

## Feinstaub bei der Ultrakurzpulslaser-Materialbearbeitung

Die Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern, die Pulsdauern von weniger als einer Nanosekunde aufweisen, ist eine innovative Methode zur Erzeugung extrem kleiner Strukturen mit hoher Qualität. Aufgrund der geringen Pulslängen kann ein Energietransfer in das Atomgitter und damit die Schmelzebildung weitgehend vermieden werden. Stattdessen findet ein direkter Übergang des bestrahlten Materials in die Gasphase statt. Sobald ein übersättigter Zustand erreicht ist, bilden sich durch Nukleation oberhalb der Prozesszone ultrafeine Partikel, die durch Koagulation weiterwachsen. Zum einen können die entstehenden Partikel die Optiken und die bearbeiteten Bauteile verunreinigen. Dies führt zu erhöhten Kosten für die Reinigung und Nachbearbeitung. Andererseits können die emittierten Partikel beim Einatmen potenziell gesundheitsschädlich sein. Derzeit gibt es nur wenige Erkenntnisse zu Konzentration, Größenverteilung und Morphologie der freigesetzten Partikel sowie deren Auswirkungen auf die Gesundheit.

Um diese Wissenslücken durch experimentelle und toxikologische Untersuchungen zu schließen, wurde im Jahr 2023 das IGF-Projekt „Feinstaub bei der Ultrakurzpulslaser-Materialbearbeitung“ (FUMe) gestartet. An dem Kooperationsprojekt sind neben dem Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA) das Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH) sowie das Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) als Projektpartner beteiligt. Ein Ausschuss aus zahlreichen Industriepartnern begleitet das Projekt.

In zwei Messkampagnen wurden zunächst an einem offenen Laboraufbau des LZH (siehe Abbildung 1) sieben Werkstoffe aus verschiedenen Materialkategorien (Metalle, Halbleiter, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe) bei unterschiedlichen Prozessparametern bearbeitet und die dabei entstehenden Partikel mit Aerosolmesstechnik charakterisiert.

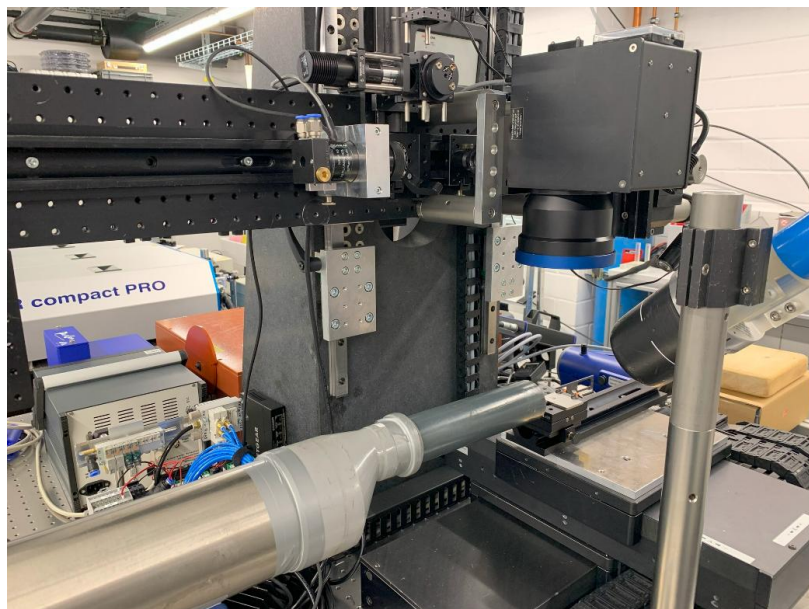


Abb. 1: Messungen am offenen Laserprüfstand des LZH

Wie Abbildung 2a exemplarisch für die Bearbeitung von Stahl zeigt, setzt die Partikelbildung erst oberhalb einer bestimmten Schwellpulsenergie des Lasers ein. Diese hängt wiederum stark vom bearbeiteten Material ab und kann zwischen etwa  $1 \mu\text{J}$  und  $10 \mu\text{J}$  variieren. Mit

steigender Pulsenergie nimmt die emittierte Partikelkonzentration mit einer materialspezifischen Wachstumsrate zu.

