

Metalstaubbelastung und Kontaminationsrisiken in der additiven Fertigung: Ein Vergleich zwischen PBF-EB/M und PBF-LB/M

Julia Förster^{1,*}, Patricia Ernestine Albanese¹, Georg Schlick^{1,*}

1 Fraunhofer Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik, Augsburg,
Deutschland

* Korrespondierende Autoren

https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2025_001

Zusammenfassung Die Technologie des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Elektronenstrahl (PBF-EB/M) besitzt ein hohes Potenzial im Bereich der additiven Fertigung. Durch spezifische Unterschiede im Prozess und der Prozesskette sind bestehende Erkenntnisse im Bereich der Arbeitssicherheit des verwandten, pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) nicht direkt übertragbar. Auf Basis von experimentellen Untersuchungen zur Belastung der Arbeitenden durch Metallstaub sowie durch kontaminierte Flächen werden verschiedene risikobehaftete Bereiche der Prozesskette des PBF-EB/M und PBF-LB/M evaluiert. Es wurden sowohl ortsfesten als auch personenbezogene Staubmessungen durchgeführt. Mittels Wischproben wurden Rückstände von Metallpulver an Oberflächen entlang der Prozessketten überprüft. Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen werden Empfehlungen hinsichtlich des Arbeitsschutzes abgeleitet.

Abstract The technology of powder bed-based melting of metals using electron beams (PBF-EB/M) has great potential in the field of additive manufacturing. Due to specific differences in the process and the process chain, existing findings in the area of occupational safety of the related powder bed-based melting of metals using laser beams (PBF-LB/M) cannot be transferred directly. Various high-risk areas of the PBF-EB/M and PBF-LB/M process chain are evaluated based on experimental studies on worker exposure to metal dust and contaminated surfaces. Both stationary and personal dust measurements were carried out. Wipe samples were used to check for metal powder residues on surfaces along the process chains. Recommendations regarding occupational health and safety were derived from the findings of the investigations.

1 Einleitung

Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Elektronenstrahl (engl. Powder Bed Fusion of Metals using an Electron Beam, PBF-EB/M nach DIN EN ISO 52900 [N1]), auch als Elektronenstrahl-Schmelzen (engl. Electron Beam Melting) bezeichnet, ist aufgrund seiner hohen Gestaltungsfreiheit bei der Bauteilherstellung für zahlreiche industrielle Anwendungen von großem Interesse. Allerdings sind Risiken und notwendige Maßnahmen zur personenbezogenen Arbeitssicherheit bislang in der Betrachtung des Verfahrens oft vernachlässigt. Insbesondere birgt die Verwendung von Metallpulver – beispielsweise durch Inhalation oder Brand- und Explosionsrisiken – erhebliche Gefahren. Aufgrund der Verwendung von metallischem Pulver zur Herstellung von Bauteilen durch das Schmelzen ergibt sich die Nähe zum verwandten Verfahren des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen mittels Laserstrahl (engl. Powder Bed Fusion of Metals using a Laser Beam, PBF-LB/M nach DIN EN ISO 52900 [N1]). Durch die bisherige weiter verbreitete Anwendung des PBF-LB/M im Vergleich zum PBF-EB/M können dessen bestehenden Empfehlungen zur Anwendersicherheit aus der VDI 3405 [N2] als Orientierungshilfe dienen. Allerdings bleibt dafür zu klären, inwieweit diese Richtlinie den verfahrensbezogenen Besonderheiten des PBF-EB/M gerecht wird, die sich z. B. aus werkstoff- oder prozessspezifischen Unterschieden wie der verwendeten Partikelgrößenverteilung des Metallpulvers oder der Notwendigkeit des Freistrahlers ergeben. Ziel dieses Beitrags ist es gezielte Handlungsempfehlungen zur Arbeitssicherheit im PBF-EB/M durch den Vergleich zum PBF-LB/M abzuleiten. Basierend auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zum PBF-LB/M und PBF-EB/M gehen besondere Gefährdungen entlang der PBF-EB/M-Prozesskette bei der Pulverhandhabung von der (Pulver-)Staubexposition und der Pulververschleppung aus. Zur Analyse werden kritische Arbeitsschritte und Tätigkeiten identifiziert und diese anhand von experimentellen Untersuchungen erfasst und bewertet.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden wissenschaftliche Untersuchungen zu personenbezogenen Gefährdungen beim PBF-EB/M und PBF-LB/M aufgezeigt und vergleichend diskutiert. Eine zentrale Gefahrenquelle beider Verfahren geht von dem verwendeten Metallpulver aus. Graff et al. [Z1] zeigen, dass entlang der PBF-LB/M-Prozesskette eine Vielzahl metallischer Fein- und Feinstpartikel (Partikelgröße < 9 µm) freigesetzt werden, die unbeabsichtigt oral, dermal oder inhalativ in den menschlichen Körper gelangen können. Wissenschaftliche Untersuchungen [Z1–5, N3] benennen in der Arbeitsumgebung des PBF-LB/M das Auftreten von einatembarem Staub (E-Staub) sowie alveolengängigem Staub (A-Staub) und deren potenzielle Gefährdungen. Gemäß DIN EN 482 [N4] wird

- **einatembarer Staub** als der Massenanteil aller im Atembereich vorhandenen Partikel definiert, die durch Mund und Nase eingeatmet werden können,
- **alveolengängiger Staub** als jener Anteil des einatembaren Staubs mit Partikelgrößen unter 4 µm, der so fein ist, dass er bis in die Alveolen, die kleinsten Verzweigungen der Lunge, vordringen kann.

