

Untersuchungen der Partikelemissionen bei großvolumigen Laser-Ablationsvorgängen

Kristian Kujawa¹, Lutz Schneider¹, Stefan Mauersberger¹, Liliana Kotte²,
Ralf Heidenreich², Frank Gebler³, Jörg Schille¹, Udo Löschner¹

¹) Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida Deutschland

²) Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Dresden, Deutschland

³) Entstaubungsgeräte Pulsnitz GmbH, Pulsnitz, Deutschland

Kurzfassung

Die bei der Laserprozessierung freigesetzten Laserrauche bzw. Partikelemissionen zählen zu den Sekundärgefährdungen durch Laserstrahlung und können für den Personenkreis im Laserarbeitsraum als auch für die Anlagentechnik im Umfeld ein Sicherheitsrisiko darstellen. Die dazu innerhalb eines Forschungsvorhabens an ausgewählten Werkstoffen durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass Laserrauche größtenteils als alveolengängiger Ultrafeinstaub mit Partikelgrößen im Bereich 100 nm vorliegen. Mit einem neuartigen Abscheidesystem konnte ein hoher Abscheidegrad > 99,99 % erreicht und selbst große Mengen an Laserrauchen verlässlich erfasst und abgeschieden werden. So gelang es, die bzgl. Staubbelastung und Gefahrstoffe geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte auch für großvolumige Laserablationsprozesse nachweislich einzuhalten. Die Überprüfung der laserinduzierten Partikelemissionen auf Zünd- und Explosionsfähigkeit ergab ein niedriges Gefahrenpotenzial für Aluminium; die untersuchten Stahlsorten wurden als nicht explosionsfähig eingestuft.

1. Einleitung

Laserablationsprodukte entstehen in der Größenordnung von einigen Mikrometern bis zu wenigen Nanometern mit einer großen Fraktion im Bereich 100 nm, s. Abbildung 1. Damit ist ein Großteil der Partikelemissionen alveolengängig oder sie stellen in Form freigesetzter Gefahrstoffe eine echte Gefährdung für die Gesundheit der Beschäftigten am Laserarbeitsplatz dar. Die ultrafeinen Partikel können über mehrere Stunden schwebend in der Luft verbleiben bzw. werden z.B. durch das Öffnen der Maschinentür beim Werkstückwechsel wieder aufgewirbelt und können in den Atembereich gelangen.

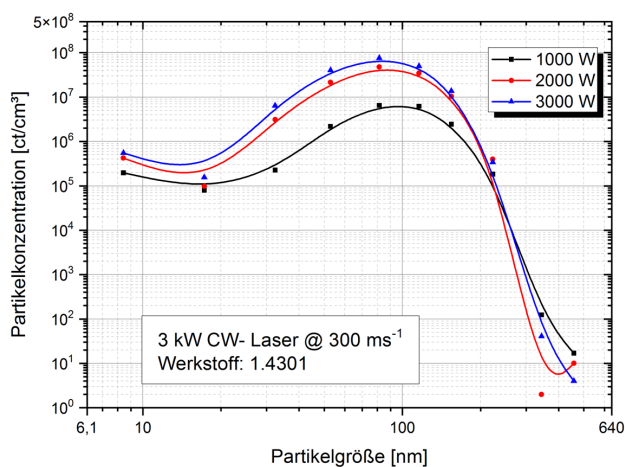


Abbildung 1: Partikelgrößenverteilung der beim Hochrate-Laserabtragen von Stahl entstandenen Laserrauche.

Als Folge können die Ablationsprodukte neben der Gesundheitsgefährdung als Sekundärgefährdung bei Laserprozessen auch teure Anlagenkomponenten kontaminieren oder sich auf die zu bearbeitende Werkstückoberfläche ablagern. Letzteres wiederum verringert die erreichbare Abtrageeffizienz und vermindert die Bearbeitungsqualität im Laserprozess. Somit stellt die vollständige Erfassung und Absaugung der Partikelemissionen bereits am Entstehungsort bis hin zur effektiven Abscheidung eine Grundvoraussetzung für den sicheren Laserbetrieb dar. Das gilt insbesondere für den Einsatz von Hochleistungslasern in der Materialbearbeitung, denn die Menge an Ablationsprodukten skaliert näherungsweise mit der eingesetzten Laserleistung, s. Abbildung 2. Für das Laserabtragen von AlMg4.5Mn mit einem brillanten cw-Laserstrahl bei 3 kW Laserleistung und 100 m/s Strahlableitgeschwindigkeit wurde beispielsweise eine sehr hohe Abtrage rate von bis zu 1,88 g/min ermittelt.

minieren oder sich auf die zu bearbeitende Werkstückoberfläche ablagern. Letzteres wiederum verringert die erreichbare Abtrageeffizienz und vermindert die Bearbeitungsqualität im Laserprozess. Somit stellt die vollständige Erfassung und Absaugung der Partikelemissionen bereits am Entstehungsort bis hin zur effektiven Abscheidung eine Grundvoraussetzung für den sicheren Laserbetrieb dar. Das gilt insbesondere für den Einsatz von Hochleistungslasern in der Materialbearbeitung, denn die Menge an Ablationsprodukten skaliert näherungsweise mit der eingesetzten Laserleistung, s. Abbildung 2. Für das Laserabtragen von AlMg4.5Mn mit einem brillanten cw-Laserstrahl bei 3 kW Laserleistung und 100 m/s Strahlableitgeschwindigkeit wurde beispielsweise eine sehr hohe Abtrage rate von bis zu 1,88 g/min ermittelt.