Die Größenverteilung der entstehenden Partikel ist im Wesentlichen bimodal, wie Abbildung 2b zeigt. Für alle Materialien konnte ein Nukleationsmode mit einem Modalwert von etwa 10 nm identifiziert werden. Der Modalwert des zweiten Peaks variiert je nach Material zwischen etwa 30 nm für kohlenfaserverstärkten Kunststoff und 120 nm für Silizium. Der relative Beitrag der beiden Peaks zur Gesamtkonzentration ist dabei je nach Material stark unterschiedlich, sodass entweder der eine oder der andere Peak die Anzahlkonzentration dominieren kann.

Zur Untersuchung der toxikologischen Eigenschaften der Partikel, wurden diese auf Filtern gesammelt und anschließend in eine Suspension überführt, um sie in einem submersen in-vitro-Testsystem auf Lungenzellen zu applizieren. Erste Versuche an Stahlpartikeln haben über einen weiten Konzentrationsbereich keinen negativen Einfluss auf die Vitalität der Lungenzellen gezeigt. Erst bei sehr hohen Konzentrationen wurde eine beginnende Zytotoxizität beobachtet. Untersuchungen zu weiteren Materialien und für weitere Endpunkte stehen allerdings noch aus, sodass noch keine abschließende Bewertung der Toxizität vorliegt.

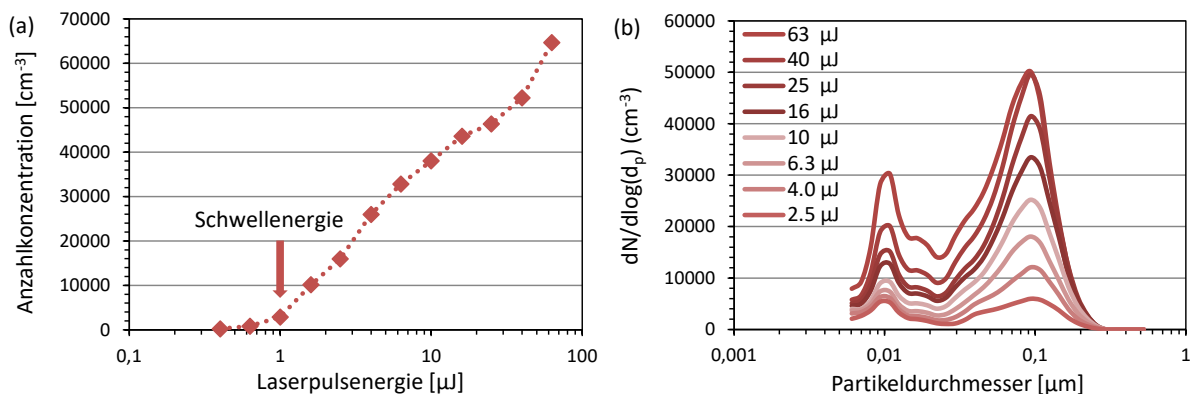


Abb. 2: Gesamtanzahlkonzentration und bimodale Größenverteilung der bei der Bearbeitung von Stahl entstehenden Partikel für ansteigende Laserpulsenergien

Neben den Versuchen am offenen Laborprüfstand wurden auch Messungen an kommerziellen eingehausten Anlagen bei mehreren Industriepartnern durchgeführt. Ein Beispiel der Admedes GmbH in Pforzheim zeigt Abbildung 3. Während die meist massenbezogenen Arbeitsplatzgrenzwerte für verschiedene Gefahrstoffe außerhalb der Einhausung nicht überschritten wurden, zeigten sich teils deutliche Erhöhungen in der Gesamtanzahlkonzentration an ultrafeinen Partikeln. Eine wesentliche Erkenntnis des Projekts ist, dass die Wirksamkeit der integrierten Absaugsysteme durch gerichtete Prozessgasvolumenströme stark gemindert werden kann. In der verbleibenden Projektlaufzeit sollen deshalb, gestützt durch numerische Strömungssimulationen, optimierte Absaugungssysteme ausgelegt und experimentell erprobt werden. Zudem konnte erfolgreich demonstriert werden, dass sich die Partikelkonzentration innerhalb der Einhausung mit kostengünstigen Feinstaubsensoren überwachen lässt. Damit lässt sich beispielsweise besser entscheiden, wann die Anlage nach Beendigung des Bearbeitungsprozesses ohne eine übermäßige Exposition der Arbeitskräfte wieder geöffnet werden kann.



Abb. 3: Messungen an einer eingehausten Anlage der Admedes GmbH

**Förderhinweis:**

*Das Projekt 01IF 22936 N wird im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.*

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages