



Verfahrensforschung zur Charakterisierung der Partikelphase bei Ultrakurzpuls-Lasern

Die ULT AG verfolgt neue Entwicklungen in der Bearbeitungstechnik seit jeher sehr aufmerksam, ganz besonders in der Zukunftstechnologie der Laserbearbeitung. Aus dem „Blick voraus“ resultieren zum Beispiel eine Reihe von Entwicklungen für die Verfahrenssicherheit bei der Strukturierung von Siliziumwafern in der Photovoltaikindustrie oder neuerdings für die großtechnische Produktion von Hochleistungsbatteriezellen.

Bezogen auf den Ultrakurzpuls-Laser (UKP) erhebt sich die Frage nach der Art der Partikel, die mit dem spezifischen Ablationsprozess entstehen und in die Umwelt gelangen. Die Betreiber der Anlagen unterliegen selbstverständlich der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV). Diese fordert, dass Gefahrstoffe direkt an der Entstehungs- und Austrittsstelle erfasst und ohne Gefahr für Mensch, Maschine und Umwelt entsorgt werden. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen der ULT-Ingenieure im Bereich der Schadstoffbeseitigung bei lasergestützten Materialbearbeitungsprozessen drängt sich eine Vermutung auf. Je fokussierter und höher frequenter die Energie in den Bearbeitungsprozess eingebracht wird, desto winziger sind die partikulären Bestandteile der Aerosole.

Eine ganze Reihe von Lasersystemen bestätigt diese Tendenz und erfordert speziell angepasste Filtersysteme, um Prozess, Mitarbeiter und Umwelt nicht negativ zu beeinflussen, beziehungsweise den Betreiber vorbeugend von Schadenersatzansprüchen freizuhalten. Diese könnten gegebenenfalls berechtigt in späteren Zeiträumen geltend gemacht werden. Neben dem Schutz des Menschen vor Gefahrstoffen ist reine Luft auch die Bedingung für die Funktionsfähigkeit der Maschinen und die Qualität der Produkte.

Untersuchungsauftrag: Alles genauestens unter die Lupe genommen

Ziel der Untersuchung ist die Charakterisierung der Partikelphase an einem UKP-Laser. Die Frage war, welchen Einfluss die verschiedenen Prozess-Parameter auf die Partikelgrößenverteilung nehmen, des Weiteren welche Konzentration die freigesetzten Partikel an einer Laserstrukturieranlage – einem Pikosekunden-Laser – aufweisen. Zudem wurde untersucht, welchen Einfluss das Material (Edelstahl, Silizium, Keramik) auf die Partikelgrößenverteilung hat. Die Zielsetzung für die ULT-Ingenieure bestand in der Ableitung von Schlussfolgerungen für die Konstruktion prozesssicherer Anlagen zur Luftreinigung für einen umwelttechnisch akzeptablen Betrieb von UKP-Lasern.



Bild 1: Messaufbau zur Charakterisierung der Partikelphase an einem UKP-Laser bestehend aus Absaugrohr, Messstrecke und dem Absauggerät LAS 200

Repetitionsrate, Laserleistung, Entfernung und Position der Erfassungseinrichtung, Abscheideleistung des Filtergerätes und der Einfluss des abgetragenen Materials waren Gegenstand der Untersuchung. Diese Parameter und deren Einfluss auf die Partikelemission bei Bearbeitung verschiedener Materialien mit dem UKP-Laser wurden genauestens unter die Lupe genommen. Dabei wurden die Einflüsse auf Partikelanzahl, -konzentration und -verteilung bestimmt. Zur Umsetzung des Untersuchungsauftrages hat das Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) zusammen mit dem Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) an einem Ultrakurzpulslaser einen Messaufbau aus Absaugrohr, Messstrecke und Absauggerät installiert.



Bild 2: Im ersten Schritt wurde der Einfluss der Repetitionsrate auf die Partikelgrößenverteilung und die Anzahlkonzentration der Emissionen bei der Bearbeitung von Edelstahl untersucht.

Erfassung der Schadstoffe muss am Ort der Entstehung erfolgen

Im ersten Schritt der Untersuchung haben die Experimentatoren den Einfluss der Repetitionsrate auf die Partikelgrößenverteilung und die Anzahlkonzentration der Emissionen bei der Bearbeitung von Edelstahl untersucht. Bis zu einer Repetitionsrate von 500 kHz betrifft dies vor allem Partikel mit einer Größe von etwa 70 Nanometer bei mittlerer bis hoher Anzahlkonzentration, nachweislich auch bei der industriell üblichen Frequenz von 200 kHz. Die Partikelgröße von etwa 100 Nanometer stellt ein Maximum im Aufkommen des Partikelspektrums bei der Bearbeitung von Edelstahl mit dem Kurzpuls laser dar.