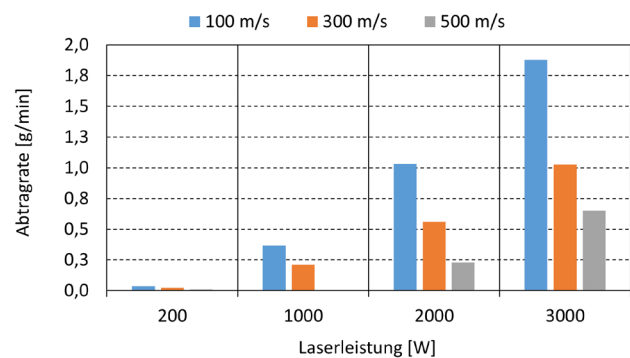


Abbildung 2: Für das Laserabtragen von AlMg4.5Mn ermittelte Abtrageraten. Es wurden ein UKP-Laser mit 200 W mittlerer Laserleistung und ein cw-Faserlaser mit bis zu 3 kW Laserleistung bei unterschiedlichen Strahlableitgeschwindigkeiten untersucht.

2. Ergebnisse

2.1 Analyse großvolumiger Partikelemissionen

Die Bestimmung von Partikelgröße und Mengenverteilung (Partikelkonzentration) der laserinduzierten Ablationsprodukte erfolgte mit einem Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer 3090 (EEPS™, TSI Inc.). Die Messsonde wurde im Absaugstrom hinter dem Erfassungselement platziert. Nahezu unbeeinflusst von der eingesetzten Hochleistungs-Laserstrahlquelle und dem angewandten Bestrahlungsregime entstanden bei den untersuchten Laserbearbeitungsprozessen hochdisperse Ablationsprodukte. Beispielhaft dafür sind in Abbildung 3 die Partikelgrößenverteilungen gezeigt, wie sie für das Hochrate-Laserabtragen von AlMg4.5Mn, Edelstahl 1.4301 oder Al₂O₃-Keramik mit einem Ultrakurzpuls-(UKP)-Laser bei 200W mittlerer Laserleistung (Abbildung 3, oben) oder mit einem cw-Faserlaser bei 3 kW Laserleistung (Abbildung 3, unten) erfasst wurden.

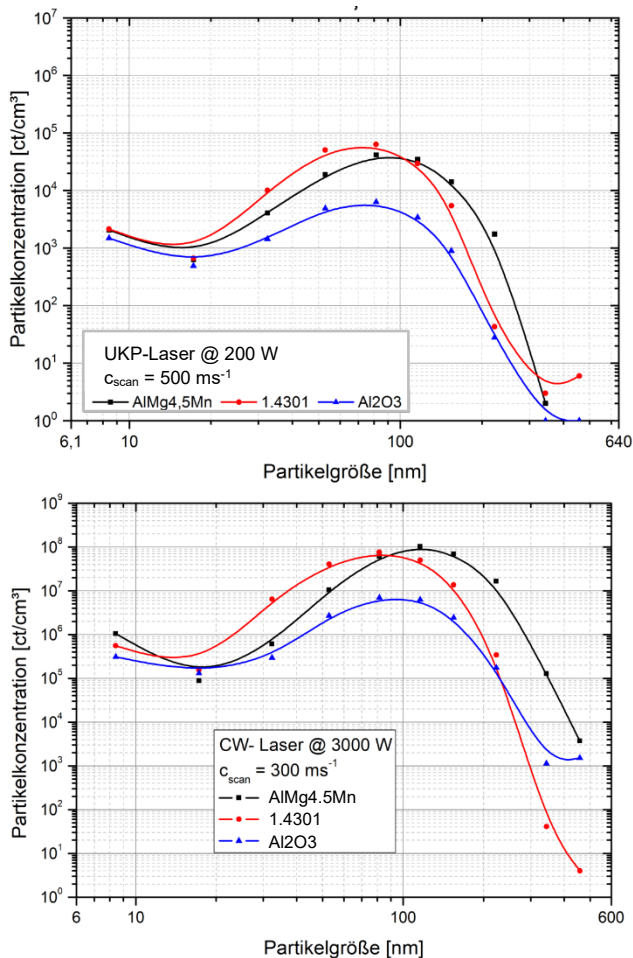


Abbildung 3: Ermittelte Partikelgrößenverteilung für das Laserabtragen von AlMg4.5Mn, Edelstahl 1.4301 und Al₂O₃-Keramik mit einem UKP-Laser mit 200 W mittlerer Laserleistung (oben) und einem cw-Faserlaser mit 3 kW Laserleistung (unten) bei unterschiedlichen Strahlablengeschwindigkeiten untersucht.

Die Analyse der entstandenen Partikelemissionen ergab typische Partikelgrößen zwischen 25 nm und 200 nm, wobei ein Großteil der Ablationsprodukte im Bereich zwischen 70 nm und 110 nm zu finden ist, s. Tabelle 1.

Weiterhin zeigt sich, dass sich die Partikelgrößenverteilung nur unwesentlich in Abhängigkeit des Betriebsregimes (cw- oder UKP-Laserbearbeitung), der eingesetzten Laserleistung oder des bearbeiteten Materials ändert. Die Menge an rückständig auf der Probe verbliebenen größeren Partikel waren bezogen auf das Gesamtgewicht des Laserabtrages nahezu vernachlässigbar.

Tabelle 1: Überblick über die im Laserrauch enthaltenen Partikelgrößen mit maximaler Partikelkonzentration.

Partikelgröße mit höchster Partikelkonzentration	UKP-Laser P _{av} = 200 W	cw-Laser P _{cw} = 3000 W
AlMg4.5Mn	100 nm	110 nm
1.4301	70 nm	80 nm
Al ₂ O ₃ Keramik	80 nm	100 nm

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass der entstandene Laserrauch fast vollständig als Ultrafeinstaub vorliegt und damit als alveolengängige A-Staubfraktion eine Gefährdung für die Atemwege darstellt. Im Vergleich mit klassischen Laserbearbeitungsverfahren wie dem Laserstrahlschneiden, Laserbeschriften oder Laserschweißen fällt auf, dass sich die mit modernen Laserstrahlquellen (UKP-Laser bzw. brillanter cw-Faserlaser) in Lasermikrobearbeitungsprozessen erzeugten Partikelemissionen nur geringfügig hinsichtlich Partikelgrößenverteilung und Partikelgröße unterscheiden [1]. Allerdings ist perspektivisch zu erwarten, dass mit der ständigen Weiterentwicklung der Laserstrahlquellen hin zu immer höheren Ausgangsleistungen [2] auch die Abtragraten und folglich auch die Menge an Partikelemissionen ansteigen. Liegen die Gesamtstaubemissionen für die klassische Laserbearbeitung von Stahlwerkstoffen typischerweise im Bereich von unter 1g/min beim Laserbeschriften und Laserstrahlschweißen bis zu 10 g/min beim Laserstrahltrennen [1], so werden diese Emissionsraten zukünftig auch in modernen Lasermikrobearbeitungsverfahren schnell erreicht bzw. übertroffen. Dies ist insbesondere für cw-Laserbearbeitungsprozesse zu erwarten, wie Tabelle 2 aufzeigt.

