

White Paper

Arbeitssicherheit in der additiven Fertigung – Gefährdungen und Handlungsempfehlungen



Hintergrund

Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren ermöglicht die schicht- oder elementweise Fertigung von Bauteilen mit hoher geometrisch-konstruktiver Freiheit. Dies führt zur einer steigenden Nachfrage nach innovativen additiven Fertigungsverfahren und Materialien. Mit der damit einhergehenden Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren steigt auch die Relevanz der Arbeitssicherheit in diesem Kontext an. Dieser Trend zeigt sich in der nachfolgenden Abbildung 1, die den Verlauf der Beliebtheit der Suchbegriffe „Additive Manufacturing“ und „Safety 3D Printing“ für die Jahre 2004 bis 2019 bei der Internet-Suchmaschine Google¹ aufzeigt.

¹ Die Daten sind normiert und werden auf einer Ordinate von 0 bis 100 angezeigt.
Anwendungszentrum 3D-Druck Oberfranken
Universität Bayreuth | Universitätsstraße 30 | 95447 Bayreuth
www.3dfranken.de
Projektleitung: Christian Bay | 0921 78516-226 | christian.bay@uni-bayreuth.de

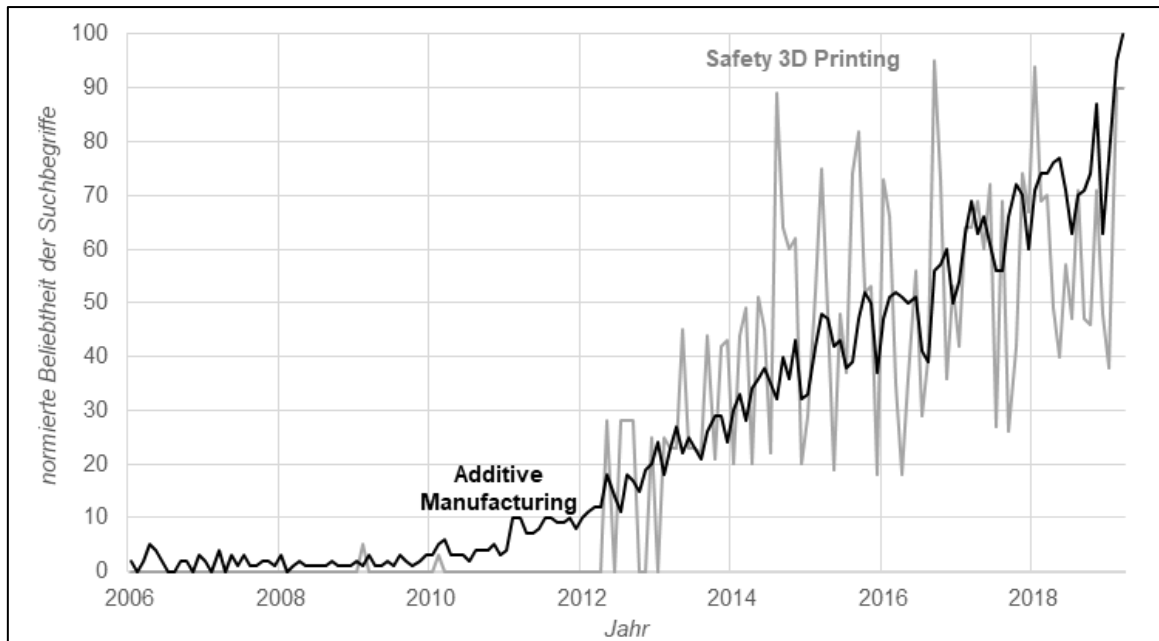


Abbildung 1: Normierte Beliebtheit der Suchbegriffe „Additive Manufacturing“ und „Safety 3D Printing“ weltweit zwischen 2004 und 2019, nach [GOO19]

Problemstellung

Grundsätzlich gilt es, bei jedem additiven Fertigungsverfahren material- und technologiespezifische Gefährdungen entlang der Prozesskette zu beachten. So können Gefährdungen bei der Fertigung sowie bei vor- und nachgelagerten Prozessschritten, wie der Lagerung des Materials bzw. der Entfernung von Stützstrukturen, auftreten. Die Art der Gefährdungen und deren Gefährdungsklasse sind stark abhängig vom additiven Fertigungsverfahren. Diese reichen von einer erhöhten Arbeitsplatzkonzentration an flüchtigen und gesundheitsschädlichen Gasen und Partikeln bei der Materialextrusion bis hin zu Gefährdungen durch die Verarbeitung reaktiver und toxischer Metallpulver beim Laserstrahlschmelzen. In Abbildung 2 sind für ausgewählte additive Fertigungsverfahren die Gefährdungen und die Implementierungskosten gegenübergestellt. Die Implementierungskosten beschreiben qualitativ die Investitionskosten, die für die arbeitssichere Implementierung der Prozesse und den Betrieb der additiven Fertigungsanlagen und deren Peripherie notwendig sind. Diese sind insbesondere abhängig vom additiven Fertigungsverfahren, den Materialien sowie den baulichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen vor Ort.