Ultrafeine Partikel um 100 Nanometer oder kleiner gelten als „lungengängig“. Das bedeutet, sie können in Lungenbläschen eindringen. Nanopartikel durchdringen die natürlichen Barrieren des menschlichen Körpers und können auf Dauer schwere Schädigungen verursachen. Sie sind deshalb zwingend aus der Biosphäre herauszuhalten.

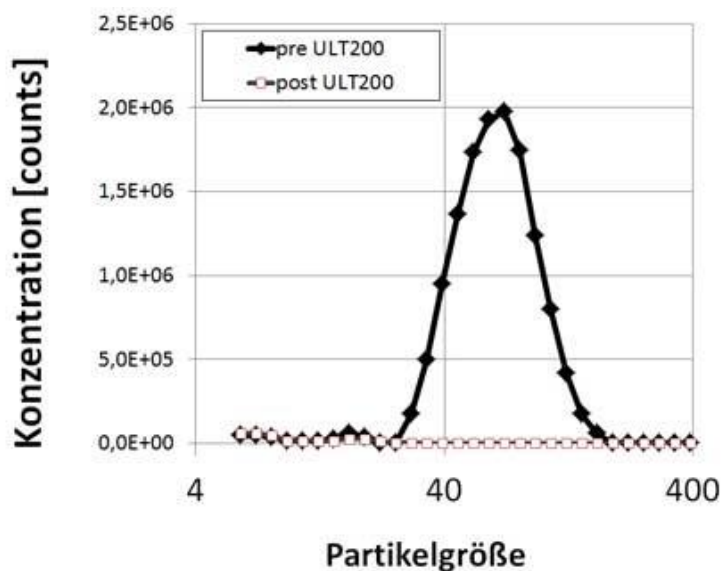


Bild 3: Die Partikelgröße von ca. 100 nm stellt ein Maximum im Aufkommen des Partikelspektrums bei der Bearbeitung von Edelstahl mit dem Kurzpuls laser dar.

Eine Vergrößerung des Abstands zur Emissionsquelle um 5 cm führt zu einer um zirka 60 Prozent verringerten Partikelkonzentration in der Abluft. Eine Vergrößerung des Abstands um insgesamt 20 cm führt zu einer Verringerung um 95 Prozent, bezogen auf den Abstand 0 cm. Daher lautet der Anspruch an den Konstrukteur: Die Erfassung der Schadstoffe muss direkt am Ort der Entstehung erfolgen. Auch bei schnell bewegten und veränderlichen Bearbeitungspunkten beziehungsweise Bearbeitungsflächen muss die Erfassungseinrichtung mitgeführt werden. Je nach Anwendungsfall verwendet ULT Erfassungs- und Transfer-elemente aus dem Alsident-System, wenn erforderlich, kombiniert mit speziell konstruierten und eigens gefertigten Erfassungselementen.

Erfassung der Partikel

Neben dem Abstand wurde die Höhe der vertikalen Mittelachse des Ansaugstutzens über dem Bearbeitungspunkt variiert. Da der Scannerkopf nahe an der Werkstückoberfläche angeordnet war, hatte die Erfassungshöhe nur unbedeutenden Einfluss auf die Position des Maximums

der Partikelgrößenverteilung. In jedem Fall ist zu gewährleisten, dass die Erfassungseinrichtung sehr nah am Entstehungsort der Schadstoffe positioniert wird und gegebenenfalls bei örtlich veränderbaren Prozessen automatisch nachgeführt wird.

Die strömungstechnischen Bedingungen bewirken, dass der erzielbare Erfassungsgrad für die Gesamtanlage die gleich hohe Bedeutung wie der eigentliche Wirkungsgrad des Filtergerätes hat. Extreme Filterabscheidegrade bleiben ohne Effekt für die Luftreinhaltung, sofern nicht die Gefahrstoffe hochgradig erfasst werden. Zudem hat die Erfassung einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch einer Absauganlage. Schon eine Verdopplung des Abstandes kann zu einem vierfachen Volumenstrom und somit zu einem achtfachen Energieverbrauch führen. Die richtige Wahl des Erfassungselementes verbessert dessen Wirkungsbereich und sichert eine hohe Absaugqualität bei Minimierung der Unterhaltskosten.

Bezogen auf die Abscheideleistung des Filtergeräts haben die Untersuchungen Folgendes ergeben: Nach dem Passieren des Filtergeräts wird auf der Reingasseite Luft mit deutlich reduzierter Partikelkonzentration frei. Der Abscheidegrad des ULT-Filtergerätes mit spezifischen Hochleistungs-Filtermaterialien für Partikel >34 nm beträgt nahezu 100 Prozent. Überraschenderweise haben die Versuche gezeigt, dass auch im Arbeitsprozess von Kurzpulslasern geringe Anteile thermisch beeinflusster Komponenten in Gestalt von Schmelzpartikeln auftreten können.