Tabelle 2: Zusammenstellung der innerhalb der Projektuntersuchungen mit einem UKP-Laser und einem brillanten cw-Faserlaser erreichten Abtragraten.

Erreichte Abtragraten	UKP-Laser P _{av} = 200 W	cw-Laser P _{cw} = 3000 W
AlMg4.5Mn	0,04 g/min	1,88 g/min
1.4301	0,07 g/min	1,25 g/min

Folglich ergibt sich allein schon aus den innerhalb der Projektuntersuchungen ermittelten hohen Abtragraten die Forderung nach einer geeigneten Erfassungs- und Abscheidelösung, um den Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) für A-Staub in Höhe von 1,25 mg/m³ sicher einzuhalten. Um dies zu unterstreichen gibt die nachfolgende einfache Abschätzung über die beim Hochrate-Laserabtragen durch die Partikelemissionen entstehende Gefährdungslage weiteren Aufschluss. In Abbildung 4 sind die

in einem Bearbeitungsraum der Größe 1 m^3 unter Annahme einer Abtragrates von $1,9 \text{ g/min}$ und eines Absaugstromes von $500 \text{ m}^3/\text{h}$ die je nach Erfassungs- und Abscheidegrad vorherrschenden Feinstaubkonzentrationen gezeigt. Bei der Laserbearbeitung ohne Absaugung wird der für A-Staub zulässige Grenzwert bereits nach einer sehr kurzen Zeit (40 ms) erreicht und auch für Absaugsysteme mit einem Erfassungsgrad von 95% mit $0,85 \text{ s}$ bzw. 99% mit 6 s ist die Zeit bis zum Überschreiten des AGW im Laserarbeitsbereich sehr kurz. Erst mit einem höheren Erfassungsgrad können die AGWs auch über einen längeren Zeitraum verlässlich eingehalten werden, wie Abbildung 4 beispielhaft für einen Erfassungsgrad von $99,9\%$ abbildet. Die ermittelten Zeiten gelten jedoch nur für die aus einer von A-Staub ausgehenden Gefährdung. Oftmals liegen neben dem Laserrauch allgemein auch einzelne Legierungselemente bzw. deren Reaktionsprodukte als echte Gefahrstoffe vor. Zum Beispiel entstehen bei der Laserbearbeitung von Edelstahl höhere Konzentrationen von sechswertigen Chromverbindungen (Cr-VI), die ätzend und toxisch auf die Haut und als krebserzeugender Stoff schädigend auf die Atmungsorgane wirken. Zum Schutz vor diesen Gesundheitsgefährdungen sind die in den *Technischen Regeln für Gefahrstoffe* (TRGS) veröffentlichten deutlich kleineren Grenzwerte einzuhalten, was entsprechend sehr hohe Anforderungen an das verlässliche Erfassen und Abscheiden von laserinduzierten Partikelemissionen stellt.

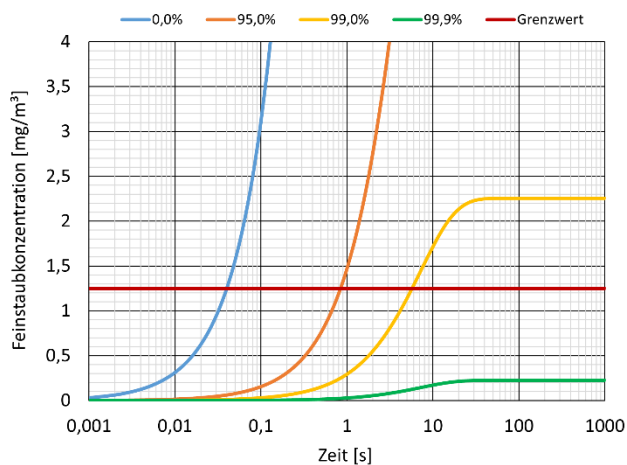


Abbildung 4: Abschätzung der bei unterschiedlichem Absauggrad entstehenden Feinstaubkonzentrationen mit: 1 m^3 Bearbeitungsraum, $500 \text{ m}^3/\text{h}$ Absaugstrom und $1,9 \text{ g/min}$ Abtragrates; der AGW ist mit einer roten Linie gekennzeichnet.

Des Weiteren zeigte sich in den Untersuchungen, dass der im Laserprozess freigesetzte Ultrafeinstaub über eine längere Zeit schwebend im Bearbeitungsbereich verbleibt und so auch nach der eigentlichen Laserbearbeitung eine Gefahr für die Anlagenbediener darstellt. In Abbildung 5 ist dazu der zeitliche Verlauf der Partikelemissionen gezeigt, der mit eines eigens dazu entwickelten Sensorprototyp „DUSTY“ aufgenommen wurde. Beim Laserabtragen mit dem brillanten cw-Faserlaser war innerhalb der ersten 3 Sekunden (Abbildung 5, grün markierte Bereiche) nach Bearbeitungsstart eine so hohe

Partikelkonzentration in der Laserbearbeitungskammer entstanden, dass der Sensor bereits seine Sättigung erreicht hatte. Nach Ende der Laserbearbeitung dauerte es trotz nachlaufender Absaugung etwa 15 Sekunden, bis eine Partikelkonzentration gleich dem Niveau vor der Laserbearbeitung erreicht wurde (Abbildung 5, rot markierter Bereich).