Diese Klassifizierung ist in Abbildung 2-1 visualisiert. Die Gesundheitsrisiken reichen dabei von der Reizung der Schleimhäute bis hin schwerwiegenden Lungenerkrankungen wie Lungenfibrose oder Lungenkrebs [Z1, Z4, Z5]. Abhängig vom verwendeten Pulverwerkstoff kann zusätzlich eine karzinogene Gefahr (z. B. bei Nickel [Z4]) oder eine Brand- und Explosionsgefahr bestehen, da feine Pulverpartikel

explosionsfähige Staubgemische bilden können [N2, Z6]. Ljunggren et al. [Z4] betonen die Notwendigkeit einer gezielten Gestaltung und Regulierung der additiven Fertigungsumgebung. Diese sollte präventive Maßnahmen wie den Einsatz geeigneter Schutzausrüstung sowie eine kontinuierliche Überwachung umfassen [Z4].

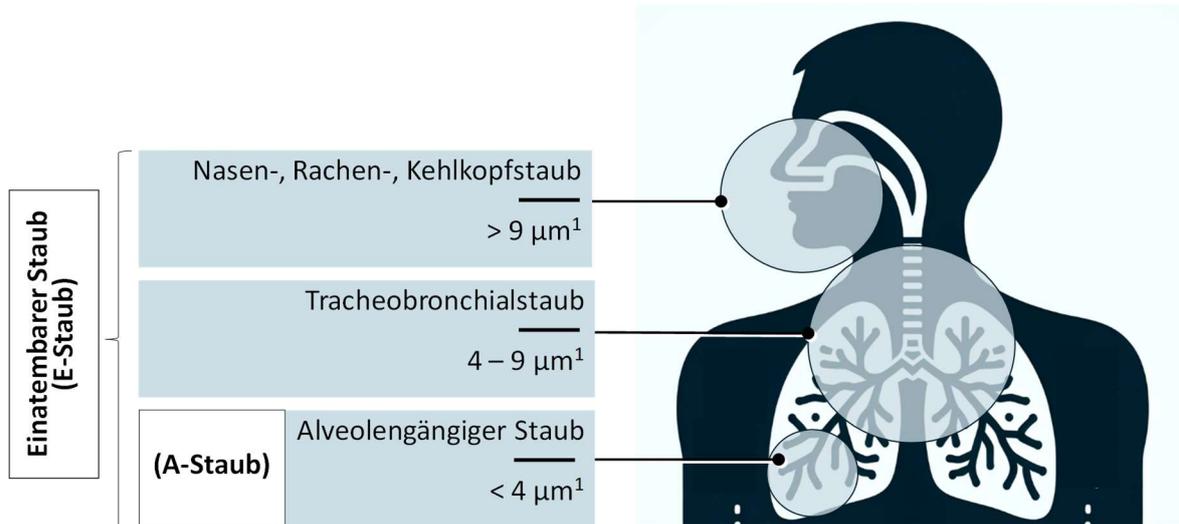


Abbildung 2-1: Unterteilung der Staubklassen und körperliche Gefährdungsbereiche in Anlehnung an DIN EN 482 [N4].

Die wesentlichen verfahrensbedingten Unterschiede des PBF-LB/M und des PBF-EB/M und deren sicherheitstechnische Implikationen lassen sich auf zwei wesentliche Punkte zusammenführen: Partikelgrößenverteilung und Verweilzeit der Partikel in der Luft. Die im PBF-EB/M verwendeten Pulverpartikel weisen eine Größenverteilung zwischen $45\text{--}106 \mu\text{m}$ auf und sind gröber als die beim PBF-LB/M genutzten Pulverpartikel mit $15\text{--}45 \mu\text{m}$ [Z7]. Im PBF-EB/M findet der Bauprozess in einer Baukammer unter Vakuum statt. Dies führt dazu, dass die Partikel in der Prozesskammer länger in der Schwebelage bleiben können, anstatt wie beim PBF-LB/M durch die Schutzgasströmung in den Filter abgesaugt zu werden [Z8]. Laut Sousa et al. verweilen dabei kleinere Partikel sowie Schmauch länger in der Luft, wodurch bei einer Pulverhandhabung einerseits das gesundheitliche Risiko der Staubbelastung erhöht ist als auch die Gefahr von Staubexplosionen verstärkt wird [Z2, Z6]. Insbesondere kann durch das Recycling von Pulver eine Erhöhung des Feinanteils in der Partikelgrößenverteilung auftreten.

Die aufgezeigten Unterschiede zwischen PBF-LB/M und PBF-EB/M verdeutlichen, dass bestehende sicherheitstechnische Empfehlungen für das PBF-LB/M nicht direkt auf das PBF-EB/M übertragen werden können. Insbesondere die längere Schwebedauer feiner Partikel in der Prozesskammer sowie die dadurch potenziell höhere Expositionsgefahr gegenüber alveolengängigem Staub erfordern eine detaillierte Untersuchung der tatsächlichen Belastungssituation für das Bedienpersonal und die Umgebung. Um fundierte Handlungsempfehlungen zur Arbeitssicherheit im PBF-EB/M ableiten zu können, sind daher gezielte experimentelle Untersuchungen notwendig. Im Rahmen dieses Beitrags konzentrieren sich diese auf die Messung der Staubexposition während kritischer Arbeitsschritte entlang der Prozesskette sowie auf die Analyse der Oberflächenkontamination mit Pulverrückständen in unmittelbarer Umgebung der pulverbelasteten Bereiche. Eine Expositionsmessung soll die Belastung der Mitarbeitenden durch Stäube während eines Baujobs und entlang der Prozesskette erfassen. Grenzwerte und Überschreitungen werden durch die DIN EN 482:2021-05 [N4] bzw. die Regel 112-190 der technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 900 der DGUV [N5] ausgewiesen. Die Bestimmung einer möglichen Pulverkontamination durch Verschleppung zeigt mit metallischen Pulverrückständen belastete

Bereiche entlang der Prozesskette auf.

3 Vorgehensweise und Durchführung der experimentellen Untersuchungen

Für die Durchführung der Messungen wurden drei Fertigungsstandorte ausgewählt, welche das PBF-EB/M und das PBF-LB/M in Forschungs- und in Industrieumgebungen anwenden. An den Messstandorten existierten bereits verschiedene Sicherheitsmaßnahmen. Diese beinhalteten unter anderem die Verwendung von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) wie beispielsweise Anzüge oder FFP3-Masken, sowie lokale Absaugungen bei offener Pulverhandhabung. Ebenfalls waren an dem Standort des PBF-EB/M in industrieller Umgebung und in der Forschungsumgebung des PBF-LB/M eine räumliche Trennung von pulverbezogenen Arbeiten vom restlichen Betrieb etabliert. Bei letzterem war die Trennung durch einen Zwei-Schleusen-Zugang zu den Anlagen geregelt und zudem bereits eine wöchentliche Laborreinigung vorgenommen. Für die Messungen wurden die Titanbasis-Legierung 3.7164 (Ti-6Al-4V) als typischer Anwendungsfall für das PBF-EB/M [Z10] und die Nickel-Basislegierung 2.4856 (IN718) als gesundheitstechnisch risikobehaftete Legierung ausgewählt. Eine Übersicht der ausgewählten Pulver mit jeweiliger Partikelgrößenverteilung und Zuordnung der beteiligten Messumgebungen sind in Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Übersicht der verwendeten Pulver für die experimentellen Untersuchungen

Ausgewählte Metallpulver und Partikelgrößenverteilung	Industrielle Umgebung PBF-EB/M	Forschungsumgebung PBF-EB/M	Forschungsumgebung PBF-LB/M	Elemente zur chemischen Analyse
3.7164	45–105 µm	45–106 µm	–	Ti, Al, V
2.4856	–	25–106 µm*	15–45 µm	Ni, Cr, Co, Mn, Cu**

* Recyceltes Pulver mit erhöhtem Feinanteil | ** Bestimmung von Cu nur bei Pulververschleppung

Für die **Expositionsmessungen** werden folgende Arbeitsschritte entlang der Prozessketten der beiden pulverbettbasierten Schmelzverfahren als potenziell kritisch gesehen, da sie einen erhöhten Anteil an Tätigkeiten zur Pulverhandhabung aufweisen:

- Das Rüsten der Anlagen mit teilweise offener Zuführung des Pulvers,
- das Abrüsten der Anlagen mit Absaugung des Pulvers und
- das Aufbereiten der Pulver durch Siebvorgänge.

Die Messungen wurden sowohl ortsfest als auch personenbezogen durchgeführt, wobei sich Durchflussmessenheiten für A-Staub des Typs PAS PM4-2 FSP PM4F und E-Staub des Typs PAS GPS VC25 in unmittelbarer Nähe um die Anlage und eine weitere Messeinheit in Atemnähe der potenziell gefährdeten Person bei der Ausführung der Tätigkeiten befanden. Die Messeinheiten saugen ein definiertes Luftvolumen an, trennen den A- und E-Staub und sammeln diesen auf einem hochreinen Quarz-Mik-

rofaserfilter. Die Auswertung erfolgte anhand der Partikelbelegung des Quarzfilters in Masse pro Luftvolumen (mg/m^3). Die vorhandenen Elemente wurden anschließend in einer chemischen Analyse in Masse pro Fläche ($\mu\text{g}/\text{m}^2$) bestimmt. Parallel dazu wurde eine Streulichtmessung mittels eines Aerosolmonitors des Typs SidePark AM250 zur Bestimmung von Expositionsspitzen von E-Staub durchgeführt. Diese Messung erlaubte einen zeitlichen Bezug der Tätigkeiten mit einem eventuell erhöhten Aufkommen einer Staubeentwicklung. Beide Messungen erstreckten sich über einen Zeitraum von zwei Stunden und stellen eine Kurzzeitmessung nach TRGS 900 Regel 112-190 [N5] dar.

