



<Keine Daten von Verknüpfung>

GÜNTER DITTMAR · JÜRGEN NOLTING

# Aus der Praxis: Überwachung der Röntgenemission bei Ultrakurzpuls-Lasern

Die Mikro-Bearbeitung von harten Werkstoffen ist mit ultrakurzen Laserpulsen sehr effektiv. Leider kann während der Materialbearbeitung ungewollt Röntgenstrahlung mit hoher Dosisleistung abgestrahlt werden. Erstmals steht mit dem Röntgenwächter SILIX lambda ein Industriesensor zur Verfügung, der den auf dem Markt befindlichen Dosimetern weit überlegen ist, wenn es um die Messung und Überwachung der laserinduzierten ionisierenden Strahlung bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpulslasern geht.

## 1. Welche neuen Bedingungen ergeben sich aus dem geänderten Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) vom 20. Mai 2021 für die Betreiber von Ultrakurzpulslasern?

Unter einem Ultrakurzpuls-Laser (UKP-Laser) versteht man einen Laser, der gepulste Laserstrahlung mit Pulsdauern kürzer als einige Pikosekunden ( $10^{-12}$  s) erzeugt. Die Laserstrahlung selbst ist keine ionisierende Strahlung. Dennoch kann durch den fokussierten Laserstrahl an der mikroskopisch kleinen Auftreffstelle auf dem Werkstück ionisierende Röntgenstrahlung erzeugt

werden. Bei der Bearbeitung von Metallen mit sehr hoher Pulsenergie kann die laserinduzierte Röntgenstrahlung Ortsdosisleistungen von einigen Millisievert je Stunde erreichen, also mehr als das 10.000-fache der natürlichen ionisierenden Strahlung.

Der Worst Case bei der Erzeugung der laserinduzierten Röntgenstrahlung ist von bisher 16 bekannten, sich gegenseitig beeinflussenden Parametern abhängig. Die entstehende Röntgenstrahlung ist gegenwärtig nicht sicher vorausberechenbar.

## DIE AUTOREN



**Prof. Dr.-Ing. habil.  
Günter Dittmar**  
Ingenieurbüro G. Dittmar  
[www.ukpl.de](http://www.ukpl.de)



**Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Phys.  
Jürgen Nolting**  
Studiendekan und Leiter des  
Studiengangs Augenoptik/  
Optometrie, Studienbereichs-  
leiter Health and Optical  
Technologies; Prodekan der  
Fakultät Optik und Mechatro-  
nik, Hochschule Aalen; Leiter  
des Steinbeis-Transferzent-  
rums jn.scientific

Die Photonenenergie der laserinduzierten ionisierenden Strahlung liegt bei technologisch korrekter Materialbearbeitung häufig unter

5 keV und damit nicht im Geltungsbereich des StrlSchG. Bei der Ausnutzung der Leistungsgrenzen von Laseranlage steigt die Photonenenergie der Strahlung an und erreicht Energiewerte bis zu 15 keV. Damit wird die 5 keV-Grenze (untere Grenze des StrlSchG) überschritten, und die Ultrakurzpulslaser werden per Gesetz als „Anlagen zu Erzeugung ionisierender Strahlung“ klassifiziert. Die daraus resultierenden Konsequenzen sind für die Maschinenhersteller, die Betreiber und die Behörden sehr anspruchsvoll.

Ein Schutz vor Röntgenstrahlung ist bei der Benutzung von Ultrakurzpulslasern zwingend erforderlich. Das „Erste Gesetz zur Änderung des Strahlenschutzgesetzes vom 20. Mai 2021“ enthält Änderungen beim Betreiben von Ultrakurzpulslasern. In den Paragraphen § 5, § 17 und besonders in der Anlage 3 Teil C werden die neuen Bedingungen für die Betreiber von Ultrakurzpulslasern gesetzlich festgelegt.

Die bisherige Genehmigungspflicht wird nun in eine weniger aufwändige Anzeigepflicht umgewandelt, wenn von der Ultrakurzpulslaseranlage nur ein „überschaubares“ Gefährdungspotential ausgeht. Das ist regelmäßig der Fall, wenn eines der beiden Kriterien A oder B für die Anzeigepflicht erfüllt ist:

- A Grenze für die Dosisleistung bei Laseranlagen mit Schutzhäusung: Im Abstand von 10 cm vor der Berührungsfläche darf die Ortsdosisleistung  $\dot{H}^*(10)$  den Wert von
- B  $10 \mu\text{Sv/h}$  nicht überschreiten. Ein Schutzgehäuse muss den Auftreffpunkt des Laserstrahls sicher umschließen. Die Berührungsfläche ist die Außenwand des Schutzgehäuses. Durch den Grenzwert der Ortsdosisleistung  $\dot{H}^*(10)$  von  $10 \mu\text{Sv/h}$  wird sichergestellt, dass bei einer summarischen Aufenthaltsdauer von 2000 Stunden im Jahr eine maximale Ortsdosis von 20 mSv nicht überschritten wird.