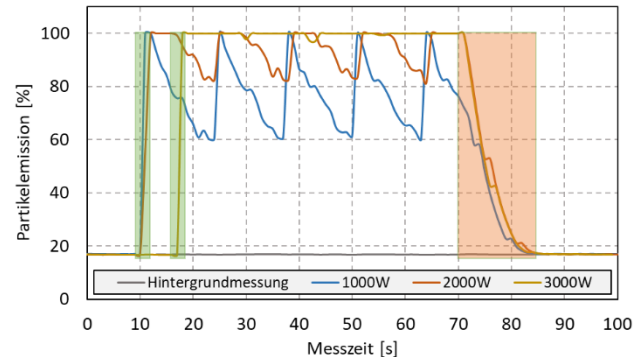


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Partikelkonzentration gemessen mit dem Sensorprototyp „DUSTY“.

2.2 Konzeption, Auslegung und Charakterisierung einer Flowbox als Erfassungselement

Eine erste Analyse des Absaugverhaltens eines am LHM weitläufig eingesetzten Standard-Erfassungselements (Abbildung 6, oben) ergab, dass die Saugwirkung zur Aufnahme der laserinduzierten Partikelemissionen exponentiell mit zunehmendem Abstand zum Erfassungselement abnimmt.

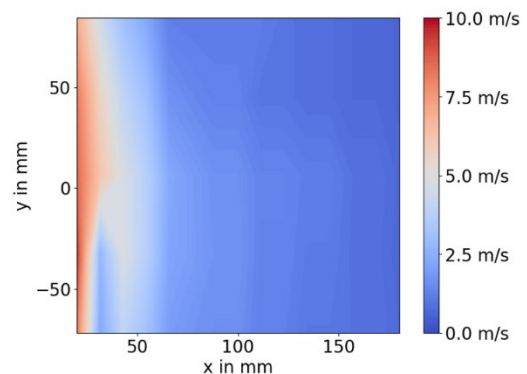
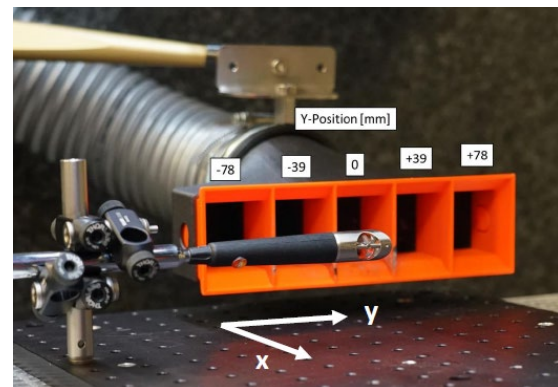


Abbildung 6 Standard-Erfassungselement mit Flügelradsonde (oben) sowie innerhalb eines Arbeitsbereiches von $200 \times 200 \text{ mm}^2$ mit einem Volumenstrom $400 \text{ m}^3/\text{h}$ aufgenommene Strömungsgeschwindigkeiten (unten).

Beispielhaft dafür ist in Abbildung 6 (unten) eine Übersicht über die mit einer Flügelradsonde an verschiedenen Messpositionen im Laserbearbeitungsfeld aufgenommenen Strömungsgeschwindigkeiten zu sehen. Für den betrachteten Volumenstrom von $400 \text{ m}^3/\text{h}$ wird deutlich, dass die Saugwirkung ab einem Abstand von 100 mm nahezu komplett einbricht. Das wiederum führt im Bearbeitungsbereich zu einem völlig unzureichenden Absaugverhalten und hat eine erhöhte Partikelbelastung der Atemluft sowie die Kontamination von Werkstück und technischer Ausstattung mit den Laserabtragprodukten zur Folge.

In Strömungssimulationen mit einem Volumenstrom von $400 \text{ m}^3/\text{h}$ konnte die mit zunehmenden Abstand stark nachlassende Absaugwirkung sowohl für das Standard-Erfassungselement als auch für ein weitläufig genutztes Absaugrohr mit 60 mm Durchmesser verifiziert werden, siehe Abbildung 7.

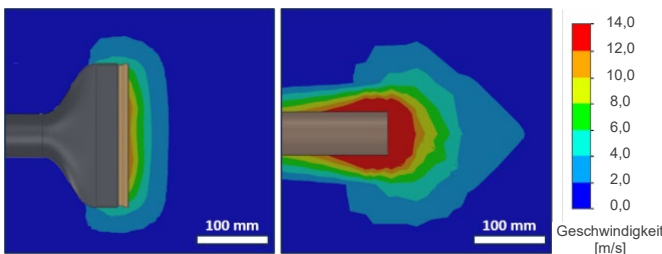


Abbildung 7: Strömungssimulation für ein Standard-Erfassungselement (links) und ein 60 mm Absaugrohr (rechts) bei $400 \text{ m}^3/\text{h}$ Volumenstrom.

Um auch größere Arbeitsbereiche abzudecken hat sich in den Strömungssimulationen ein geschlossenes Absaugsystem als eine wesentlich geeignetere Alternative herausgestellt. Innerhalb dieser nachfolgend als Flowbox bezeichneten Kammer ist ein gleichmäßiges Strömungsprofil über einen großen Arbeitsbereich bereitgestellt, s. Abbildung 8 (oben), was für den betrachteten Volumenstrom von $400 \text{ m}^3/\text{h}$ entsprechend einen hohen Absauggrad auch für größere Scanfelder mit Abmessungen bis zu $300 \times 300 \text{ mm}^2$ erwarten lässt. Basierend auf den Ergebnissen der Simulationsrechnung erfolgte innerhalb eines ersten Ansatzes die Konzeption und der Aufbau einer Flowbox (Generation 1), s. Abbildung 8 (Mitte). Die gleichmäßigen Strömungsbedingungen im Innenraum der Flowbox konnten an 15 Messpunkten mit äquidistanten Abständen nachgewiesen werden. Für einen Volumenstrom von $400 \text{ m}^3/\text{h}$ betrug die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Flowbox $1,5 \text{ m/s}$ und war im Arbeitsfeld nahezu frei von Turbulenzen.

