Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“
7. – 9. September 2021, Bremen

Minimierung der Risiken durch Kontamination im Arbeitsumfeld und Betrachtung der Toxikologie von Faserbruchstücken beim Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen

Minimization of risks due to contamination in the working environment and consideration of the toxicology of fiber fragments during laser-beam cutting of fiber-reinforced plastics

J. Walter[a], V. Wippo[a], S. Hirt[a], M. Hustedt[a], J. Hermsdorf[a], S. Kaierle[a], N. Rosenkranz[b], G. A. Westphal[b], J. Bünger[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, Deutschland

Schlagworte: Laserschneiden, Faserverbundwerkstoffe, Faserbruchstücke, Toxikologie
Keywords: laser cutting, reinforced plastics, fiber fragments, toxicology

Zusammenfassung

Die Laserbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe (FVK) wird in der Industrie vermehrt erfolgreich eingesetzt. Gemäß den gesetzlichen Regularien müssen dabei die Gesundheit und die Arbeitssicherheit der Beschäftigten gewährleistet sein. So sind bei der Verarbeitung dieser Werkstoffe besonders aufmerksames und sicheres Verhalten notwendig. Die Vorgaben und Sicherheitskonzepte anderer emissionsreicher konventioneller Verfahren können jedoch nicht unmittelbar übertragen werden. Zu den laserbasierten Trennprozessen sollen daher Daten bzgl. der Freisetzung und Verschleppung von Gefahrstoffen sowie zu den toxikologischen Wirkungen ermittelt werden, um nicht zuletzt das Risikobewusstsein und die Gefahrenwahrnehmung zu erhöhen. Die Prozessperipherie muss dabei mit beachtet werden. Das beinhaltet die Prüfung der Erfassung und der Funktionalität unterschiedlicher Filtermedien gegenüber Fasern und Faserbruchstücken. Im Rahmen der umzusetzenden Schutzmaßnahmen sollen unter strömungstechnischen Gesichtspunkten auch Kabinen- und Zusatzausstattungen der Bearbeitungsanlagen, Abschirmungen oder Hilfsaufbauten evaluiert werden.

Als Ergebnis führen die gewonnenen Messdaten zu Emissionsraten, Gefahrstoffkonzentrationen und der Fasertoxikologie 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 kommen ein Zelltoxizitätstest und der Partikel-induzierte Zellmigrationstest (PICMA) zur Anwendung. 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 nicht nur die Verschleppung potenziell gefährlicher Rückstände bis ins häusliche Umfeld, sondern auch die Beschädigung elektrischer Geräte und Anlagen vermieden.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Einleitung

Bei der trennenden Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen (FVK) mit kurzgepulster Laserstrahlung der mittleren Leistung 1,5 kW wird lokal eng begrenzt durch Strahlungsabsorption eine sehr große thermische Energie eingebracht, die die Matrix zusammen mit der Faserverstärkung auf sehr kurzer Zeitskala zersetzt. Durch die Gasentstehung bzw. eine von außen applizierte Gasströmung wird dann das Material aus dem Wechselwirkungsbereich entfernt.

Gefährdungen für die Beschäftigten durch FVK-Stäube, insbesondere durch enthaltene Fasern und Faserfragmente, ergeben sich generell aus der Möglichkeit von Inhalation, Hautkontakt und Inkorporation über den Magen-Darm-Trakt. Außerdem besteht im Fall der Redeposition von Faserfragmenten ein erhöhtes Kurzschlussrisiko für elektronische Geräte. Durch systematische Analyse und Bewertung der Freisetzung von Fasern und Faserfragmenten (vgl. Abb. 1), vor allem von kritischen Fasern gemäß Definition der Weltgesundheitsorganisation (WHO 1988), sphärischen Partikeln und organischen Gasen, der Kontamination des Arbeitsbereiches durch Redeposite sowie der arbeitsplatzspezifischen Verschleppungswege kann 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 im sogenannten „Partikel-induzierten Zellmigrationstest (PICMA)“ evaluiert (Westphal et al. 2015, Westphal, Monsé et al. 2019, Westphal, Rosenkranz et al. 2019).