### „In der Novelle des StrlSchG von 2021 werden neue Grenzwerte und Schutzbedingungen für die Röntgenstrahlung bei Ultrakurzpulslasern festgelegt.“

- C Für das Schutzgehäuse werden zwei redundante Sicherheitseinrichtungen gefordert, die einen Laserbetrieb verhindern, wenn das Schutzgehäuse nicht geschlossen ist.
- D Verfahrensweisen für die Erstinbetriebnahme, die Prüfung durch den Sachverständigen und den sich wiederholenden Einrichtbetrieb der

UKP-Laseranlage wurden vom Gesetzgeber noch nicht formuliert. Sie sind frühestens im Kalenderjahr 2022 zu erwarten.

- E Bauartzulassung für UKP-Laseranlagen, die als Vollschutzanlage ausgeführt sind: Das Anzeigeverfahren ist bei einer Laseranlage mit ultrakurzen Laserpulsen möglich, wenn die Laseranlage eine Bauartzulassung nach
- F StrlSchG § 45 Absatz 1 Nummer 7 hat und damit wesentliche Merkmale einer Vollschutzanlage aufweist. Eine Bauartzulassung für eine Laseranlage zu bekommen, ist sehr zeitaufwändig und kostspielig. Sicherheitsrelevante Baugruppen dürfen nach der Bauartzulassung nicht mehr verändert werden.

#### Was ist beim Anzeigeverfahren zu beachten?

Wer beabsichtigt, eine Ultrakurzpulslasermaschine zu betreiben, die ionisierende Strahlung mit einer Ortsdosisleistung nicht größer als  $10 \mu\text{Sv/h}$  vor dem Schutzgehäuse erzeugen kann, muss spätestens 4 Wochen vor dem beabsichtigten Arbeitsbeginn dies der Landesbehörde schriftlich anzeigen. Die notwendigen Daten für das Anzeigeverfahren sollten gemeinsam fachkundige Personen aus der Lasertechnik und dem Strahlenschutz für UKP-Laser in Abstimmung mit den Behörden erarbeiten.

#### Wann ist ein Genehmigungsverfahren notwendig?

Eine Ultrakurzpulslaseranlagen, die eine Ortsdosis größer als  $10 \mu\text{Sv/h}$  im Abstand von 10 cm vor der berührbaren Fläche erzeugen kann, unterliegt einem Genehmigungsverfahren. Das wird auf Ultrakurzpulslaseraufbauten zutreffen, die nicht mit einem sicheren Schutzgehäuse betrieben werden und eine Bestrahlungsstärke von mehr als  $1013 \text{ W/cm}^2$  erzeugen können. Es ist noch zu regeln, wie mit den jetzt in Betrieb befindlichen, mehr als 100 Ultrakurzpulslaser verfahren wird, die bereits Röntgenstrahlung erzeugen. Diese Forschungslaser werden häufig umgebaut, zum Teil mehrmals am Tag. Sie werden teilweise ohne geschlossene Schutzhäusung betrieben. An den Versuchen nehmen häufig gleichzeitig mehrere Personen teil. Die Bediener wechseln von Tag zu Tag. Die Parametervielfalt zum Einstellen der Strahleigenschaften ist unübersehbar groß. Damit ist es dringend geboten, Überwachungssensoren einzusetzen, die auf die laserinduzierte ionisierende Strahlung ansprechen und rechtzeitig Warnsignale abgeben bzw. die Laserleistung reduzieren. Die Messwerte müssen in Echtzeit ausgegeben werden können und müssen „rund um die Uhr“ gespeichert werden. Ein Beispiel für einen derartigen Überwachungssensor ist der Röntgenwächter SILIX lambda, der in den folgenden Abschnitten vorgestellt wird.

In der Abbildung 1 überwacht der Röntgensensor SILIX lambda den Laserprozess bei der Bearbeitung eines Werkstückes ohne geschlossene Schutzhäusung.

## 2. Welche Hierarchie des Arbeitsschutzes ist zu beachten?

Unter Beachtung der Hierarchie der Maßnahmen des Arbeitsschutzes ist immer einer technischen Maßnahme der Vorzug vor einer organisatorischen Maßnahme oder einer persönlichen Schutzmaßnahme zu geben. Demzufolge ist eine technische Überwachung des Entstehungsortes der laserinduzierten Röntgenstrahlung durch einen schnell ansprechenden Röntgenwächter, wie zum Beispiel SILIX lambda, der Vorzug vor organisatorischen Maßnahmen zu geben.