Für die Bestimmung der **Pulverkontamination durch Verschleppung** wurden die Menge und die chemischen Elemente an verschiedenen Messpositionen entlang und außerhalb der Prozessketten ermittelt und analysiert. Da bisher keine expliziten Anforderungen für eine zulässige Flächenbelastung durch gesetzliche Normen existieren, wurde das Vorhandensein bestimmter Elemente in Anlehnung an die Gefahrstoffdatenbank GESTIS des Instituts für Arbeitsschutz (IFA) der DGUV überprüft [N6]. Dabei gilt das Minimierungsgebot nach §7 Absatz 4 GefStoffV [N3], nach welchem Gesundheits- und Sicherheitsgefährdungen bei der Tätigkeit mit Gefahrenstoffen vom Arbeitsgeber auf ein Minimum zu reduzieren sind, sofern diese nicht komplett vermieden werden können. Um vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten, wurden vor Beginn der Messungen die jeweiligen Messstellen an allen Standorten gereinigt. Während des vierwöchigen Überwachungszeitraums wurde der ortsübliche Labor- und Produktionsbetrieb fortgeführt. Für die Probenentnahme wurde eine $10 \times 10 \text{ cm}^2$ große Fläche zuerst mit destilliertem Wasser angefeuchtet und im Anschluss mit einem hochreinen Quarz-Mikrofaserfilter abgewischt. Es wurden eine gravimetrische Bestimmung der Staubmenge und eine anschließende chemische Aufschlüsselung der enthaltenen Metalle durchgeführt. Tabelle 3-2 zeigt eine Übersicht der Entnahmestellen und Anzahl der Proben an den jeweiligen Standorten. Die Messungen im Labor dienten der Bestimmung der Belastung während der Arbeit und zusätzlich dem Ziel, die Verschleppung in andere Bereiche wie Hallen oder Büros festzustellen. Durch Entnahmestellen entlang der Prozesskette, wie beispielsweise an einer Siebstation, konnte die Pulverbelastung im Labor außerhalb der jeweiligen Anlage überprüft werden. Die Referenzmessungen fanden in Werkstatt- und Bürobereichen statt, welche als unbelastete Bereiche angenommen wurden.

Tabelle 3-2: Anzahl und Entnahmestellen zur Ermittlung der Pulverschleppung an den jeweiligen Standorten

	Industrielle Umgebung PBF-EB/M	Forschungs- umgebung PBF-EB/M	Forschungs- umgebung PBF-LB/M
Im Labor	1	1	2
Entlang der Prozesskette	3	-	1
Hallen- und Bürobereiche	1	1	3
Referenzmessungen	2	-	1

4 Messergebnisse und Handlungsempfehlungen

Zur Bewertung potenzieller Risiken im PBF-EB/M- und PBF-LB/M-Verfahren wurden zuvor beschriebene Messungen zur Staubexposition und Pulverschleppung durchgeführt. Neben der direkten Erfassung der Staubbelastung wurde auch untersucht, inwieweit Pulverpartikel innerhalb und außerhalb der Prozessbereiche transportiert werden. Auf Grundlage der Messergebnisse werden im Folgenden gezielte Handlungsempfehlungen abgeleitet, die dazu beitragen, gesundheitliche Gefährdungen zu minimieren und die Arbeitssicherheit im Umgang mit metallischen Pulvern zu verbessern.

4.1 Staubmessungen

Die Ergebnisse der ortsfesten (anlagennahen) Messungen waren an allen Standorten und in beiden Staubfraktionen unterhalb der zulässigen elementspezifischen Grenzwerte und somit in beiden Verfahrensvarianten unauffällig. Eine mögliche Erklärung ist, dass die metallischen Partikel nur eine geringe Flugreichweite durch eine hohe Partikelmasse aufweisen [Z9].

Bei den personenbezogenen Messungen waren am Standort der industriellen Umgebung keine Grenzwertüberschreitungen zu verzeichnen; in den Forschungsumgebungen sind bei spezifischen Elementen formal Grenzwertüberschreitungen aufgetreten. Abbildung 4-1 zeigt die Überschreitungen nach Standorten und Elementen. Die Überschreitung des Mangan-Grenzwertes in der Forschungsumgebung PBF-EB/M ist nicht signifikant. Die Grenzwerte für Cobalt und Nickel wurden jedoch deutlich übertroffen. Nach der TRGS 900 Regel 112-190 der DGUV [N5] ist eine Grenzwertüberschreitung mit einer PSA zulässig. So ist ein Vielfaches eines Grenzwertes von bis zu 30 mit einer FFP3-Halbmaske tolerabel. Mit einer Vollmaske mit Filterklasse P2 wäre ein Vielfaches von bis zu 100 akzeptabel.

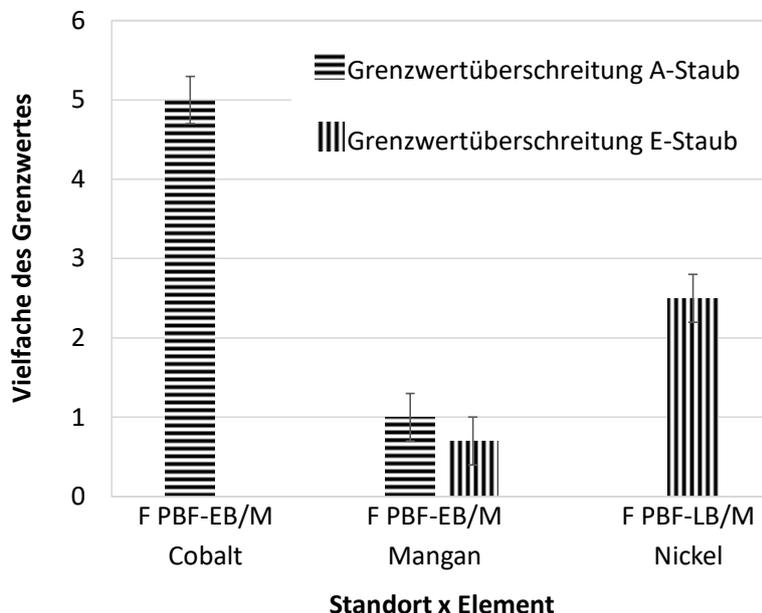


Abbildung 4-1: Darstellung der Messergebnisse von Grenzwertüberschreitungen nach Elementen und Standorten sowie der Staubfraktion

