

Laserinduzierte Röntgenemissionen als eine unerwünschte Begleiterscheinung bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

Jörg Schille, Thomas Schwarzbäck, Sebastian Kraft, Udo Löschner

Ultrakurzpuls-Lasersysteme (UKPL) haben sich als ein innovatives Werkzeug für die Präzisionsbearbeitung erwiesen und werden beispielsweise für das Herstellen von Mikrobohrungen, dem Mikrostrukturieren von Prägewerkzeugen, dem Feinschneiden von dünnen Blechen und Folien oder beim Laserdrehen eingesetzt. Dank neusten technologischen Entwicklungen stehen inzwischen mittlere Laserstrahlleistungen von mehreren Kilowatt bereit, was der leistungsstarken UKP-Lasertechnik perspektivisch eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten, vor allem in der Mikrofabrikation und der Oberflächenfunktionalisierung, eröffnet.

Bei der Materialbearbeitung mit hochintensiven UKP-Laserpulsen entsteht an der Werkstückoberfläche allerdings ein Laserablationsplasma, in dem energetisch hochangeregte Plasmaelektronen gefährliche Röntgenstrahlung mit Photonenenergien $> 5 \text{ keV}$ erzeugen können. Die Freisetzung von Röntgenstrahlung ist seit längerem von Grundlagenuntersuchungen her als eine unerwünschte Begleiterscheinung von UKP-Laserprozessen bekannt. So zeigte sich, dass sowohl die spektrale Verteilung der freigesetzten Röntgenphotonen als auch die emittierte Strahlendosis materialabhängig sind und die vorherrschenden Laserbestrahlungsbedingungen die Ortsdosisleistung beeinflussen. Inzwischen wurden bis zu 20 unterschiedliche Einflussgrößen identifiziert, die sich laserseitig, materialseitig oder prozessseitig auf die Röntgenemissionen auswirken. Eine Vorhersage über die im Laserprozess zu erwartenden Röntgenemissionen ist folglich nur schwer zu treffen, zumal eine große Abhängigkeit zwischen den einzelnen Bestrahlungskenngrößen hinsichtlich ihrer Wirkung besteht und sich die Bestrahlungsbedingungen während der Bearbeitung ändern, was mit fortschreitender Laserprozessierung zu unterschiedlich hohen Ortsdosisleistungen führt.

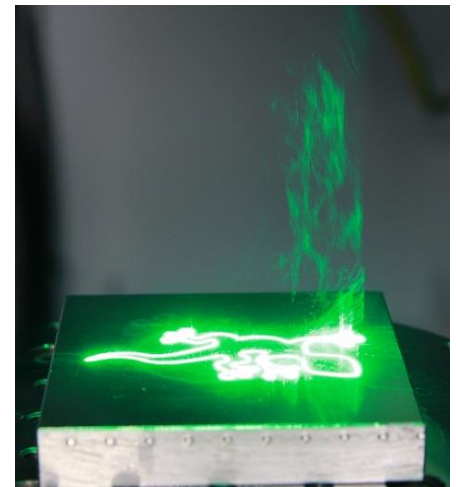


Abb. 1: UKPL-Materialbearbeitung, schön zu sehen ist die Plasmabildung.

Sind bei der Laserbearbeitung die Röntgenemissionen einzelner Laserpulse zunächst eher gering, so kann spätestens mit dem Einsatz von Hochleistungs-UKP-Lasersystemen durch die große Menge an freigesetzter Röntgenstrahlung eine echte gesundheitliche Gefahr entstehen. Bedingt durch die Vielzahl an kurz nacheinander einstrahlenden Laserpulsen summieren sich die Einzelpulsemissionen auf und lassen die Ortsdosisleistung um ein Vielfaches ansteigen. Als Problem kommt verstärkend hinzu, dass es bei hochrepetierenden Laserprozessen mit MHz Pulswiederholfrequenzen oder der Laserburst-Bearbeitung aufgrund der sehr kurzen zeitlichen Pulsabstände zu einer Wechselwirkung zwischen dem nachfolgend einstrahlenden Laserpuls mit der noch vorhandenen, vom vorherigen Laserpuls ausgelösten Laserplasma-/Ablationswolke kommt, was die Emission von Röntgenstrahlung zusätzlich verstärkt. Erste Untersuchungen in diesen Bestrahlungsregimen offenbarten, dass die Freisetzung von Röntgenstrahlung bereits bei Bestrahlungsstärken deutlich unterhalb von 10^{13} W/cm^2 beginnen kann und mit höheren Strahlintensitäten schnell Ortsdosisleistungen über $1 \mu\text{Sv/h}$ bis hin zu einigen hundert $\mu\text{Sv/h}$ entstehen können. In anderen Arbeiten wurden sogar Ortsdosisleistungen über 1 Sv/h erreicht, was millionenfach über dem erlaubten Grenzwert für einen sicheren Anlagenbetrieb liegt.