Trotz der gleichmäßigen Strömungsverhältnisse bei einer verhältnismäßig hohen Strömungsgeschwindigkeit von $1,5 \text{ m/s}$ war das Erfassungs- und Absaugverhalten der Flowbox im Laserprozess unbefriedigend. Die Fokussieroptik verschmutzte zunehmend und musste spätestens nach je 1 Stunde gereinigt werden; zudem waren starke Partikelablagerungen an den Seitenwänden und am Deckel der Flowbox sowie auch im Bearbeitungsfeld zu finden.

Durch die systematische Weiterentwicklung der Flowbox in verschiedenen Ausbaustufen hin zu einem halboffenen System gelang es zunächst, die Verschmutzung der Fokussieroptik durch Partikelablagerungen zu vermeiden. Zusätzlich wurde auf Grundlage von Simulationsergebnissen die Kammerhöhe reduziert, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Flowbox deutlich erhöht werden konnte. Allerdings trugen die innerhalb der 3. Generation der Flowbox durchgeführten Anpassungen nicht dazu bei, die Partikelablagerungen im Arbeitsfeld zu verhindern.

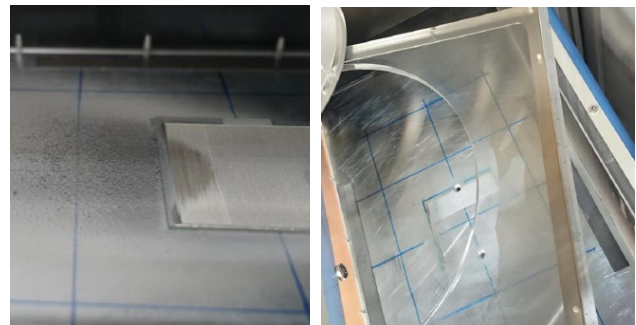
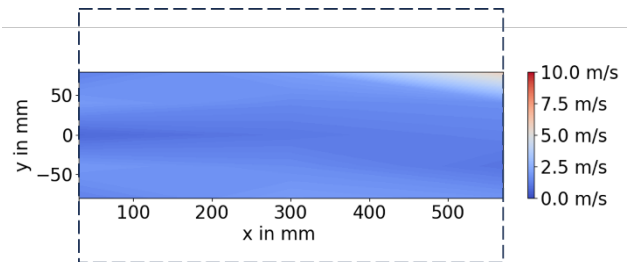
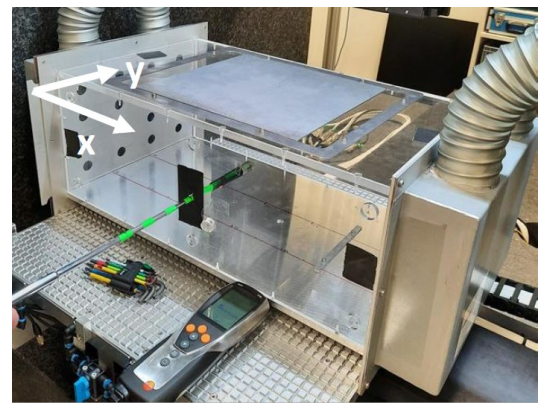
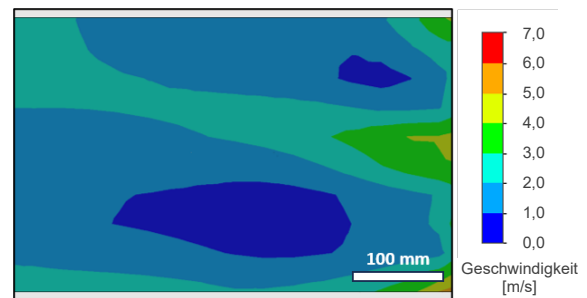


Abbildung 8, oben: Strömungssimulation für die Flowbox bei $400 \text{ m}^3/\text{h}$ Volumenstrom, Mitte: Flowbox (1. Generation) mit Durchflusssensor, Mitte: innerhalb der Flowbox mit einem Durchflusssensor aufgenommenes Strömungsprofil; unten Partikelablagerungen im Arbeitsfeld (links) und Verschmutzung von Flowbox-Deckel und Seitenwand (rechts).

Weitere Optimierungen bzgl. des Flowbox-Designs waren ein in Probenrichtung offen gestaltetes Erfassungselement sowie das Entfernen von scharfkantigen Übergängen, Ecken oder Querschnittsänderungen. Dadurch ergaben sich Verbesserungen hinsichtlich der Luftführung, z.B. dass der Luftstrom die Partikel in Richtung Absaugung trägt oder Wirbelbildungen unterdrückt werden. Dies wiederum wirkte sich vorteilhaft auf den Transport der Partikel innerhalb der Flowbox und anschließend auf deren Erfassung aus. Weiterhin wurde die Vorzugsrichtung des Luftstroms entlang der Partikelausbreitung entgegengesetzt zur Schwerkraft ausgerichtet, was das Ablagern von Ablationsprodukten im Scanbereich signifikant reduzierte. Mit der entwickelten Flowbox 7. Generation traten die geringsten Partikelablagerungen im Arbeitsfeld auf, s. Abbildung 9. Selbst nach 60 Minuten Bearbeitungszeit war das Scanfeld nahezu komplett frei von abgetragenen Partikeln; Verschmutzungen wurden lediglich im Bereich der Ansaugöffnungen festgestellt, s. Abbildung 9 unten rechts.