F: Forschungsumgebung

PBF-EB/M: Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Elektronenstrahl

PBF-LB/M: Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl

In Abbildung 4-2 sind die Konzentrationen mit den Tätigkeiten aus dem Protokoll der personenbezogenen Messungen in der Forschungsumgebung PBF-LB/M für den Vergleich zum PBF-EB/M-Prozess

dargestellt. Umfüll- und Saugvorgänge beim Rüsten und Abrüsten der Anlage sowie bei der Reinigung und Pulveraufbereitung sind als potenziell kritische Tätigkeiten einzustufen.

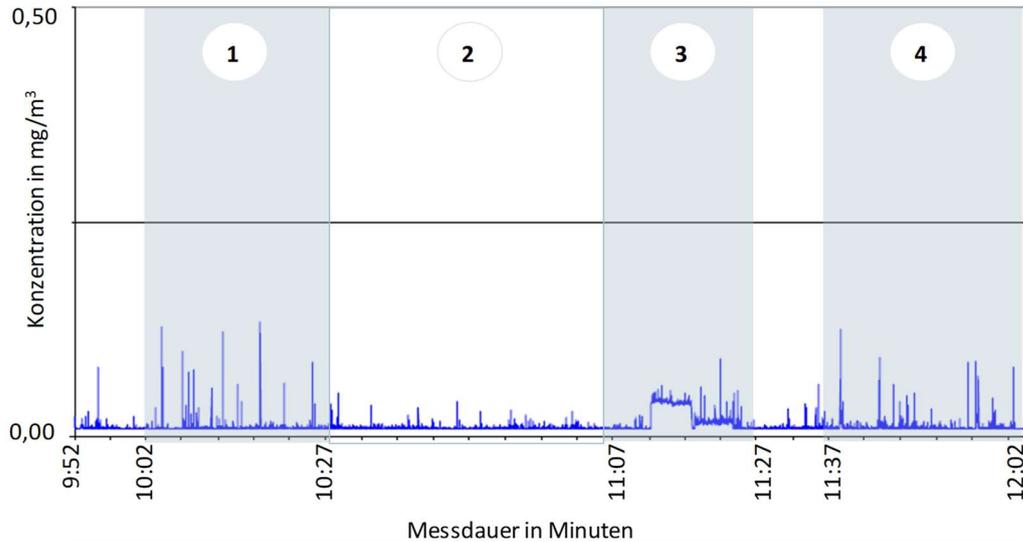


Abbildung 4-2: Streulicht-Messung im Forschungsumfeld des PBF-LB/M zur Eingrenzung kritischer Tätigkeiten beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl

- 1: Pulvereinfüllen (schaufeln und schütten)
- 2: Bauteil entpulvern und absaugen
- 3: Bauraum- und Pulverschacht absaugen
- 4: Anlage abrüsten und Pulver sieben, absaugen und umfüllen zum Sieben

Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 zeigen jeweils die Ergebnisse der Streulichtmessungen an den Standorten mit einer PBF-EB/M Anlage.

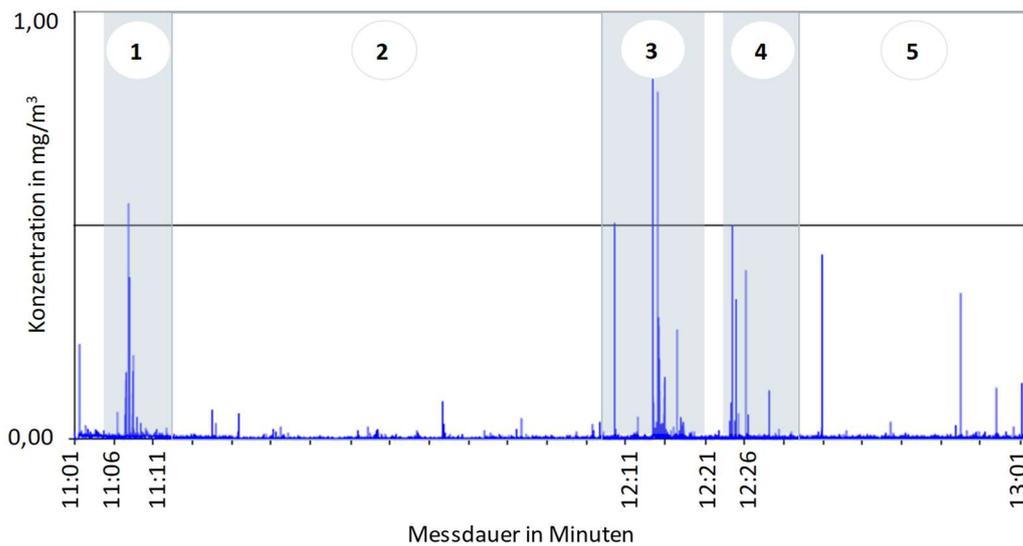


Abbildung 4-3: Streulicht-Messung im industriellen Umfeld des PBF-EB/M zur Eingrenzung kritischer Tätigkeiten beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Elektronenstrahl