Strömungsmessungen und -visualisierungen sollen zeigen, wie ein Teil der freigesetzten Gefahrstoffe 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. Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Partikel und Faserfragmente werden somit möglich. Die von den Gefahrstoffen überwundene Distanz von der Prozesszone ist bedingt durch die Größe der bearbeiteten FVK-Bauteile und der Laserkabine mitunter erheblich.

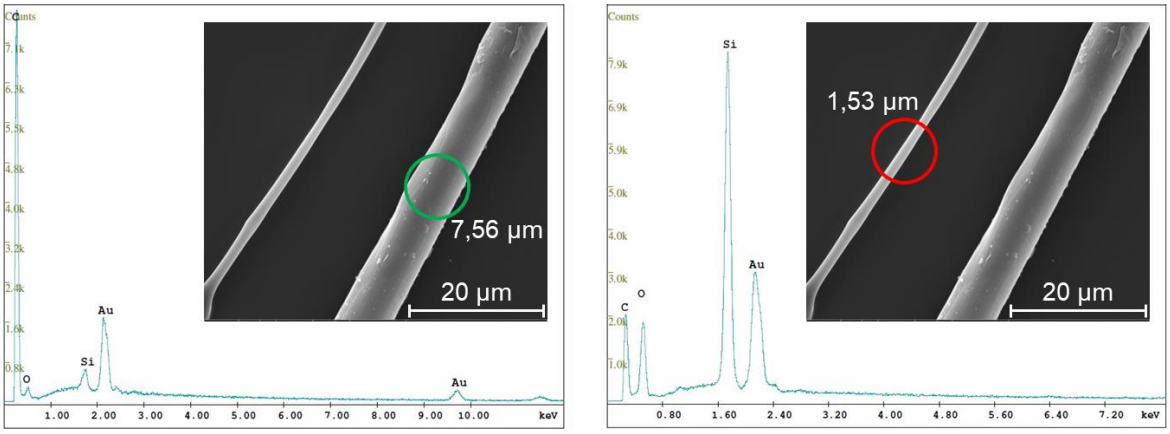

Abb. 1: Mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) identifizierte Faserfragmente aus der trennenden Laserbearbeitung von FVK, die sowohl Glas- als auch Carbonfasern enthalten (Suttmann 2017). Der grüne Kreis in dem Bild links markiert die Carbonfaser, der rote Kreis in dem Bild rechts die Glasfaser.

Vorarbeiten bzgl. Gefahrstofffreisetzung und Verschleppung

Als Vorarbeiten des LZH, die für die in der Einleitung beschriebene Aufgabe relevant erscheinen, sind die nachfolgend kurz beschriebenen Arbeiten sowie die LZH-Datenbank (LZH 2017),

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

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, zu nennen.

Hustedt et al. 2015 nahmen eine detaillierte Untersuchung der partikel- und gasförmigen Emissionen bei der Laserbearbeitung von ausgewählten Kunststoffen vor. Neben Analysen der Gefahrstoffkonzentrationen in der Abluft zur Ermittlung der Quellstärken und zum Vergleich mit Grenzwerten gemäß TA-Luft 2002 wurden Messungen der Belastung der Luft am Arbeitsplatz gemäß TRGS 402 2016 durchgeführt und die Expositionen bewertet. Faserverstärkte Kunststoffe wurden in diesem Zusammenhang nur beispielhaft betrachtet (Walter et al. 2014). Die Faserbruchstückentstehung und die Fasereigenschaften spielten dabei lediglich eine untergeordnete Rolle.