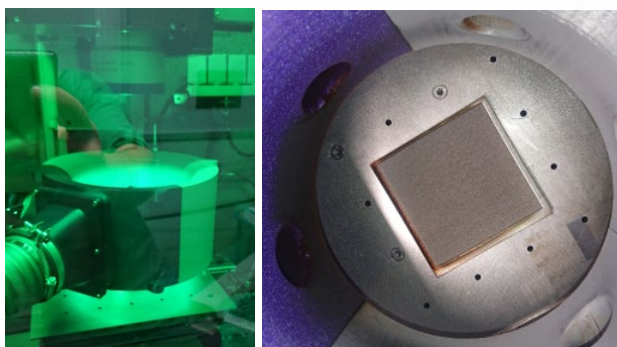
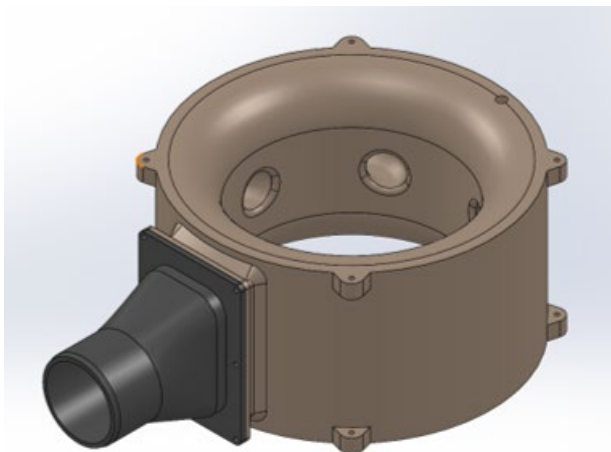


Abbildung 9: Flowbox 7. Generation. oben: CAD-Modell; unten links: Flowbox im Laserprozess; unten rechts: Blick auf das Bearbeitungsfeld.

2.3 Erfassung und Abscheidung von großvolumigen Partikelemissionen

Die entwickelte Flowbox wurde in Verbindung mit einem Prototyp eines neuartigen Abscheidegeräts zur Erfassung und Abscheidung von im Hochnrate-Laserprozess entstehenden großvolumigen Partikelemissionen eingesetzt. Das Abscheidesystem arbeitete dabei in geschlossener Betriebsweise ohne Luftabfuhr nach außen. Für die Bewertung der Wirksamkeit des Abscheidesystems

wurden die im Rohgas (vom Erfassungselement aufgenommener partikellastiger Luftstrom) und im Reingas (gereinigter Luftstrom nach dem Abscheidesystem) enthaltenen Partikelkonzentration verglichen. Die Bewertung der im Roh- und Reingas befindlichen Partikel erfolgte mit einem Messsystem der Cambustion Ltd. Dabei wurde ein Aerodynamic Aerosol Classifier (AAC) mit einem Kondensationskernzähler (CPC) kombiniert (Abbildung 10). Dadurch konnten die Partikel auch im Nanobereich klassiert und präzise gezählt werden. Der für die Rohgasmessungen eingesetzte EEPS™ ist nicht für so geringe Konzentrationen, wie im Reingas zu detektieren sind, geeignet. Zusätzlich wurden Messungen zu den Staubinhaltsstoffen durchgeführt, um stoffspezifische Abscheidegrade für die Gefahrstoffe zu ermitteln.



Abbildung 10: Messaufbau zur Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades am Abscheidesystem.

Das neue Abscheidesystem zeichnete sich durch einen hohen Abscheidegrad für die Gesamtstaubbelastung und für die Einzelstoffe aus, s. Abbildung 11. Daraus geht hervor, dass sowohl die sogenannten Rohgaskonzentrationen als auch die Abscheidegrade elementspezifisch stark variieren. In Abbildung 11 (unten) wird auch deutlich, dass die für Feinstaub bzw. Gefahrstoffe geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte bzw. Toleranzkonzentrationen eingehalten wurden. Somit stellt das neue Abscheidekonzept auch für großvolumige Laserablationen eine wirksame technische Schutzmaßnahme zum Schutz vor Gefährdungen durch laserinduzierten Partikelemissionen dar. Gemäß Gefahrstoffverordnung hat der Arbeitgeber, z.B. durch Arbeitsplatzmessungen oder andere geeignete Methoden, sicherzustellen, dass die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten und die verwendeten technischen Schutzmaßnahmen regelmäßig überprüft werden.

2.4 Untersuchungen zur Brand- und Explosionsfähigkeit lasergenerierter Feinstäube

Innerhalb der Gefährdungsbeurteilung sind die vom Laserprozess für die Beschäftigten am Laserarbeitsplatz ausgehenden Brand- und Explosionsgefahren als Gefährdungsfaktoren zu bewerten. Das erfordert beispielsweise auch die Überprüfung und Beurteilung der Brand-