Regenerierbare Patronenfilter und nachgeschaltete Speicherfilter

Viel kritischer in Bezug auf die Luftreinigung ist die Ablagerung der Partikel in Gestalt einer „Nanowatte“. Ursache sind Bindungskräfte der abgetragenen Partikel untereinander, die zu einem „kohäsiven Sinterprozess“ führen. Die Ablagerungen reduzieren rasch den Wirkungsgrad der Absauganlage oder erhöhen den Energiebedarf signifikant. Die Filter können bei unsachgemäßer Auswahl verblocken und im Extremfall sogar durchbrechen. Die Filteranlage muss deshalb eine Funktion zur Selbstreinigung aufweisen. Die Lösung der ULT-Ingenieure besteht in der Kombination von regenerierbarem Patronenfilter und nachgeschaltetem Speicherfilter.

Der Patronenfilter weist ein spezielles Regime zur selbsttätigen Abreinigung auf. Die nachfolgende Feinreinigung erfolgt unter Einsatz von Hepa-Filter-Typen mit sehr großer Oberfläche. So können auch für UKP-Prozesse die Prämissen der Energieeffizienz eingehalten und Betriebskosten begrenzt werden. Bei Erhöhung der Laserleistung steigt die Partikelkonzentration nicht im selben Maße. Über die verschiedenen Leistungsbereiche verschiebt sich das Maximum der Partikelgrößenverteilung geringfügig von 80 auf 69 nm. Der Einfluss der Laserleistung auf die Partikelverteilung hat somit wenig Bedeutung. Die Art des Filters kann beibehalten werden. Die Durchlassleistung, die Größe der Filter und die Einrichtung zur Partikelerfassung selbst müssen natürlich den Prozessbedingungen angepasst werden. Die Anzahl der am Bearbeitungsort freigesetzten Partikel und deren Größe sind materialabhängig.

Gefahr der Emission lungengängiger Feinstaubpartikel

Bei einer Repetitionsrate von 200 kHz stellte ULT bei der Bearbeitung von Edelstahl und Silizium ähnliche Konzentrationshöhen fest. Bei der Keramikbearbeitung hingegen fällt eine im Vergleich zur Edelstahlbearbeitung um 80 Prozent niedrigere Partikelkonzentration an. Bei der Bearbeitung von Edelstahl und Keramik werden Partikel eines ähnlichen Größenspektrums frei. Bei der Bearbeitung von Silizium hingegen wurden größere Partikel festgestellt. Bei einer Repetitionsrate von 4.000 kHz setzt die Keramik- beziehungsweise Siliziumbearbeitung eine ähnliche Partikelanzahl frei, während bei Edelstahl weniger Partikel entstehen.



Bild 4: Anlage der Firma 3D-Micromac mit Ultrakurzpuls-Laser als Versuchsobjekt

Die Untersuchungen an der UKP-Laserstrukturierungsanlage von 3D-Micromac haben gezeigt, dass die Parameter Repetitionsrate und Abstand zwischen Erfassungseinrichtung und Bearbeitungsort die maßgeblichen Größen für die Partikelemission und deren Beseitigung sind. Die Tests zeigen eindeutig, dass die Gefahr der Emission lungengängiger Feinstaubpartikel besteht. Das Maximum der Partikelgrößenverteilung liegt bei etwa 100 nm. Mit steigender Laserleistung steigt erwartungsgemäß die Anzahl der Partikel. Die von ULT entwickelte Filterkombination aus abreinigbarem Patronenfilter und großflächigem H13-Taschenfilter eignet sich sehr gut für die Abscheidung der Partikel, welche bei der Bearbeitung von Edelstahl frei werden. Der Abscheidegrad für Partikel >34 nm beträgt nahezu 100 Prozent.



Bild 5: Erfassungselement der Firma Alsident

Sichere Prozesse – saubere Atmosphäre

Auswahl und Konstruktion der Erfassungseinrichtungen sowie deren Anbringung oder Nachführung sind entscheidend für den Erfolg der Bemühungen für einen sicheren Prozess und saubere Atmosphäre. Je nach Art des bearbeiteten Materials differiert das Partikelgrößen-Maximum im Spektrum der Gesamtpartikel, was allerdings auf die Konfiguration der Filtereinrichtung wenig Einfluss hat. Die Bearbeitung von Keramik und Silizium lässt eine höhere Partikelanzahl entstehen als Edelstahl, was bei Bemessung und Wartung der Filter zu berücksichtigen ist.

Im Ergebnis der Untersuchungen und der konstruktiven Schlussfolgerungen daraus verfügt ULT über den technischen Vorlauf zur prozesssicheren Ausstattung von Kurzpulslaseranlagen mit Luftreinigungsanlagen.

Autoren:

Dr. Stefan Jakschik, ULT AG und Dr. Volker Türschmann, Ingenieurbüro Produktmarktidee