Die rasche Entwicklung der Ultrakurzpuls-Laser erfordert auch eine Novellierung der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) vom 29.11.2018 und die Erarbeitung von flexibel anpassbaren „Technischen Regeln für Ultrakurzpuls-Laser“. Ein Beispiel für die vorbildliche Erarbeitung staatlicher Regeln beim Betreiben von Lasereinrichtungen ist die „Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV)“ mit den „Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Laserstrahlung, Teil 1 bis Teil 4. Die Arbeit an der TROS Laser wird im „Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) des Bundesministerium für Arbeit und Soziales koordiniert. Unterausschüsse, die mit berufenen Fachkräften besetzt sind, bereiten die fachlichen Inhalte zügig vor. Nur mit staatlich in Kraft gesetzten „Technischen Regeln für Ultrakurzpuls-Laser“ kann rechtzeitig auf die Entwicklung der für den deutschen Maschinenbau nicht unbedeutende Ultrakurzpuls-Laser-Technik reagiert werden.

## 3. Wie arbeitet der Röntgenwächter Silix bei Überwachung der Laserprozesse?

Das vom Ingenieurbüro Günter Dittmar gemeinsam mit dem Steinbeis-Transferzentrum jn.scientific entwickelte Spektroradiometer SILIX lambda nutzt den photoelektrischen Effekt zum Nachweis der vom Laser erzeugten Röntgenstrahlung. Als Sensor wird ein Bildchip mit 8 Millionen Pixeln eingesetzt. Die im Silizium durch die Röntgenphotonen erzeugten Ladungsträger werden von einem schnellen Mikrocontroller ausgewertet. Wird ein Bildpixel von einem Röntgenphoton getroffen, entsteht ein sehr kleiner Strom. Je größer die Energie des Röntgenphotons ist, umso größer ist der Photostrom. Durch eine spezielle Signalverarbeitung wird der Photostrom von Störströmen getrennt.



*Abb. 1: Der Sensor SILIX lambda überwacht den Laserprozess. Die Röntgenstrahlung entsteht zwangsweise und kann zur Prozesssteuerung und zur Materialanalyse genutzt werden. Zu hohe Röntgenstrahlung führt zum Abschalten des Lasers und garantiert den Schutz des Menschen.* © G. Dittmar

Die Messdaten werden über eine LAN-Verbindung zur Lasermaschine und/oder zu einem PC übertragen. Der Röntgensensor SILIX lambda ist fernsteuerbar. Über eine 8-polige Industriesteckdose auf der Rückseite des Röntgenwächters können Warnmeldungen ausgelöst werden, die zum Beispiel das Überschreiten von eingestellten Grenzen der Dosisleistung signalisieren. Eine Neuheit stellt eine patentierte Selbstüberwachung der Funktion des Röntgenwächters SILIX dar. Der Silizium-Bildchip wird beim Auslösen eines Kontrollbefehles mit gepulstem Licht im Gehäuseinneren bestrahlt. Der bei dieser Kontrollmessung erzielte Aussteuerungsgrad des Sensors wird mit vorkonfigurierten Grenzen verglichen. Auf diese Weise können Degradationen des Sensors, die zu einer übermäßigen Reduzierung der Empfindlichkeit führen würden, rechtzeitig erkannt werden.

### Aufgaben des Röntgenwächters Silix lambda

- ▶ Warnen vor Röntgenstrahlung bei der Laserbearbeitung und Erzeugen von Abschaltensignalen.
- ▶ Messen und sofortige Anzeige der 3 Dosisleistungen für die Haut, das Auge und den Körper.
- ▶ Kurzzeit- und Langzeitspeicherung der Messwerte.
- ▶ Anzeigen der maximalen und der mittleren Dosisleistung.
- ▶ Langzeitspeicherung der Messdaten zur Ermittlung der Dosis.
- ▶ Selbst-Überwachung der Funktion des Röntgenwächters SILIX und Melden von Ausfällen und Alterung.
- ▶ Ermittlung der spektralen Verteilung der detektierten Röntgenstrahlung.

Aus dem spektralen Verlauf der Bestrahlungsstärke der Röntgenphotonen auf dem Bildchip des SILIX werden geräteintern die für den Strahlenschutz relevanten Äquivalentdosisleistungen berechnet:

- ▶ Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Haut  $\dot{H}'(0,07)$ .
- ▶ Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Augen  $\dot{H}'(3)$ .
- ▶ Umgebungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}^*(10)$ .

Weiterhin wird für wissenschaftliche Zwecke die Bestrahlungsstärke in der Leistungseinheit  $E$  in  $nW/cm^2$  und in der Photoneinheit  $E_{ph}$  in  $Photonen/(cm^2s)$  angezeigt. Der spektrale Verlauf der Photonenbestrahlungsstärke wird in der Einheit  $Photonen/(keV cm^2 s)$  als Kurve dargestellt.