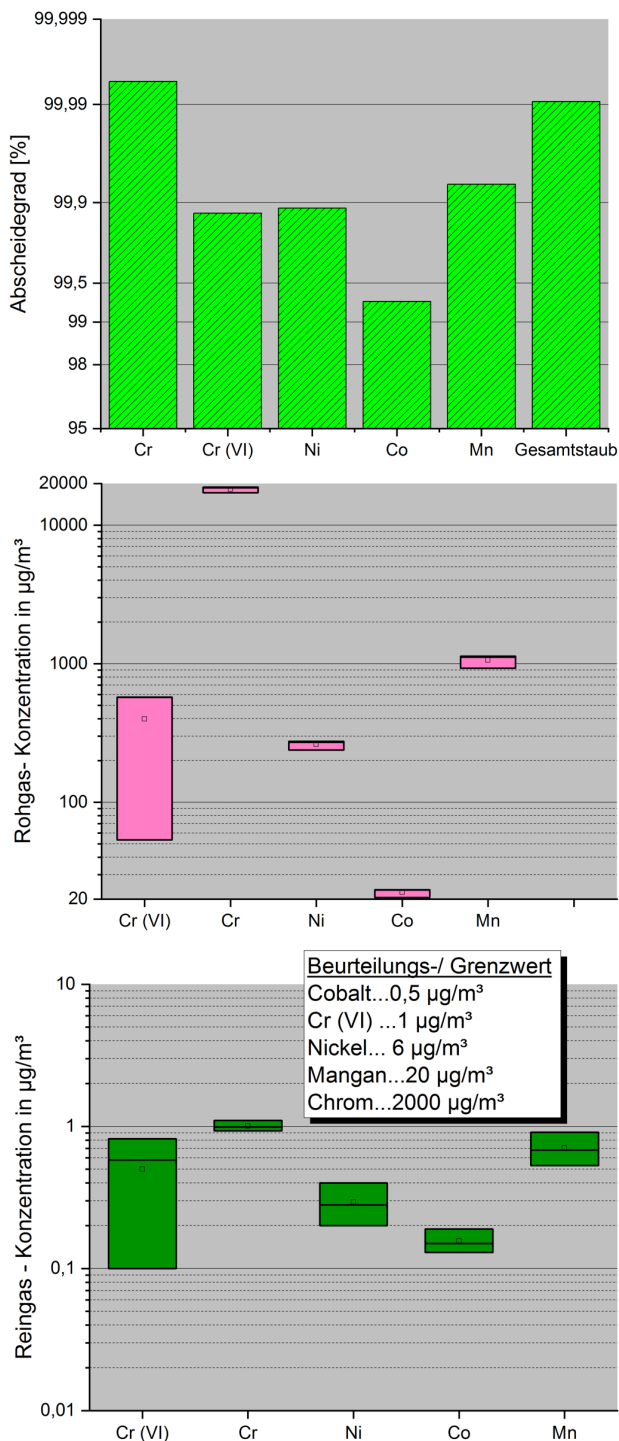


Abbildung 11 oben: Stoffspezifischer Abscheidegrad für die beim Laserabtragen von Edelstahl 1.4301 entstandenen Laserrauche sowie die im Rohgas (Mitte) und Reingas (unten) gemessenen Partikelkonzentrationen. Die AGW sind aus [3] und die Toleranzkonzentrationen aus [4] entnommen.

und Explosionsfähigkeit des beim Laserabtragen entstehenden Laserstaub-Luft-Gemisches. Allerdings ist oftmals der Wissensstand über die durch Laserstaub potentiell bestehenden Brand- und Explosionsgefährdungen eher gering und das diesbezüglich Aktivitätsniveau zur Verbesserung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes unverhältnismäßig. Um hier Abhilfe zu schaffen wurden im Forschungsvorhaben verschiedene, für das Laserabtragen repräsentativ hergestellte Feinstaubfraktionen hergestellt.

Das Staub/Luft-Gemisch aus den untersuchten Edelstahl-Feinstaub-Fraktionen konnte innerhalb der Prüfung auf Explosionsfähigkeit nicht gezündet werden. Somit lassen sich die beim Laserabtragen von 1.4301 Edelstahl entstehenden Ablationsprodukte als nicht explosionsfähig einstufen. Das aus einer Fraktion AlMg4.5Mn-Laserstaub hergestellte Staub/Luft-Gemisch hingegen stellte sich als explosionsfähig heraus, wobei die hohe Mindestzündenergie $MZE > 1 \text{ kJ}$ auf ein relativ niedriges Gefahrenpotenzial der Staubezündung durch elektrostatische Entladung hinweist. Folgende weitere explosionstechnische Kenngrößen wurden für den AlMg4.5Mn-Laserstaub ermittelt: Druckanstiegsgeschwindigkeit $dp/dt = 84 \text{ bar/s}$, Explosionsüberdruck $p_{ex} = 5,7 \text{ bar}$ sowie die staubspezifische Kenngröße $K_{st} = 23 \text{ bar m/s}$. Aus letzterem Wert lässt sich die Staubezündungskategorie 1 ableiten, deren obere Grenze auf 200 bar m/s festgelegt ist.

Im Rahmen der Überprüfung der Brennbarkeit konnte keine hergestellte Staubfraktion entzündet oder angebrannt werden und sie lassen sich entsprechend mit der Brennzahl BZ1 klassifizieren.

3. Handlungsempfehlungen

Für einen sicheren Laseranlagenbetrieb bei großvolumigen Laserablationen können aus den vorgestellten Erkenntnissen bezüglich Absaugstrategie, Partikelhandling und allgemeine Arbeitssicherheit folgende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden:

1. Unabhängig von Material, Bearbeitungsregime und Laserart gehören die Laserrauche (mittlere Partikelgröße $\approx 0,1 \mu\text{m}$) zur alveolengängigen A-Staubfraktion und müssen mit für diese Partikelgröße geeigneter Filtertechnik abgeschieden und fachmännisch entsorgt werden. Für Ultrafeinstaub gelten besondere Handlungsempfehlungen der Berufsgenossenschaften [5].
2. Das Abscheideverhalten der Filtertechnik ist elementspezifisch, so dass selbst bei einem ermittelten hohen Abscheidegrad für den Gesamtlaserrauch nicht garantiert ist, dass auch die Arbeitsplatzgrenzwerte für einzelne Elemente/Fraktionen im Laserrauch eingehalten werden. Nur die Durchführung einer gesonderten Messung gibt hier vollständigen Aufschluss und Sicherheit bezüglich der im Laserprozess freiwerdenden Partikel und des anlagenspezifischen Abscheideverhaltens.
3. Die Absaugung der im Laserprozess freiwerdenden Ablationsprodukte muss möglichst nahe am Werkstück erfolgen, damit eine vollständige Erfassung der Partikelemissionen im Arbeitsraum gewährleistet werden kann. Insbesondere bei größeren Arbeitsbereichen ($> 100 \text{ mm}$) ist eine individuelle Anpassung des Erfassungselementes an das entsprechende Werkstück bzw. die entsprechende Prozessgeometrie sinnvoll bzw. notwendig. Der Volumenstrom der Absaugung muss außerdem ausreichend groß dimensioniert werden.
4. Da vollständig geschlossene Prozesskammern (vgl.