- 1: Anlage abrüsten und absaugen
- 2: Bauplatte entfernen und Bauteil freistrahlen
- 3: Freistrahleinheit absaugen und Pulver sieben
- 4: Pulver umfüllen aus Absaugeinheit
- 5: Wiederholtes freistrahlen

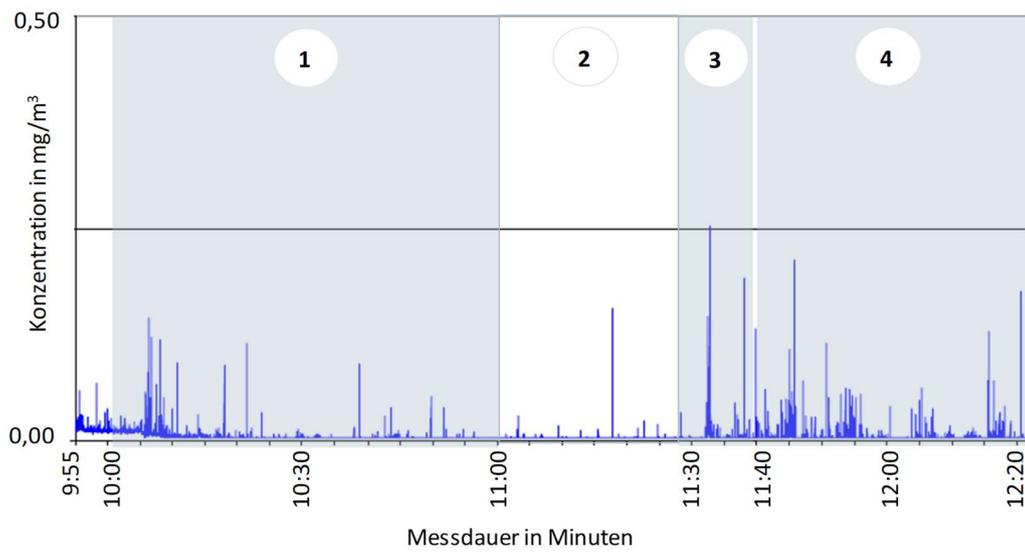


Abbildung 4-4: Streulicht-Messung im Forschungsumfeld des PBF-EB/M zur Eingrenzung kritischer Tätigkeiten beim pulverbettbasierten Schmelzen von Metallen mittels Elektronenstrahl

- 1:** Anlage abrüsten, absaugen und Bauteil freistrahlen
- 2:** Pulver sieben
- 3:** Anlage absaugen und Pulver umfüllen zum Sieben
- 4:** Anlage reinigen, absaugen der Arbeitsbereiche

Durch die Streulicht-Messung wurden auch am Standort in der industriellen Umgebung Expositionsspitzen detektiert, wobei diese in Deckung mit der gravimetrischen Messung in der Forschungs-umgebung PBF-EB/M und Forschungsumgebung PBF-LB/M im Vergleich vermehrt auftraten. An allen Stand-orten können die Spitzen auf Vorgänge des Rüstens und Abrüstens, sowie auf Reinigungsprozesse zu-rückgeführt werden. Insbesondere können Belastungen durch manuelle Umfüll- oder Saugvorgänge risikobehaftet sein. Das Freistrahlen mit Eigenpulver in der industriellen Umgebung und das geschlos-sene Sieben in der Forschungsumgebung PBF-EB/M erscheinen als unkritische Prozessschritte. Mit den bestehenden Konzepten der PSA waren an den drei Standorten keine offenen Gefährdungen in Bezug auf die Staubbelastung festzustellen. Aus den durchgeführten Messungen können folgende Hand-lungsempfehlungen festgehalten werden:

1. Tragen von persönlicher Schutzausrüstung ist notwendig. Mindestens einer filternden Atemmaske (mindestens FFP3) zur Vermeidung einer inhalativen oder oralen Staubaufnahme sowie das Tragen eines Schutzanzuges und von Handschuhen (Mindestlänge bis über das Handgelenk), um einer dermale Aufnahme entgegenzuwirken.
2. Lokale Absaugungen dienen bei offenem Pulverhandhabung der Staubminimierung und sind empfohlen.
3. Pulverbezogenen Tätigkeiten sind zur Staubexpositionsreduzierung bevorzugt in geschlos-senen Systemen durchzuführen.
4. Schulung des Personals zu Risiken und Gefahren durch Pulverwerkstoffe, umfangreiche Ein-weisungen und eine sorgfältigen Arbeitsweise zum Anlagen der PSA minimieren gesundheitli-che Gefährdungen.

4.2 Pulververschleppung

Abbildung 4-5 zeigt die Ergebnisse der Proben zur Bestimmung der Pulververschleppung entlang der Prozessketten des PBF-EB/M und PBF-LB/M mit Zuordnung zu den jeweiligen Messstellen und Standorten.

