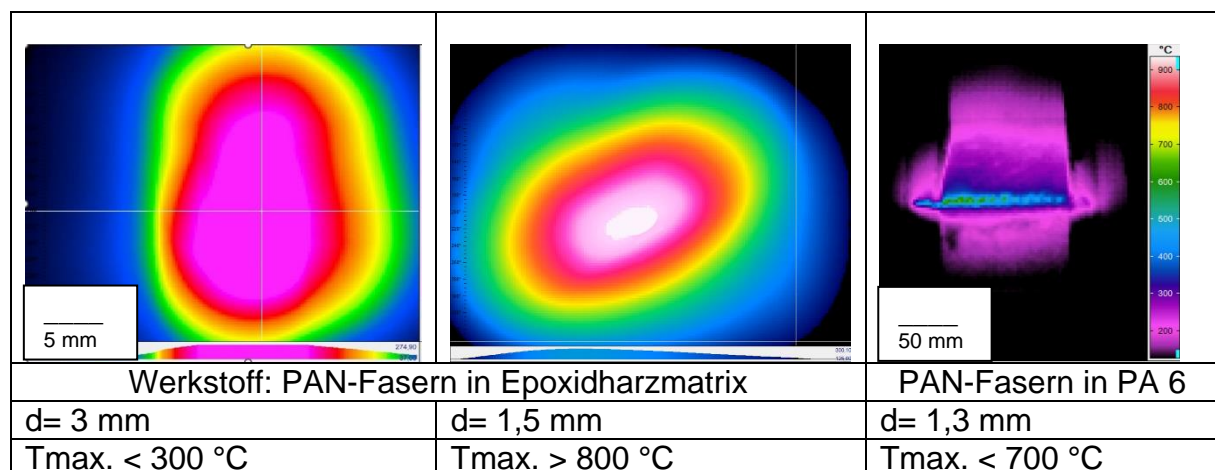


Abb. 2: Prozessüberwachung mittels Thermographie (manuelle Steuerung)

Dabei wurde die Annahme, dass dicke Werkstoffproben höheren Temperaturen ausgesetzt waren, nicht bestätigt. Im Gegenteil stellte sich heraus, dass weniger dicke Materialien viel höhere Verarbeitungstemperaturen aufweisen.

Anschließend wurden die Prozesse so gesteuert, dass die Temperaturprofile der verglichenen Proben nahezu gleich waren. Die abschließenden Ergebnisse der im Anschluss durchgeführten Toxizitätsbewertung wird im AiF-Projektabschlussbericht Nr. 21.629 N mit dem Acronym „RisoT-to“ veröffentlicht.

Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen

Die abschließenden Arbeitsplatzmessungen (TRGS 402, 2016) wurden an zwei rein laserbasierten und mehreren mechanischen Bearbeitungsprozessen durchgeführt. Schwerpunkt lag hier auf der A-/E-Staubfraktion und Anzahl von Faserbruchstücken, sowie deren Morphologie (Abb. 3). In Stichproben am Arbeitsplatz wurden Konzentrationen unterhalb der zulässigen Grenzwerte von 0,28 mg/m³ für Acrylnitril und 0,2 mg/m³ für Benzol in der Luft am Arbeitsplatz festgestellt. Die flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) spielen augenscheinlich nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb wurden sie nur stichprobenartig bestimmt.

Der größte toxikologische Effekt sollte deshalb von der Partikelmorphologie abhängig sein. Deshalb wurden neben der Sammlung der Faserbruchstücke für die Toxikologie in großer Menge/Masse, auch Proben zur Auswertung und Auszählung anhand von REM-Aufnahmen genommen. Beispiele für die Morphologie und Faserkonzentration finden sich in Abb. 3.

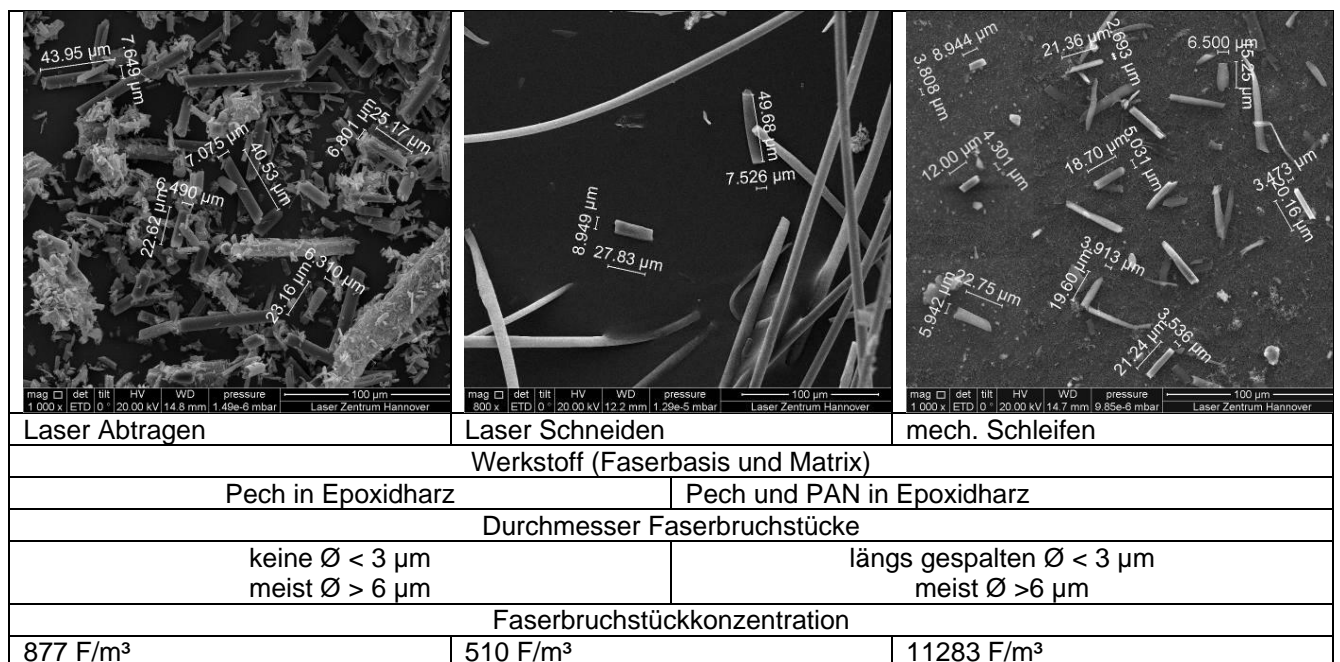


Abb. 3: REM-Aufnahmen der Fasermonitor nach Raumluftprobenahme
Vermessung und Auszählung

Bei der Probenahme in der Raumluft werden nur Faserbruchstücke < 1 mm Länge berücksichtigt. Ein weiterer Teil der entstehenden Fasern ist >> 1 mm lang. Diese bilden zusammen mit Fasern einer Länge von mehr als 50 mm Agglomerate, die zu Boden sedimentieren. Für Kohlefaserbruchstücke existieren keine aktuellen Beurteilungsmaßstäbe. Deshalb werden in Analogie die Grenzwerte für Asbestfasern herangezogen. Bei den hier beim Laserprozess auftretenden Werten von < 10.000 F/m³ in der verbleibenden Raumluft ist die Akzeptanzkonzentration (für Asbestfasern) gemäß TRGS 910 (TRGS 910, 2014), die einem Akzeptanzrisiko von

4 : 10.000 entspricht unterschritten. Diese Faserkonzentration ist bei Unterschreitung mit einem niedrigen, hinnehmbaren Krebsrisiko assoziiert. Wird dieser Wert überschritten (hier nur beim Schleifen) sind einfache technische Schutzmaßnahmen (optimierte Erfassung) erforderlich, oder aber der temporäre Einsatz von Atemschutz. Für die untersuchten Laserverfahren sind die Schutzmaßnahmen ausreichend sowie Akzeptanz- und Toleranzkonzentration (in Analogie zu Asbestfasern) eingehalten und es sind keine zusätzlichen oder besonderen Maßnahmen erforderlich.

Das bestätigt frühere Ergebnisse bei laserbasierten Verfahren. Auch bei Suttman 2017, Hustedt et al. 2017, Walter et al. 2016 und Walter et al., 2017 wurden an laserbasierten Verfahren die Emissionen, Immissionen und Exposition von der CFK-Bearbeitung untersucht. Diese Forschungsprojekte wurden unter Verwendung kurzgepulster Scheibenlaser mit der Prozessstrategie des Remote Lasertrennen durchgeführt. Darüber hinaus sind bei den verschiedenen Prozessen in den „CFK-Projekten“ der BMBF-Fördermaßnahme „Photonischer Leichtbau“ (Jaeschke et al., 2016) Grenzwertüberschreitungen in der Luft am Arbeitsplatz eher selten.