Materialextrusion (Fused Layer Manufacturing, FLM) – Gefährdungen und Handlungsempfehlungen

Bei dem häufig auch im privaten Umfeld eingesetzten additiven Fertigungsverfahren der Materialextrusion wird ein Bauteil durch das Ablegen eines strangförmigen, thermoplastischen Materials mittels einer bewegten Düse Schicht für Schicht aufgebaut. Bei diesem additiven Fertigungsverfahren treten insbesondere Gefährdungen durch die Emission von ultrafeinen Partikeln (UFP) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) auf. Diese entstehen beim Schmelzvorgang und sind abhängig vom jeweiligen Material. Bei der Verarbeitung der häufig eingesetzten Materialien Polylactid (PLA) oder Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) werden beispielsweise pro Minute ca. 10^{10} Partikel bzw. 10^{11} Partikel mit einer typischen Partikelgröße kleiner als 100 nm emittiert [STE13]. Eine quantitative Aussage über Emissionen ist stark von der molekularen Zusammensetzung des spezifischen Materials abhängig.

Bei vielen FLM-Anlagen können die arbeitssicherheitsrelevanten Anforderungen durch einfache technische Maßnahmen realisiert werden. So können FLM-Anlagen gekapselt und die Abluft gezielt über einen HEPA-Filter geführt werden. Darüber hinaus können die Verarbeitungstemperaturen der Materialien limitiert werden, um die Emissionen von UFP und VOC zu minimieren.

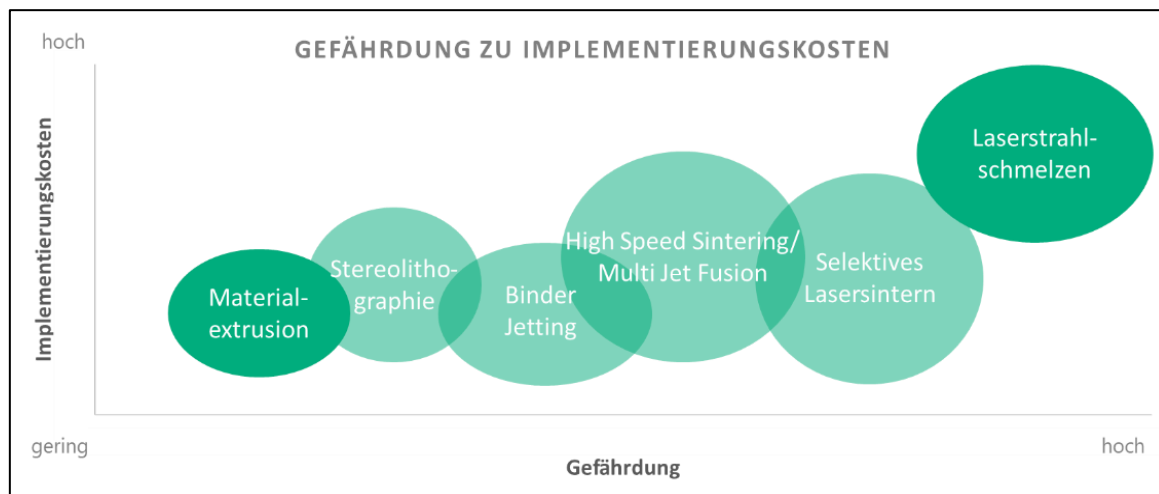


Abb. 2 Vergleich der Gefährdungen und der Implementierungskosten von verschiedenen additiven Fertigungsverfahren

Laserstrahlschmelzen (Laser Beam Melting, LBM) – Gefährdungen und Handlungsempfehlungen

Beim Fertigungsverfahren des Laserstrahlschmelzens treten nicht nur beim schichtweisen Bauteilaufbau, sondern auch bei den vor- und nachgelagerten Prozessschritten Gefährdungen auf (vgl. Abbildung 3). Dabei stellt vor allem die Nutzung von metallischen Materialien eine hohe Gefährdung dar. Typischerweise werden bei LBM Metallpulver mit einer Partikelgrößenverteilung zwischen 15 µm und 60 µm genutzt. Dabei resultieren aus der Partikelgröße und der chemischen Zusammensetzung der Metallpulver grundsätzlich zwei Arten von Gefährdungen. Zum einen sind die Metallpulver aufgrund ihrer Partikelgröße einatembare (E-Staub) und teilweise alveolengängige (A-Staub). Dies ist insbesondere bei Stählen oder anderen nickelhaltigen Legierungen kritisch, welche als Stoff mit kanzerogener, mutagener und reproduktionstoxischer Wirkung (KMR) eingestuft sind.

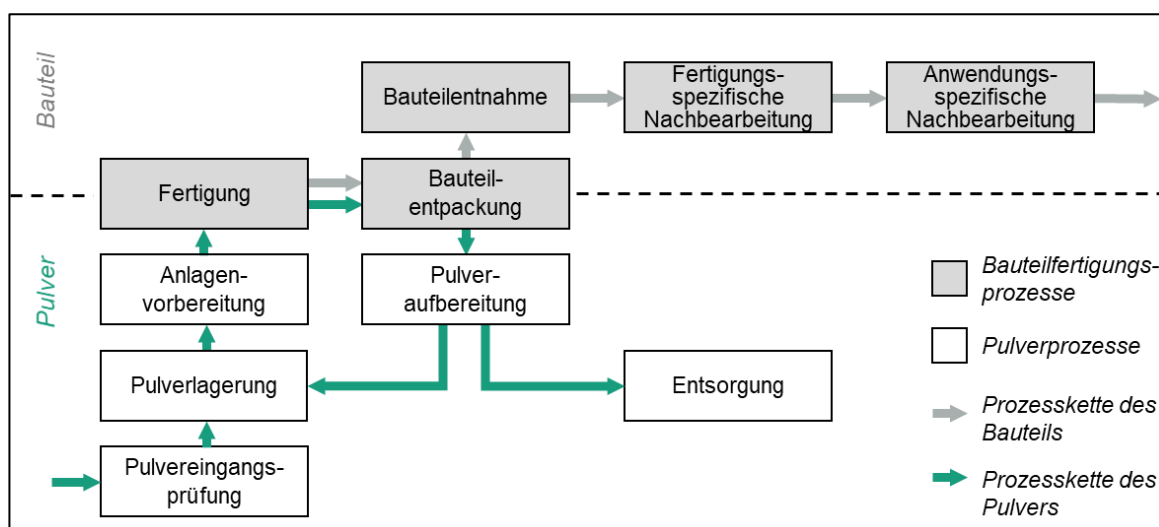


Abb. 3 Prozesskette des Laserstrahlschmelzens

Zum anderen gelten einige der eingesetzten Metallpulver als explosionsfähiger Feststoff. Je geringer die Dichte des Metallpulvers ist (z. B. Legierungen auf Basis von Titan und Aluminium), desto höher ist deren Reaktivität und damit die Gefahr von Verpuffungen und Staubexplosionen. Die Brand- und Explosionsgefährdung durch reaktive Metallpulver kann durch die sicherheitstechnische Kenngröße Mindestzündenergie (MZE) beschrieben werden. Diese MZE beschreibt die minimal notwendige Energie, um ein Staub/Luft-Gemisch zu entzünden. Metallpulver für den LBM-Prozess aus beispielsweise Ti6AlV4 besitzt eine MZE in der Größenordnung von 3 mJ [TRU17]. In Abbildung 4 wird diese Mindestzündenergie verglichen mit der von weiteren Stoffen und der durch elektrostatische Aufladung in einer Person gespeicherten Energie. Daraus wird ersichtlich, dass bereits die durch elektrostatische Aufladung in einer Person speicherbare Energie ausreicht, um ein Gemisch aus Metallpulver und Luft zu entzünden.

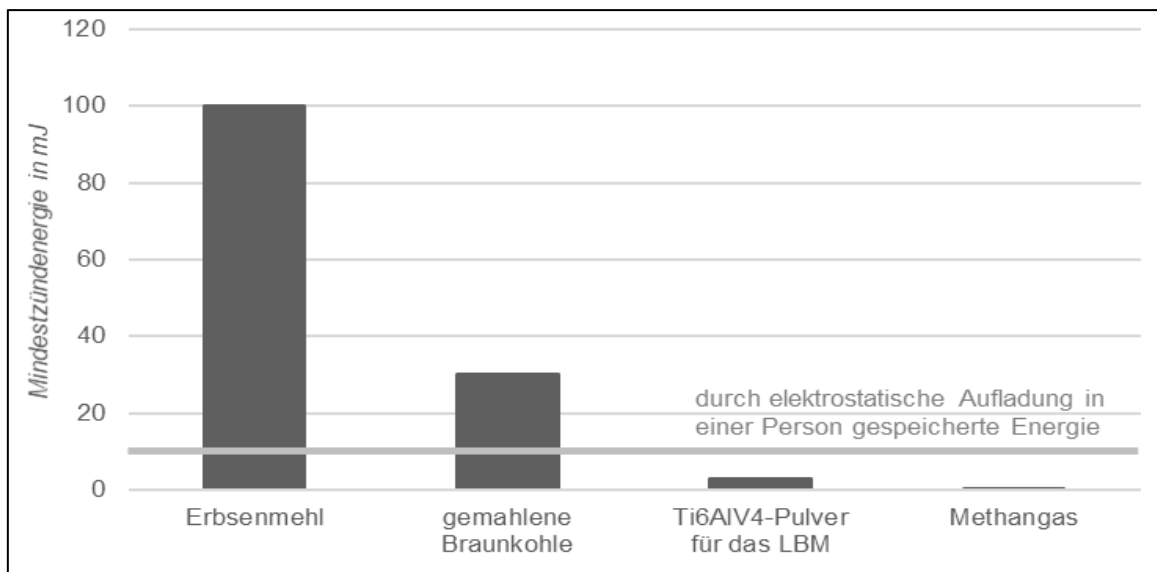


Abb. 4 Mindestzündenergie verschiedener Stoff-Luft-Gemische [TRU17, ZEN13, BER16]

Aufgrund der Diversität der Gefährdungen sowie fehlender Langzeituntersuchungen der Exposition auf den menschlichen Körper besteht bei Nutzern von Anlagen zum Laserstrahlschmelzen oftmals Unklarheit über die Relevanz und Anwendbarkeit bestehender Vorschriften und Richtlinien. Im Fachausschuss GPL 105.6 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) werden unter Mitwirkung des Fraunhofer IPA und der Universität Bayreuth verfahrensabhängig einheitliche Vorgehensweisen zur Gewährleistung des sicheren Betriebs additiver Fertigungsanlagen erarbeitet. Diese werden in praxisfokussierten VDI-Richtlinien veröffentlicht.

Die Rangfolge der Schutzmaßnahmen zur Minimierung der Gefährdungen erfolgt nach dem STOP-Prinzip: Substitution, Technische, Organisatorische, Persönliche Schutzmaßnahmen. So kann durch eine räumliche Trennung oder Kapselung der LBM-Anlage und der Peripherie der Expositionsraum des Materials und der Gefährdungen begrenzt werden. Durch die Installation einer Lüftungsanlage mit einer individuell zu ermittelnden Luftwechselrate sowie der Durchführung aller Prozessschritte unter Potentialausgleich wird die Gefahr von Staubexplosionen minimiert. Weiterhin ist die Handhabung mit Metallpulver unter größter Sorgfalt und staubarm sowie – wenn möglich – unter Schutzgas durchzuführen. Zur Detektion von austretendem Schutz- oder Prozessgas sollte eine Gassensorik installiert werden. Zusätzlich ist bei einer erhöhten Restgefährdung entsprechende Persönliche Schutzausrüstung (PSA) zu tragen. Die getroffenen Schutzmaßnahmen sollten regelmäßig auf ihre Relevanz und Durchführbarkeit überprüft werden, sodass der Standard der Arbeitssicherheit stets mit der technologischen Innovativität der additiven Fertigung Schritt halten kann.

Literaturverzeichnis

- [BER16] Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen, 2016.
- [GOO19] Google Trends, Suchanfragen für Begriffe "Additive Manufacturing" und "Safety 3D Printing" (weltweit) von 2004–2019.
- [STE13] B. Stephens, P. Azimi, Z. El Orch, T. Ramos: „Ultrafine particle emissions from desk-top 3D printers“, Atmospheric Environment, Jg. 79, S. 334–339, 2013.
- [TRU17] TRUMPF Laser-und Systemtechnik GmbH, Sicherheitsdatenblatt Titan Ti64 ELI-A LMF, 2017.
- [ZEN13] Zentrum für Arbeitssicherheit der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und Chemische Industrie, Grundlagen des Explosionsschutzes, 2013.