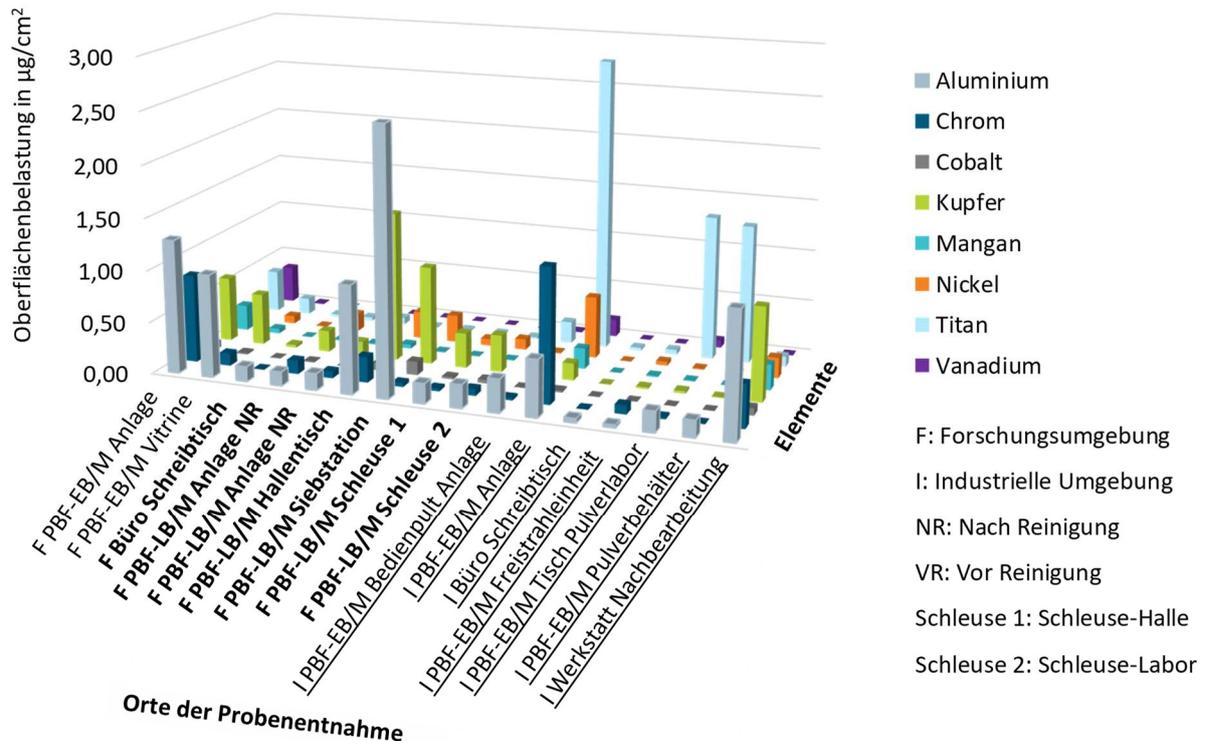


Abbildung 4-5: Oberflächenbelastung spezifischer Elemente zur Bestimmung der Pulververschleppung
Standardschrift: Forschungseinrichtung PBF-EB/M
Fett gedruckt: Forschungseinrichtung PBF-LB/M
Unterstrichen: Industrielle Umgebung PBF-EB/M

Es ist ersichtlich, dass in der industriellen Umgebung des PBF-EB/M primär die Elemente Titan und Aluminium an den Komponenten festgestellt wurden, die unmittelbar mit dem Prozess in Verbindung stehen. In der industriellen Umgebung konnten zudem auch im Werkstattbereich außerhalb des PBF-EB/M-Prozesses vorrangig die Elemente Nickel, Chrom, Kupfer und geringe Mengen Cobalt nachgewiesen werden. In der Forschungsumgebung PBF-EB/M wurde an der Anlage ein erhöhtes Vorkommen der Elemente Aluminium, Chrom, Kupfer, Titan und Vanadium ermittelt. Einige dieser Elemente wurden ebenfalls an der Vitrine im Hallenbereich außerhalb des Anlagenbereichs nachgewiesen. In der Forschungsumgebung PBF-LB/M waren an den Komponenten, die unmittelbar mit dem PBF-LB/M Prozess in Verbindung stehen, die Elemente Aluminium, Kupfer und Nickel festzustellen. An der Anlage selbst war eine geringe Oberflächenbelastung nachzuweisen. Diese kann ein Resultat der wöchentlichen Reinigung des Labors und der Anlagen sein. Ein erhöhtes Vorkommen der spezifischen Elemente war außerhalb des Labors auf dem Hallentisch nachzuweisen, auf dem die Bauplatten und Bauteile für die Nachbearbeitung abgelegt wurden. Insbesondere in den Bürobereichen waren die Oberflächenbelastungen vernachlässigbar gering, wodurch keine weite Verschleppung außerhalb der Hallenbereiche gezeigt werden konnte.

Anhand der Ergebnisse zur Pulververschleppung sind die zuvor abgeleiteten Handlungsempfehlungen (1–4) zu erweitern:

5. Kapselung der Anlagen und der Pulverhandhabungsaufgaben von pulverfreien Bereichen führt zu einer Reduzierung der Pulververschleppung und ist empfohlen.
6. Laborreinigungen dienen der Minimierung der Oberflächenkontamination und sollten regelmäßig durchgeführt werden.
7. Reinigungen der Schnittstellen zwischen den pulverbelasteten Bereichen und angrenzenden, pulverfreien Bereichen wie Nacharbeitsstellen sollten bei der regelmäßige Laborreinigung inkludiert werden.