Fazit der Untersuchungen

Die Toxizität von FVK-Staub, einschließlich freigesetzter Faserfragmente, wurde ermittelt und die vorliegenden Grenzwerte auf ihre Anwendbarkeit überprüft. Dadurch wurde ein tieferes Verständnis des Prozesses erreicht. Dies trägt dazu bei, bestehende Wissenslücken im Bereich Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz zu schließen. Durch das Projekt können besondere Maßnahmen (technisch, organisatorisch und persönlich) umgesetzt werden, die wirksamer als bisherige Techniken und Verhaltensregeln sind, Beschäftigte und Umwelt schützen und die Ausbreitung der Gefahrstoffe verhindern. Als Ergänzung der existierenden Maßnahmenkataloge gemäß Neumann 2018 und DGUV 2017 werden Empfehlungen zur Verbesserung der Arbeitsplatzgestaltung und von Arbeitsabläufen beim Lasertrennen von FVK hinzugefügt.

Zu den Maßnahmen können zusätzliche Luftmesser und Düsen gehören (z. B.: Crossjet), Ventilatoren und Abgaserfassungsvorrichtungen oder die Ausrichtung vorhandener Komponenten und Einhausungen (zur Lasersicherheit), um unkontrollierten Luftstrom zu unterdrücken.

Die Auswertung der gemessenen Konzentrationswerte aus inhalativer Exposition und Emissionen in die unmittelbare Prozessumgebung sowie Beobachtungen der Dynamik der Partikelausbreitung führen durch die Bereitstellung von Informationen und praktischen Werkzeugen zu einer erhöhten Akzeptanz der FVK-Laserbearbeitung.

Neben der maßgeschneiderten Faserprobenahme mit einer speziellen Sammelgeometrie (Walter et al., 2021, Walter et al., 2022) für die Proben zur toxikologischen Untersuchung kommen zusätzlich Strömungsmess- und Bildgebungsverfahren zum Einsatz.

Für die Toxizitätstests wurde der partikelinduzierte Zellmigrationstest (PICMA) verwendet. Aus den PICMA-Ergebnissen können dann Handlungsempfehlungen und Maßnahmen zur Reduzierung gefährlicher Emissionen abgeleitet werden. Dies kann durch die Optimierung von Prozessbedingungen erreicht werden, die optimiert sind oder die Bildung und Ausbreitung schädlicher (toxischer) Substanzen im gasförmigen und partikelförmigen Zustand verhindern.

Das Projekt bietet konkrete Ansätze für detaillierte Risikoanalysen und individuelle Beratung zu technischen und organisatorischen Maßnahmen sowie Anleitungen zum Einsatz persönlicher Schutzausrüstung, um kurz- und langfristige Risiken für Beschäftigte an ihrem Arbeitsplatz und die Umwelt zu reduzieren.

Letztendlich wird dadurch nicht nur verhindert, dass potenziell gefährliche Rückstände in die industrielle Produktionsumgebung gelangen, sondern auch Schäden an elektrischen Geräten und Anlagen verhindert. Das Ziel der Untersuchungen wurde damit erreicht.

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.

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.

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.

Suttmann, 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.

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 GMBI 2016, S. 843–846, 21.10.2016 [Nr. 43].

TRGS 910, 2014: „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 910: Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen“ Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) Ausgabe Februar 2014, Berichtigt: GMBI 2023, S. 679, 5.5.2023 [Nr. 32].

- Walter, J., Hustedt, M., Staehr, R., Kaierle, S., Jaeschke, P., Suttmann, 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., 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.
- Walter, J., Wippo, V., Jäschke, P., Kaierle, S., Rosenkranz, N., Westphal, G.A., Bünger, J., 2022:** „Optimierung der Faserprobenahme im Hinblick auf Größenseparation und Maximierung der Massenausbeute zur Untersuchung der Toxikologie von Faserbruchstücken beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen“, 29. Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“, 6.-8. September 2022 in Ilmenau.
- 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.