Flowbox 1. Generation) zu nicht akzeptablen Verschmutzungen der Optiken und Werkstücke selbst führen, sind (halb-)offene Absaugsysteme empfohlen. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass Anteile der Partikelemissionen nicht von der Prozessabsaugung erfasst werden und in den Maschinenraum gelangen. Diese Partikel können zum einen empfindliche Maschinenkomponenten, insbesondere Optiken und optische Messsysteme verschmutzen und zum anderen eine Gesundheitsgefahr für Anlagenbediener darstellen. Aus diesem Grund sollte neben der primären Prozessabsaugung zusätzlich eine sekundäre Maschinenraumabsaugung erfolgen.

5. Nach Beendigung des Laserprozesses muss eine angemessene Nachlaufzeit der Absaugung eingehalten werden, um rückständige im Maschinenraum befindliche Partikel abzusaugen. Eine zusätzliche Überwachung der Partikelkonzentration durch einen geeigneten Sensor (vgl. „Dusty“) sowie einer automatisierten Türfreigabe/-verriegelung ist aus Sicht der Arbeitssicherheit zielführend.

6. Verwirbelungen bzw. Turbulenzen innerhalb des Luftstroms im Bereich der Bearbeitungszone sollten möglichst vermieden werden. Durch die Wirbel können Partikel aus der primären Absaugzone herausgetragen werden, sodass sie nicht von der Prozessabsaugung erfasst werden und in den Maschinenraum gelangen. Ursachen für Verwirbelungen bzw. Turbulenzen sind „scharfe“ Ecken und Kanten im Bereich des Absaugstromes und insbesondere Crossjets, die sehr häufig zum Schutz des Fokussierobjektivs vor Verschmutzungen eingesetzt werden. Auf den Einsatz von Crossjets sollte daher, wenn möglich, verzichtet werden.

7. Die untersuchten Laserstäube von 1.4301 waren nicht zündfähig; die Ablationsprodukte von AlMg4.5Mn wiesen ein relativ niedriges Gefahrenpotenzial der Staubentzündung auf. Die Metallstäube oxidierten bereits während der Laserprozessierung vollständig, was deren Zündfähigkeit herabsetzte. Insbesondere bei Laserprozessen, die unter Schutzgas-Atmosphäre stattfinden, kann diese Oxidation nicht erfolgen, sodass diese Ablationsprodukte sehr wahrscheinlich zündfähig bzw. explosionsfähig sind. In diesem Fall sind geeignete Explosionsschutzmaßnahmen (Bemehlung der Absaugung, spezielle explosionsgeschützte Filter und Abscheidevorrichtung etc.) einzuhalten.

8. Sekundärgefährdungen in Laserprozessen, zu denen die laserinduzierten Partikelemissionen aber auch die davon ausgehende Brand- und Explosionsgefahr zählen, sind Bestandteil der Gesamtgefährdungsbeurteilung, die in Verantwortung des Betreibers liegt und vor Inbetriebnahme der Lasereinrichtung schriftlich erstellt werden muss. In den meisten Fällen liegen für die zu bear-

beitenden Materialien und eingesetzten Laserprozessparameter nur unzureichende Erkenntnisse vor. Die dann notwendige Informationsermittlung muss in fachkundigen Messungen und Prüfungen erfolgen. Entsprechende Dienstleistungsangebote werden von den Autoren bereitgestellt.

4. Zusammenfassung

Die bei Laserbearbeitungsprozessen freigesetzten Laserrauhe bzw. Partikelemissionen entstehen zum Großteil als alveolengängiger A-Staub und stellen somit eine gesundheitliche Gefahr für die Beschäftigten am Laserarbeitsplatz dar. In dieser Arbeit wurde ein neuartiges Erfassungs- und Abscheidekonzept vorgestellt, mit dem es nachweislich gelang, auch für großvolumige Laserablationen die bzgl. Feinstaub und Gefahrstoffe geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte einzuhalten. Eine grundlegende Charakterisierung der unter Hochrate-Laserbedingungen ergab für die freigesetzten Laserrauhe Partikelgrößen im Bereich 100 nm. Die Partikelgrößenverteilung war nahezu unbeeinflusst vom Laserregime (UKP- bzw. cw-Laser) und Material (AlMg4.5Mn, 1.4301, Al₂O₃-Keramik). Unter Einsatz eines neuartigen Abscheidesystems konnte ein Gesamtabscheidungsgrad von > 99,99 % erreicht werden, was die gesetzlich verankerten Arbeitsplatzgrenzwerte bzw. Toleranzkonzentrationen einhalten lässt. Der Abscheidungsgrad zeigte sich dabei stark elementabhängig und variierte für die im Absaugstrom detektierten Edelstahl-Legierungselemente zwischen 99,3 % und 99,92 %.

Die Überprüfung der von den Partikelablagerungen ausgehenden Brand- und Explosionsgefahr ergab lediglich für AlMg4.5Mn-Laserstaub ein relativ niedriges Gefahrenpotenzial der Staubentzündung. Das Brennverhalten der untersuchten Stäube ließ sich mit der Brennzahl BZ1 einstufen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Projekts „Absaug- und Abscheideeinrichtung für großvolumige Laser- Ablationsvorgänge - AAFLA“ mit der Fördernummer KK5002702CM0.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Kontaktdaten

Dr. Jörg Schille | schille@hs-mittweida.de

Literaturverzeichnis

- [1] VDI Handbuchreihe: Laser in der Materialbearbeitung Band 8 - Sicherheitstechnische und medizinische Aspekte bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung (1998). VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien. ISBN: 3-00-002234-1.
- [2] Jörg Schille, Udo Löschner (2021): Ultrashort pulse lasers in high-rate laser micro processing–Quo vadis? in: *Adv. Opt. Techn.*, 2021, 10(4-5), 233–237.
- [3] TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte (Fassung vom 02.07.2021).
- [4] TRGS 910 Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen (Fassung vom 01.07.2022).
- [5] <https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/nanopartikel-am-arbeitsplatz/beurteilung-von-schutzmassnahmen/index.jsp> [25.10.2023].