Zusammenfassung

Das PBF-EB/M bietet große Gestaltungsmöglichkeiten in der additiven Fertigung, doch die damit verbundenen Gefahren für die Arbeitssicherheit wurden bisher wenig untersucht. Während für das verwandte Verfahren des PBF-LB/M bereits sicherheitstechnische Empfehlungen existieren, ist unklar, inwieweit diese auch auf PBF-EB/M übertragbar sind. Aufgrund verfahrensspezifischer Unterschiede, wie der Partikelgrößenverteilung und der längeren Verweildauer von feinen Partikeln in der Prozesskammer, besteht die Notwendigkeit gezielter Untersuchungen zur Staubexposition und Pulververschleppung. Für beide Verfahren sind die Expositionsspitzen und Überschreitungen der elementspezifischen Grundlagen auf Tätigkeiten der Pulverhandhabung zurückzuführen. Die Ergebnisse zur Staubexposition und Pulververschleppung zeigen, dass stationäre Messungen keine Grenzwertüberschreitungen ergaben, während personenbezogene Messungen für Elemente wie Nickel und Cobalt über den zulässigen Werten lagen. Kritische Tätigkeiten mit erhöhter Staubbelastung umfassen das Rüsten, Abrüsten und die Pulveraufbereitung. Lokale Expositionsspitzen traten bei manuellen Umfüll- oder Saugvorgängen auf. Bezüglich der Pulververschleppung wurden metallische Pulverrückstände entlang der gesamten Prozesskette nachgewiesen, sowohl an Anlagenkomponenten als auch in angrenzenden Bereichen. Ein höherer Grad der Automatisierung der Tätigkeiten, die Kapselung der Anlagen und Geräte und eine regelmäßige Reinigung können die Kontaminationsrisiken nachweislich verringern. Vorhandene PSA-Konzepte, wie mindestens FFP3-Masken, Handschuhe und Schutzanzüge, bieten ausreichenden Schutz, müssen jedoch konsequent angewendet werden.

Acknowledgements

Die Autoren danken der Dobeneck-Technologie-Stiftung für die Förderung des Forschungsprojektes Arbeitssicherheit im pulverbettbasierten Schmelzen mittels Elektronenstrahl. Ein besonderer Dank gilt pro-beam, dem Fraunhofer IFAM und Müller BBM für die Unterstützung im Projekt und bei der Durchführung der Messreihen.

Literatur

Zeitschriften

- [Z1] Graff, P., Ståhlbom, B., Nordenberg, E., Graichen, A., Johansson, P., Karlsson, H.: Evaluating Measuring Techniques for Occupational Exposure during Additive Manufacturing of Metals: A Pilot Study. *Journal of Industrial Ecology*, 2016.

- [Z2] Sousa, M., Arezes, P., Silva, F.: Nanomaterials exposure as an occupational risk in metal additive manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
- [Z3] Arrizubieta, J. I., Ukar, O., Ostolaza, M. und Mugica, A.: Study of the Environmental Implications of Using Metal Powder in Additive Manufacturing and Its Handling. *Metals*, 2020.
- [Z4] Ljunggren, S. A., et al.: Biomonitoring of Metal Exposure During Additive Manufacturing (3D Printing). *Safety and Health at Work*, 2019.
- [Z5] Beisser, R., et al.: Inhalative Exposition gegenüber Metallen bei additiven Verfahren. *Gefahrenstoffe – Reinhaltung der Luft* 77, , Nummer 11/12, 487-496, 2017.
- [Z6] Eckhoff, R. K., Li, G.: Industrial Dust Explosions. A Brief Review. *Applied Sciences*, 2021.
- [Z7] Mellin, Pelle, et al.: Nano-sized by-products from metal 3D printing, composite manufacturing and fabric production. *Journal of Cleaner Production*, 2016.
- [Z8] Sun, P., Fang, Z. Z., Zhang, Y., Xia, Y.: Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti-Alloy Powder. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 2017.
- [Z9] Maxey, M., Riley, J.: Aerodynamics of Small Particles. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 137, Issue 1, 47-64, 1983.
- [Z10] Nguyen, Hung Dang, et al.: A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4v alloy: microstructure and mechanical properties, *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 18, 4641-4661, 2022.

Normen und Richtlinien

- [N1] Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO/ASTM 52900:2022: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie. 2022.
- [N2] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinie 3405: Additive Fertigungsverfahren: Anwendersicherheit beim Betrieb der Fertigungsanlagen Laser-Strahlschmelzen von Metallpulvern. 2018.
- [N3] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen (Gefahrenstoffverordnung - GefStoffV) - §7 Grundpflichte. 2010, letzte Änderung 2021.
- [N4] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 482:2021-05: Exposition am Arbeitsplatz - Verfahren zur Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen - Grundlegende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit. 2021.
- [N5] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Arbeitsplatzgrenzwerte TRGS 900, Tragen von Atemschutz Regel 112-190. *BARBl*. 01/2022.
- [N6] Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) Institut für Arbeitsschutz (IFA): Gefahrstoffdatenbank. Online: <https://gestis.dguv.de>, 22.04.2025.

Kontaktangaben

Fraunhofer IGCV – Additive Fertigung
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg

Julia Förster
Email: julia.foerster@igcv.fraunhofer.de