Das Energiespektrum der Röntgenphotonen setzt sich aus einem Bremsstrahlungskontinuum und einem Linienspektrum charakteristischer Röntgenstrahlung zusammen (Abb. 2, oben). Das Bremsstrahlungsspektrum entsteht bei der Beschleunigung hochangeregter Elektronen im Coulombfeld von Atomen und liegt für laserinduzierte Röntgenphotonen typisch im Bereich der weichen Röntgenstrahlung zwischen 2 keV und 20 keV . Die charakteristische Strahlung wird beim Übergang von Schalelektronen von äußeren auf innere Energieniveaus der Elektronenhülle emittiert. Die Energiedifferenz zwischen den einzelnen Elektronenschalen ist materialcharakteristisch, wodurch die charakteristischen Röntgenlinien den einzelnen Legierungselementen zugeordnet werden können. Abb. 2 (unten) verdeutlicht den Einfluss der Bestrahlungsstärke I_0 sowie des geometrischen Pulsabstandes d_x entlang einer gescannten Linie auf das Röntgenspektrum sowie den Röntgenphotonenfluss Φ_{phot} . Bemerkenswert ist, dass bei Einstrahlung von Laserpulsen mit hoher (MHz) Pulswiederholfrequenz und geringem geometrischen Pulsabstand bereits bei einer vergleichsweise geringen Bestrahlungsstärke von $1,6 \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$ eine Röntgenstrahlung von bis zu 45 mSv/h freigesetzt werden kann.

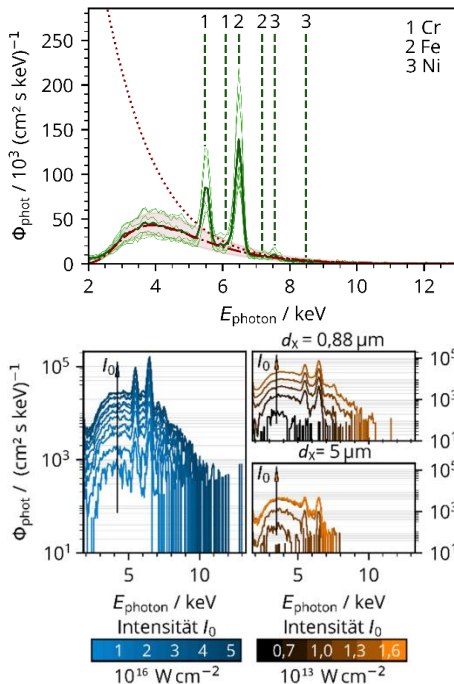


Abb. 2 oben: Laserinduziertes Röntgenemissionsspektrum an Edelstahl 1.4301, die charakteristischen Spektrallinien der Legierungselemente sind gekennzeichnet; **unten:** Einfluss der Bestrahlungsstärke I_0 sowie des geometrischen Pulsabstands d_x auf die Röntgenemission.

Solch hohe Röntgenemissionen wurden bisher nur für Bestrahlungsstärken $I_0 > 10^{16} \text{ W/cm}^2$ festgestellt, was ein deutlicher Hinweis für eine starke Interaktion der hochrepetierenden Laserpulse mit der Laserablations-/Plasmawolke und resultierender Verstärkung der Röntgenemissionen ist. Mit geeigneten Schutzmaßnahmen, z.B. durch die Abschirmung des Strahlenschutzgebietes mit einem 2 mm dickem Strahlblech, kann jedoch eine Gesundheitsgefährdung für die Laseranlagenbediener relativ einfach verhindert werden.

