

Laserrauch bei Femtosekunden-Laserprozessen – Produkt-, Prozess- und Umweltbetrachtungen

von Dr. Stefan Jakschik, ULT AG und Steffen Blei, ILK Dresden

1. Einleitung

Moderne Laserprozesse kommen zunehmend in Produktionsprozessen zum Einsatz. Letztere fördern ein tiefgreifendes Verständnis der Laserrauche, die einen maßgeblichen Einfluss auf Produktqualität, Lebensdauer der Produktionsmaschinen sowie Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekte haben. Kurzpuls-Laserprozesse dienen vor allem nicht-schmelzender Materialbearbeitung. Für dieses Anwendungsfeld entstehen interessante neue Applikationen. Ob Hartglas-Herstellung, Photovoltaik-Dünnschichtstrukturierung oder Elektrodenstrukturierung bei Lithiumionen-Akkus: nahezu jede fortschrittliche Technologie bedient sich der Ultrakurzpuls-Laserprozesse. [1-6]

2. Versuch

Die vorgestellte Untersuchung wurde an einem Femtosekunden-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm [3] durchgeführt. Untersucht wurden die Korrelationen zwischen abgetragener Materialart und Verteilung der Partikelgrößen bzw. Partikelkonzentration. Insbesondere die Unterschiede bei den Partikelgrößen zwischen Stahl- und Kunststoffbearbeitung wurden evaluiert.

Das aus der Laser-Materialbearbeitung resultierende Aerosol wurde nahe am Entstehungsort eingefangen und in ein Filtersystem gesaugt. Die Verteilung der Partikelgrößen wurde kontinuierlich mit einem Motorenabgas-Partikelgrößenspektrometer (Engine Exhaust Particle Sizer EEPS) bestimmt, das einen Meßbereich von 5,6 bis 560 nm aufweist. Zu diesem Zweck wurde mit dem System eine Probe analysiert. Die Partikel der Probe werden positiv geladen und bewegen sich in einem elektrischen Feld auf Elektrometer zu, wo sie ihre Ladung abgeben. Die abgegebene Ladung ist ein Maß für die Größe der Oberfläche des Partikels. Entsprechend ihrer elektrischen Beweglichkeit treffen die Partikel auf unterschiedliche Elektrometer. Die Größenverteilung wurde anhand der Stromstärken der Elektrometer errechnet. Darüber hinaus wurden aus dem Filter Proben entnommen und mit einem Sekundärelektronenmikroskop (SEM) untersucht, um die Form der Partikel zu analysieren.

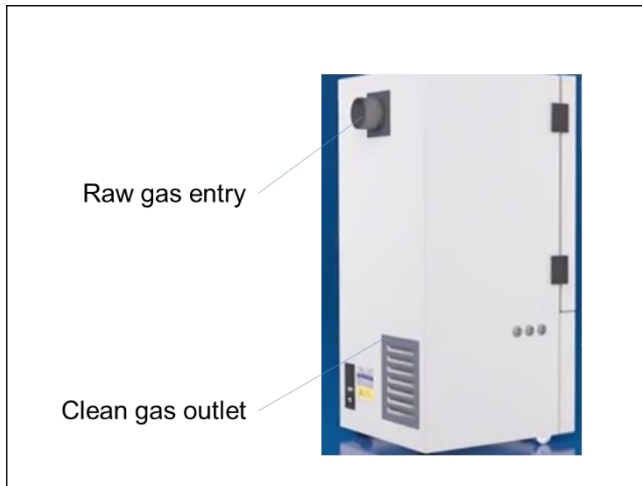


Bild 1: Absaug- und Filtersystem LAS 260 für Prozesse mit Ultrakurzpuls-Lasern

Das Rohgas wurde mit einem LAS 260 Filtersystem mit Speicherfilter mit plissiertem Vorfilter F9 gefiltert. Dieser Vorfilter besteht aus einer großen Oberfläche mit gut definierter Querstromfilterung für hohe Filterlebensdauer. Ein HEPA-Sekundärpartikelfilter der Klasse H14 sorgt für eine Reinigungsleistung auf 0,005 Prozent der ursprünglichen Partikelzahl. Dem HEPA-Filter wurde noch ein Aktivkohlefilter nachgeschaltet, um eventuell noch enthaltene gefährliche Gase aus dem Laserprozess aufzufangen.

Schließlich wurde die Leistung des Filtersystems LAS 260 ermittelt. Dazu wurde der Laser im Dauerbetrieb gefahren und die Partikelkonzentrationen wurden mit dem EEPS-Verfahren im Rohgas, sowie im gereinigten Gas gemessen.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Bilder 2 bis 4 veranschaulichen die Partikelform, betrachtet mit dem Sekundärelektronenmikroskop (SEM). Wie erwartet wurden die meisten dieser Partikel nicht geschmolzen. Eine geringe Anzahl der Metallpartikel zeigte jedoch eine Kalottenform (halbkugelförmig), was darauf schließen lässt, dass eine ausreichende thermische Energie vorhanden ist, um dieses Material zu schmelzen. In allen Fällen ist die Größe dieser Partikel mit $d = 100$ bis 200 nm sehr gering.

Im Gegensatz zur Metallverarbeitung schienen die Kunststoffpartikel anfänglich kleiner zu sein. Auf dem Filter bildeten sie jedoch kleine zusammengebackene Plättchen. Die Partikelform ist zumeist kubisch. Die Ausbildung der Plättchen kann durch thermische Energie während der Agglomerationsphase auf dem Filter erfolgen.

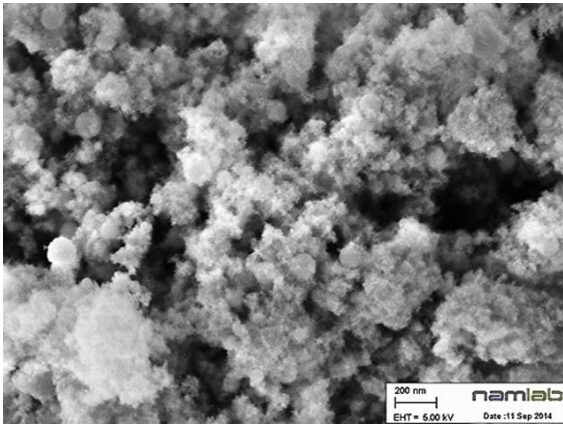


Bild 2: Stahlpartikel von einem Materialabtragungsprozess mit Femtosekunden-Laser [erste Stelle)

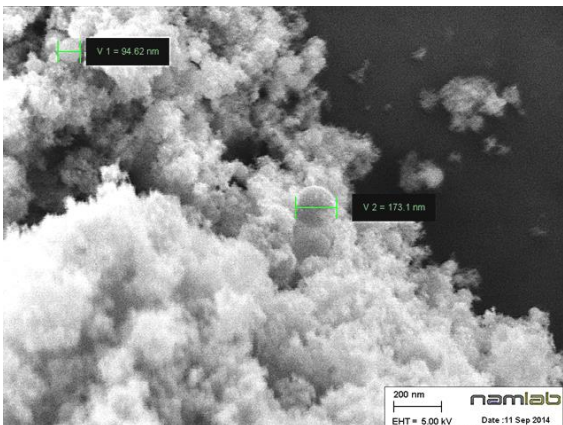


Bild 3: Stahlpartikel von einem Materialabtragungsprozess mit Femtosekunden-Laser

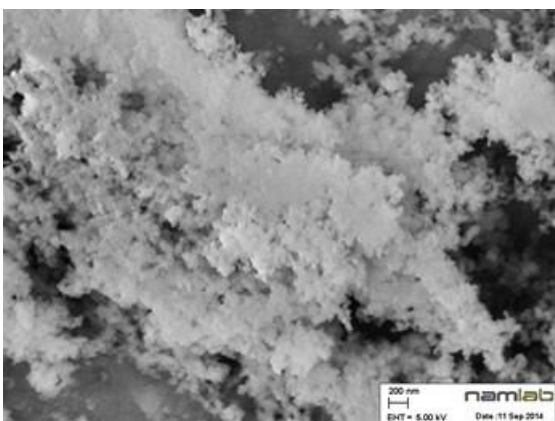


Bild 4: Kunststoffpartikel von einem Materialabtragungsprozess mit Femtosekunden-Laser

Aufgrund dieser Ergebnisse muss die Filtertechnologie überdacht werden. Ausgangspunkt ist die Absaugung: es gilt dabei, die hohe kinetische Energie dieser Partikel zu berücksichtigen. Kleine Partikel sind aufgrund der kinetischen Energie

schneller. Die Grundregel, Schadstoffe nahe an deren Entstehungsort abzusaugen, muss um einen weiter entfernten Absaugort ergänzt werden, um auch die kleinen Partikel im Nanometerbereich aufzufangen.

Da sich die Partikelgrößen hauptsächlich im Nanometerbereich befinden, können sie die Lunge-Blut-Barriere überwinden und stellen ein hohes Gesundheitsrisiko dar. Standard-Filterverfahren eignen sich daher nicht für die Luftreinigung.

Bild 5 illustriert das Grundprinzip der Partikelfilterung beim Absaugsystem LAS 260. Wie bereits gezeigt, werden die allermeisten Partikel im F9-Filter eingefangen, sodass die Betriebskosten beim Anwender sehr niedrig sind.

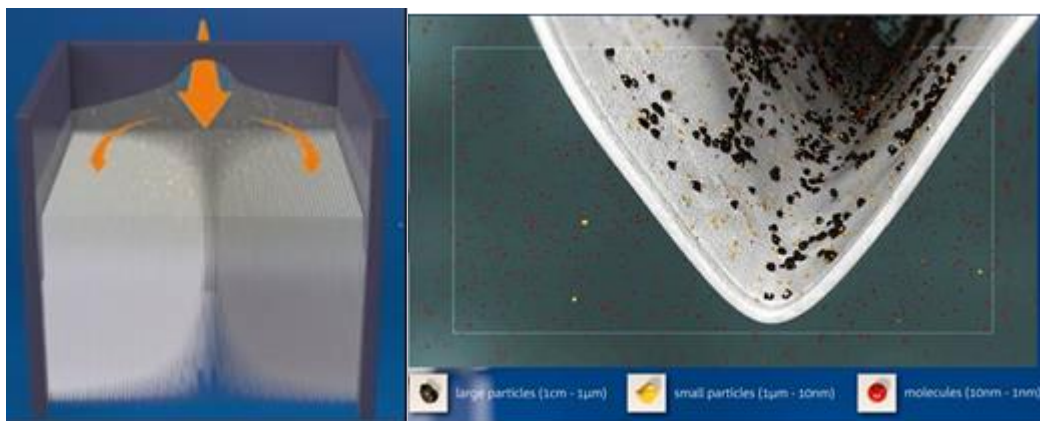


Bild 5: Prinzip der Partikel-Vorfilterung mit dem F9-Filter beim LAS 260-System

Bild 6 illustriert die Ergebnisse der EEPS-Messung bei der Kunststoff-Abtragung. Der statistische Maximalwert der Größenverteilung der Partikel lag bei einem Durchmesser von 90 nm mit einer Konzentration von 3 bis 4 * 10⁵ Partikeln pro Kubikzentimeter. Dieser Wert liegt erheblich über den akzeptablen Konzentrationswerten für die Gesundheit der Mitarbeiter und eine hohe Produktqualität.

Durch Verwendung der Sandwichtechnik des Filtersystems LAS 260 lag die Konzentration in der gereinigten Luft in der Größenordnung des Hintergrundsignals des Labors mit $dN \ll 10^2 \text{ \#/cm}^3$. In Bezug auf den Laserrauch ist also ein qualitativ hochwertiger Prozess möglich.