Suttmann 2017, Hustedt et al. 2017, Walter et al. 2016 und Walter et al. 2017 evaluierten die aus laserbasierten Prozessen an CFK stammenden Emissionen und Immissionen inkl. der faserförmigen Partikel. Einen Schwerpunkt bildete ein am LZH realisierter Prozess mit einem kurzgepulsten Scheibenlaser entsprechend dem „Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden“ (englisch „Remote Ablation Cutting – RAC“, vgl. Abb. 2). Außerdem wurden verschiedene Prozesse in den „CFK-Projekten“ der zugehörigen BMBF-Fördermaßnahme (Jaeschke et al. 2016) betrachtet. Bei den untersuchten Prozessen waren Grenzwertüberschreitungen in der Luft am Arbeitsplatz die Ausnahme. Einen weiteren Schwerpunkt stellten Messungen an einem von Partnern entwickelten Prototyp für die katalytische Abluftbehandlung dar. Toxikologische Betrachtungen fanden in diesem Rahmen nicht statt.

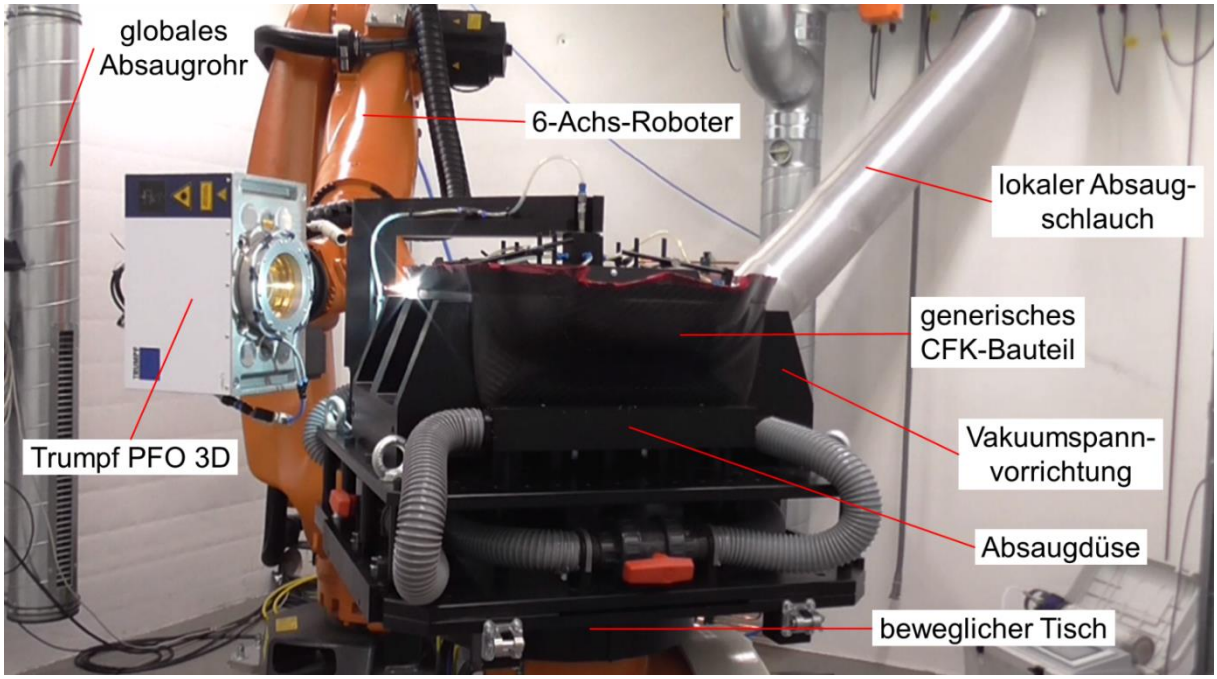

Abb. 2: Spezielles Vakuumspannsystem für planare oder generische Bauteile mit integrierter lokaler Erfassung und Absaugung, zusätzlich globale Kabinenabsaugung (Suttmann 2017).

Von Hennigs et al. 2019 und Kaierle et al. 2020 wird die Entwicklung eines laserbasierten Rettungssystems für komplexe Unfallszenarien bis zur Demonstration unter realitätsnahen Bedingungen dargestellt. In dem Zusammenhang erfolgte stichprobenartig die Untersuchung der Gefahrstofffreisetzung während des Schneidens von Fahrzeugbauteilen, u.a. auch aus CFK

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

(Walter et al. 2021). Die Gefährdung infolge inhalativer Exposition wurde hier lediglich begleitend betrachtet. Eine statistische Auswertung bzgl. Fasern und Faserbruchstücken erfolgte nicht. Ebenso wenig wurden Gefahrstoffverschleppung und Toxikologie analysiert.

Walter et al. 2019 und Walter et al. 2020 beschäftigten sich mit Freisetzung und Verschleppung partikelförmiger Gefahrstoffe im Zuge der laserbasierten additiven Fertigung mit Metallpulvern im Pulverbettverfahren (LPBF). Die Untersuchungen erfolgten an handelsüblichen Fertigungsanlagen und in den zugehörigen Anlagenumgebungen. Die Fertigungsanlagen sind im bestimmungsgemäßen Betrieb geschlossen, so dass nur im Verlauf der Bauteilentnahme, Nachbearbeitung und Reinigung ein direkter Kontakt mit Pulvern (Primärpartikeln) und Prozessemissionen (Sekundärpartikeln) möglich ist. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurden bestimmte, auch hier einsetzbare Probenahme- und Analysemethoden verwendet und Verschleppungswege in andere Arbeits- bzw. Unternehmensbereiche wie Treppenhäuser, Büros, Fahrzeuginnenräume etc. analysiert. Toxikologische Untersuchungen fanden in diesem Zusanenhang jedoch nicht statt.

Toxikologie der Faserbruchstücke

Eine lang andauernde oder auch eine sehr hohe akute Exposition gegenüber Partikeln einschließlich Fasern kann zu schweren Erkrankungen der Lunge führen, wie z. B. chronisch-obstruktiver Bronchitis, Fibrosen (z. B. Silikose und Asbestose) bis hin zu bösartigen Zellveränderungen und Krebs. Diese Einstufung trägt der Tatsache Rechnung, dass alle bekannten Stäube und Fasern entzündliche Wirkungen haben können, welche im schlimmsten Fall die oben genannten Erkrankungen nach sich ziehen.

Sehr kleine Partikel, vor allem Nanopartikel, und Fasern mit kritischen Dimensionen gemäß WHO-Definition (WHO 1988) scheinen besonders risikobehaftet zu sein. Z. B. erwiesen sich „Multi-walled carbon nanotubes“ (MWCNT), die aus einer Vielzahl gerollter Schichten Graphen mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern bestehen, als stark krebserzeugend im Tierexperiment (Rittinghausen et al. 2014). Neue Werkstoffe und deren Bearbeitungsrückstände müssen daher sorgfältig im Hinblick auf gesundheitsrelevante Gefährdungen untersucht und bewertet werden.

Die Toxizität von Partikeln und Fasern wird maßgeblich durch ihre entzündlichen Eigenschaften bestimmt. Für die krebserzeugende Wirkung von GBS ohne spezifisch toxische Wirkung wird ein schwellenabhängiges Wirkprinzip angenommen: Erst oberhalb einer bestimmten chronischen Beladung von alveolären Makrophagen (Lungenfresszellen) mit Partikeln wird eine chronische Entzündung verursacht (Überladungshypothese). Bei Belastungen, die nicht zur Überladung führen, bestünde somit kein zusätzliches Tumorrisiko (Donaldson und Tran 2004). Für WHO-Fasern gilt dies nicht. So verursachen Asbestfasern schwere Erkrankungen der Lunge weit unterhalb von Konzentrationen, die zu einer Überladung von Alveolarmakrophagen führen. Entsprechend gelten weitaus strengere Grenzwerte (vgl. TRGS 521 2008). Die Toxizität von Faserfragmenten wird offenbar durch ihre Geometrie sowie die Beständigkeit gegenüber chemischen und biologischen Abbauprozessen (Biopersistzenz) bestimmt (Donaldson und Tran 2004, Donaldson et al. 2008). Daher werden Fasern mit kritischen Dimensionen generell als besonders risikobehaftet angesehen und auch neue faserförmige Stoffe gelten allgemein als verdächtig.