Die unerwünschte Emission von Röntgenstrahlung zählt nach TROS Laserstrahlung zu den Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen von Laserstrahlung und führt bei einer Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte dazu, dass UKP-Laseranlagen als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung unter das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und zugehöriger Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) fallen. Der Betrieb von UKP-Laseranlagen ist demnach nur dann anzeigefrei, wenn die Bestrahlungsstärke kleiner 10^{13} W/cm^2 ist und die Ortsdosisleistung nachweislich unter $1 \mu\text{Sv/h}$ liegt. Werden diese Grenzen überschritten, so bedarf es bereits vor der Inbetriebnahme der Lasereinrichtung zumindest der Anzeige, bei Röntgenemissionen größer $10 \mu\text{Sv/h}$ sogar der Genehmigung des Anlagenbetriebs durch die für den Strahlenschutz zuständigen Behörde, Abb. 3. Sowohl im Anzeige- als auch Genehmigungsfall sind fachkundige Strahlenschutzbeauftragte (Fachkunde Typ GUKP) und in der Regel ein Sachverständigengutachten erforderlich. Die Fachkunde im Strahlenschutz beim Betrieb von UKPL kann in speziellen behördlich anerkannten Fachkundeführergängen erworben werden, wie sie beispielsweise seit Anfang 2021 von der SLG Akademie Hartmannsdorf in Zusammenarbeit mit dem Laserinstitut Hochschule Mittweida durchgeführt werden.

In diesem Kurs werden die Teilnehmer u.a. in das Strahlenschutzgesetz und sich daraus ergebenden Grundpflichten eingeführt, lernen die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlung und verwendeten Dosisbegriffe kennen und erhalten Hilfestellung für die Organisation des betrieblichen Strahlenschutzes einschließlich der Einteilung und Überwachung von Strahlenschutzgebieten. Weitere Kursinhalte sind die Ermittlung von laserinduzierten Strahlenemissionen sowie beispielhafte Berechnungen zur Dimensionierung von Schutzwänden. Demonstrationsübungen im Laserlabor, in denen die Auswirkungen von laserseitigen Einflussparametern auf die Ortsdosis sowie das Messverhalten samt richtiger Verwendung verschiedener Strahlenmessgeräte aufgezeigt wird, runden die zweitägige Veranstaltung ab.

Inzwischen informieren viele Veranstaltungen über die bei UKP-Laserprozessen auftretenden Gefährdungen durch laserinduzierte Röntgenemissionen. Hier ist auch das UKPL-Netzwerk (www.ukpl-technologie.de) zu nennen, das darüber hinaus die Rolle einer industriellen Interessensvertretung gegenüber dem Gesetzgeber bei der Definition und Umsetzung der für die Strahlensicherheit notwendigen Maßnahmen eingenommen hat. Das Netzwerk kann mit praktischen industriellen Erfahrungen der einzelnen Partner wertvolle Beiträge liefern, um pragmatische Lösungen im Sinne aller Beteiligten anzuwenden, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen.

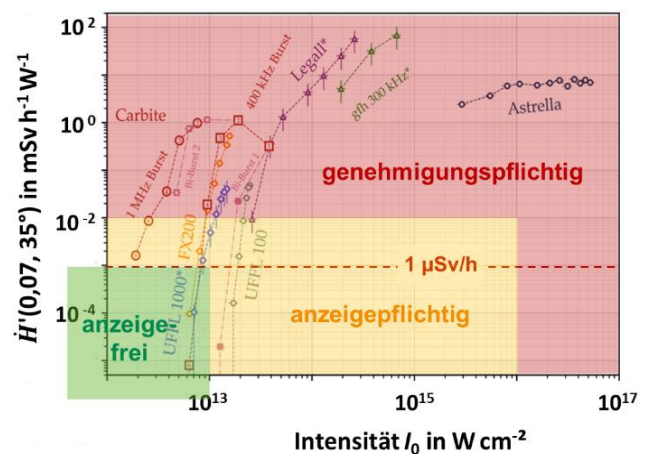


Abb. 3: Anzeige- und Genehmigungspflicht von UKPL.