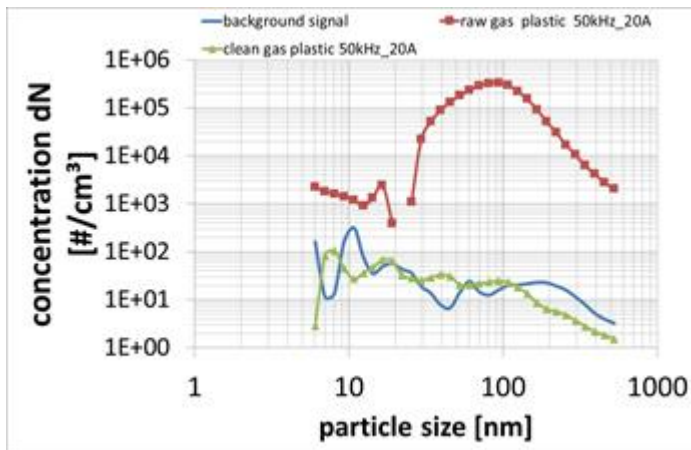


Bild 7: EEPS-Daten von Rohgas und gereinigtem Gas bei der Kunststoffbearbeitung mit einem Ultrakurzpuls-Laser. Das Reingas wurde durch Filtration mittels des Partikelfiltersystems LAS 260 erzeugt.

4. Zusammenfassung

Ultrakurzpuls-Laserprozesse, insbesondere solche im Femtosekundenbereich, wurden hinsichtlich der Partikelverteilung während des Betriebs untersucht. Im Größenbereich zwischen 50 und 200 nm wurden hohe Partikelkonzentrationen bis zu 10^6 $\#/cm^3$ festgestellt. Durch Einsatz des neuen Filtersystems LAS 260 mit plissiertem Vorfilter und HEPA-Nachfilter konnte ein Wirkungsgrad der Filtrierung von $\gg 99$ Prozent nachgewiesen werden. Bei nicht-krebserregenden und nicht-mutagenen Stoffen kann die gereinigte Luft dem Arbeitsplatz wieder zugeführt werden, um Energiekosten zu sparen.

Danksagung

Die Autoren möchten dem Fraunhofer IWS in Dresden für die Bereitstellung des Lasers und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die teilweise Finanzierung dieser Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens MWT+ danken.

Literaturverweise

- [1] K. H. Leitz, B. Redlingshöfer, Y. Reg, A. Otto, und M. Schmidt, "Metal ablation with short and ultrashort laser pulses", *Physics Procedia*, Bd. 12, S. 230–238, 2011.
- [2] J. Hänel, K. Bleul, M. Zolk, B. Keiper, T. Petsch, J. Bonitz, und C. Kaufmann, "Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung von Silizium-Mikrosystemen", *MikroSystemTechnik*, 2011.
- [3] J. Kaspar, A. Luft, S. Nolte, M. Will and E. Beyer "helical drilling of silicon wafers with ns to fs pulses: Scanning electron microscopy and transmission electron microscopy characterization of drilled through-holes" *J. Laser Appl.* 18, 85 (2006); <http://dx.doi.org/10.2351/1.2164480>
- [4] P. Engelhart, S. Hermann, T. Neubert, H. Plagwitz, R. Grischke, R. Meyer, U. Klug, A. Schoonderbeek, U. Stute, und R. Brendel, "Laser ablation of SiO₂ for locally contacted Si solar cells with ultra-short pulses", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Bd. 15, Nr. 6, S. 521–527, 2007.
- [5] S. Weiler, D. Sutter, und C. Koerber, "Von der Idee zum fertigen Produkt", *Laser Technik Journal*, Bd. 5, Nr. 5, S. 43–46, 2008.

[6] "Holtkamp: Mikrostrukturieren mit Zukunft", *Laser-Technik-Journal* (2011), Nr.2, S.37-40.