Fasern unterschiedlicher Geometrie und Biopersistenz, nicht faserförmige Partikel sowie Partikel mit und ohne spezifisch toxische Wirkungen müssen demnach unterschiedlich bewertet

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

werden. Eine Analyse der toxikologischen Wirkung gemischter Stäube aus der Verarbeitung von FVK, vor allem aus endlosfaserverstärktem CFK und GFK ist bislang nicht erfolgt. In Moritzer und Bünger 2019 sowie KIT-ITC 2019 wird die mechanische Zerkleinerung von FVK zu Recyclingzwecken auch im Hinblick auf die Toxikologie untersucht. Hier werden die Stäube allein durch die mechanische Krafteinwirkung freigesetzt. Fasern werden gebrochen und bekommen ggf. dadurch kritische Dimensionen im Sinne der WHO (WHO 1988). Die Stäube werden durch die Werkzeugbewegung im Bearbeitungsraum verteilt. Bei der hier betrachteten trennenden Laserbearbeitung von FVK ist der Wechselwirkungsmechanismus ein komplett anderer, so dass sich die Ergebnisse aus Moritzer und Bünger 2019 sowie KIT-ITC 2019 nicht unmittelbar übertragen lassen: Es wird lokal eng begrenzt infolge Laserstrahlungsabsorption eine sehr große thermische Energie eingebracht, die die Matrix zusammen mit der Faserverstärkungskomponente auf einer sehr kurzen Zeitskala zersetzt und durch die entstehende bzw. eine von außen applizierte Gasströmung das Material aus dem Wechselwirkungsbereich entfernt. Unter welchen Randbedingungen bzw. in welchem Ausmaß dabei WHO-Fasern entstehen, die von der Gasströmung mitgerissen und im Bearbeitungsraum verteilt werden, ist wie oben erläutert weitgehend unklar. Abgesehen davon erfolgt auch bei der in KIT-ITC 2021 betrachteten thermischen Behandlung von FVK zwecks Matrixzersetzung (Pyrolyse) die Energieeinbringung auf eine komplett andere Weise als bei der trennenden FVK-Laserbearbeitung, so dass die Übertragbarkeit der Ergebnisse in Frage zu stellen ist.

Für gesundheitliche Wirkungen von Partikeln ist die Einwanderung von Entzündungszellen in die Lunge ein zuverlässiger toxikologischer Endpunkt (Ma-Hock et al. 2009). Partikel oberhalb bestimmter Abmessungen sind im Tierversuch allerdings nicht untersuchbar, da sie nicht in die Atemwege appliziert werden können. Dies gilt auch für Carbonfasern. Es besteht demnach großer Bedarf an Untersuchungen in einem in-vitro-Test, der entzündliche Wirkungen von Partikeln und Fasern abbildet.

Geplante Untersuchungen

Wie einleitend erläutert ist das Ziel der Untersuchungen die Generierung eines vertieften Prozessverständnisses, auf dessen Basis angepasste technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen abgeleitet werden können, deren Umsetzung einen signifikanten Beitrag zur Senkung der Kurz- und Langzeitrisiken für Arbeitnehmer und Anlagenumfeld leistet.

Dem Ziel der Bewertung des Gefährdungspotenzials durch das Lasertrennen von FVK dient wesentlich 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 Toxizität der FVK-Stäube einschließlich der entstehenden Fasern und Faserfragmente wird im „Partikel-induzierten Zellmigrationstest (PICMA)“ untersucht (Westphal et al. 2015, Westphal, Monsé et al. 2019, Westphal, Rosenkranz et al. 2019). Der Test bildet an Zelllinien die Fähigkeit von Entzündungszellen nach, in die Richtung von entzündlichen Botenstoffen (Chemokinen, Zytokinen) zu wandern, die infolge der Inhalation und Deposition von Partikeln und Fasern von anderen Entzündungszellen freigesetzt werden. Partikel unterschiedlich starker Entzündungswirkung bewirken ein unterschiedliches Ausmaß dieser Zellwanderung. Die toxikologische Nullhypothese dabei lautet, dass die entstehenden Stäube schwach entzündlich sind und keine signifikanten toxischen Effekte auslösen. Dann sollten diese Stäube auch keine nennenswerten Effekte im PICMA hervorrufen. Sollten jedoch stark entzündliche Partikel oder sogar WHO-Fasern in nennenswerter Menge enthalten sein, würde dies im PICMA sichtbar.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

Zur Validierung und Korrelation erfolgen elektronenmikroskopische Analysen der entstehenden FVK-Stäube. Die Ergebnisse können im Nachgang der Ableitung von spezifischen Grenzwerten für Stäube aus der FVK-Bearbeitung dienen.

Die nachfolgend aufgelisteten Arbeitsinhalte sind vorgesehen:

- Schaffung der Voraussetzungen für die experimentellen und toxikologischen Untersuchungen und Messungen an ausgewählten Lasertrennprozessen an FVK (Abb. 2)
- Generierung von Erkenntnissen über Quellstärken bzw. Emissionsraten sowie auftretende Kontaminationen für die relevanten Arbeitsschritte im Zuge des laserbasierten Trennens von FVK im industriellen Umfeld sowie an nachgestellten Prozessen am LZH zur Schaffung einer Datenbasis für die Bewertung von Kontamination und Verschleppung
- Weitergehende Charakterisierung der während des FVK-Lasertrennens entstehenden Stäube und Bereitstellung von Staubproben mit sphärischen und faserförmigen Partikeln für die toxikologischen Untersuchungen durch das IPA
- Arbeitsmedizinisch-toxikologische Untersuchung 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)
- Generierung von Erkenntnissen über die relevanten Kontaminationswege sowie die Verschleppung (Arten / Mengen) relevanter Gefahrstoffe (Faserfragmente / sphärische Partikel) im gesamten Arbeitsumfeld (Abb. 3)
- Bereitstellung einer generellen Gefährdungsbeurteilung als Ausgangspunkt für die von Herstellern und Betreibern durchzuführenden prozessspezifischen Risiko- und Gefährdungsbeurteilungen der gemäß ProdSG 2015 bzw. GefStoffV 2017
- Demonstration technischer und organisatorischer Maßnahmen zur Verbesserung des Arbeitnehmerschutzes gegen unbeabsichtigte Gefahrstoffexposition und Kontaminationsverschleppung bis in den häuslichen Bereich
- Empfehlung und Verbreitung von Maßnahmen zur Optimierung der Arbeitsplatzgestaltung und von Arbeitsabläufen beim Lasertrennen von FVK als laserprozessspezifische Ergänzung der existierenden Maßnahmenkataloge gemäß Neumann 2018 und DGUV 2017

Abb. 3: Stationäre, tragbare Probenahmepumpe Gilian AirCon-2 für hohen Durchfluss und goldbedampfte Kernporenfilter im Monitorgehäuse für die Faserprobenahme.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

In der Anlagenumgebung erfolgen auch Strömungsgeschwindigkeitsmessungen sowie Visualisierungen der Luftströmungen mit Hilfe von Nebelgeneratoren (Abb. 4), um Rückschlüsse auf das dynamische Verhalten der Partikel und Faserfragmente nach der Freisetzung aus der Laserprozesszone ziehen zu können.

Abb. 4: Strömungsvisualisierung mittels Rauch-/Nebelgenerator.

Im Anschluss werden an ausgewählten Beispielen Aus- und Umrüstungen industrieller Arbeitsplätze bzw. Anlagen zwecks Optimierung der Produktionsbedingungen und der Arbeitsschritte von FVK-Lasertrennprozessen praktisch demonstriert. Dabei werden Anlagen im industriellen Umfeld sowie des LZH berücksichtigt.

Fazit

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, Ablufterfassungs- und Absaugeinrichtungen oder Bauteile bzw. Abschirmungen zur Unterdrückung unkontrollierter Luftströmungen beinhalten. Laborausrüster und Hersteller von Erfassungs- und Filtersystemen können schließlich auf Basis der Ergebnisse die Entwicklung neuer oder die verstärkte Vermarktung existierender Komponenten, z. B. Zusatzlüfter und Bauteile zur Luftströmungsführung für den Umgang mit laserbearbeiteten FVK-Bauteilen unter Berücksichtigung des Auftretens eines hohen Faseranteils anstoßen, um den speziellen Risiken der FVK-Laserbearbeitung entgegenzuwirken.

Dankesworte

Ein Großteil der Arbeiten wird zusammen vom Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH) und vom Institut für Prävention und Arbeitsmedizin (IPA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Institut der Ruhr-Universität Bochum, 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 Energie (BMWI) 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.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

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-holz-undmetall/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., Brodesser, 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., Hennigs, C., Brodeßer, A., Walter, J., Hustedt, M., Hermsdorf, J., 2020: „Prozess- und Komponentenentwicklung, Systemintegration sowie Lasersicherheit für das laserbasierte Rettungssystem“, Teilvorhaben des Laser Zentrums Hannover e. V. im Verbundvorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) Nr. 13N14140 „Innovatives Lasersystem zur Rettung bei komplexen Unfallszenarien“ (LaserRettung), Abschlussbericht, Hannover, Laufzeit 10/2016–04/2020, 98 Seiten.

KIT-ITC, 2019: „Carbonfasern im Kreislauf – Freisetzungsverhalten und Toxizität bei thermischer und mechanischer Behandlung (CarbonFibreCycle)“, BMBF-Verbundprojekt Nr. FK03XP0195, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie (ITC) (Koordinator), Karlsruhe, Laufzeit: 01/2019 – 12/2021.

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.

Moritzer, E., Bünger, J., 2019: „Grundlegende Untersuchungen zur Zerkleinerung von faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen im Hinblick auf die verfahrenstechnische Prozessauslegung unter Berücksichtigung von entstehenden gesundheitsgefährdenden Staubbelastungen“, AiF-IGF-Projekt Nr. 20.746 N der Universität Paderborn, Lehrstuhl für Kunststofftechnologie, und der Ruhr-Universität Bochum, IPA d. DGUV, Paderborn / Bochum, eingereicht über die DECHEMA, Laufzeit 10/2019–09/2021.

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: https://docplayer.org/106571127-Gefaehrdungen-durch-kohlenstoffverstaerkte-kunststoffe-cfk.html, abgerufen am 18.06.2021.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1

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).

Rittinghausen, S., Hackbarth, A., Creutzenberg, O., Ernst, H., Heinrich, U., Leonhardt, A., Schaudien, D., 2014: „The carcinogenic effect of various multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) after intraperitoneal injection in rats“, Particle and Fibre Toxicology 11, 2014, Artikel Nr. 59, 18 Seiten, Doi: doi.org/10.1186/s12989-014-0059-z.

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.

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].

TRGS 521, 2008: „Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 521: Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle“, Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe 2/2008.

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., 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., Griemsmann, T., Hustedt, M., Hoff, C., Hermsdorf, J., Kaierle, J., 2020: „Minimieren der Gefahren durch Kontamination und Verschleppung im Arbeitsumfeld bei der laseradditiven Verarbeitung von Metallpulvern“, Tagungsband DVS Congress 2020, Web-Konferenz, 14.–18.09.2020, DVS-Berichte Band 365, S. 183–189.

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.

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.

Copyright © 2021 and published by German Association for Laser Anemometry
GALA e.V., Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-7-1