Zur Messung bei sehr kleinen Bestrahlungsstärken (kleinen Dosisleistungen) können beliebig viele Einzelspektren gemittelt werden. Auf diese Weise können bei Photonenenergien zwischen 2 keV und 10 keV – im wichtigsten Bereich für laserinduzierte ionisierende Strahlung – schon Dosisleistungen ab etwa  $0,1 \mu Sv/h$  angezeigt werden.

### „Ultrakurzpuls laser müssen überwacht werden, weil bei der Werkstoffbearbeitung weiche Röntgenstrahlung hoher Dosisleistung unabsichtlich erzeugt werden kann.“

Der Röntgenwächter Silix lambda ermöglicht auch die Differenzbildung zweier Spektren, so dass beispielsweise die spektrale Durchlässigkeit einer Schutzwand oder von Röntgenfiltern bestimmt werden kann. Die Winkelabhängigkeit des Messsignals weicht nur 5% von einer Cos-Funktion im Bereich bis  $45^\circ$  ab.

Der Messsensor hat eine Fläche von nur  $0,1 cm^2$  und ermöglicht so eine homogene Bestrahlung auch bei einem sehr kurzen Abstand von  $< 2 cm$  bis zur punktförmigen Auftreffstelle des Laserstrahls. Bei dem kleinen Messabstand kann die dämpfende Wirkung der feuchten Luft im Labor eliminiert werden.

Die Messzeit des Röntgenwächters SILIX lambda kann in 8 Stufen zwischen 50 ms und 6 s eingestellt werden. Die gemessenen Spektren und die daraus berechneten Größen können auf dem PC abgespeichert werden. Zusätzlich werden im Mikrocontroller die berechneten Größen in einer Protokolldatei für einen ganzen Messtag kontinuierlich abgespeichert, so dass auch nachträglich Grenzwertüberschreitungen ausgewertet werden können.

Überschreitet die gemessene Äquivalentdosisleistung einen im Gerät hinterlegten kundenspezifischen Grenzwert, wird zum Beispiel auf dem

PC ein Warnsymbol eingeblendet. Dabei können zwei verschiedene Schwellen verarbeitet werden, die zu unterschiedlichen Warnanzeigen führen. Zur einfachen Integration in die Steuerung der Lasermaschine werden diese beiden Warnzustände auch über zwei Relais-Ausgänge signalisiert, so dass eine Abschaltung der Maschine ähnlich wie mit einem Türkontakt oder einer Handfalle ausgelöst werden kann.

Mit diesen Eigenschaften kann der Röntgenwächter SILIX lambda auch sicherheitskritische Überwachungsaufgaben für den Laserprozess übernehmen.

Die drei verschiedenen Dosisleistungen für die Haut, das Auge und den Ort werden aus den spektralen Daten des fein aufgelösten Spektrums und den international verfügbaren Dosisleistungskoeffizienten berechnet. Die Kalibrierung der dazu notwendigen spektralen Photonenbestrahlungsstärke erfolgte mit einer Röntgenquelle in der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB). Zur spektralen Kalibrierung der Energieskala wurden zusätzlich Aktivitätsnormale der PTB verwendet.

Die einzeln abstimmbaren Spektralkanäle des SILIX lambda und seine hohe Übersteuerungsfestigkeit ermöglichen eine Messgenauigkeit, die mit nicht spektral messenden Dosimetern im Energiebereich von 2 keV bis 20 keV unerreichbar ist. Damit dürfte der Röntgensensor SILIX lambda als Industriesensor den auf dem Markt befindlichen Dosimetern weit überlegen sein, wenn es um die Messung und Überwachung der laserinduzierten ionisierenden Strahlung bei der Materialbearbeitung geht.

Eine weitere nützliche Eigenschaft der Röntgenspektrometer aus der Baureihe SILIX ist die Bestimmung der chemischen Bestandteile des Metalls, das vom Laserstrahl bearbeitet wird. Das Spektrum der ionisierenden Strahlung wird durch die 234 Spektralkanäle so fein aufgelöst, dass die charakteristischen Fluoreszenzlinien der metallischen Werkstücke erkannt werden können. In der Abbildung 2 sind das Bremsspektrum (runder Berg) und die L-Fluoreszenzlinien des in diesem Beispiel bearbeiteten Wolframs bei 8,4 keV und 9,7 keV dargestellt. Als nützlicher Nebeneffekt könnte dann in einer weiteren Entwicklungsstufe die Lasermaschine automatisch erkennen, ob versehentlich das falsche Material bearbeitet wird.

Wenn das gelbe Röntgen-Warnzeichen rot hinterlegt ist, wurde die Abschaltswelle des Lasers wegen zu hoher Strahlungsexposition erreicht, siehe Abbildung 2 rechts unten.

Die integralen Messwerte aus der Bearbeitung des Wolframs sind in der Tabelle 1 dargestellt.

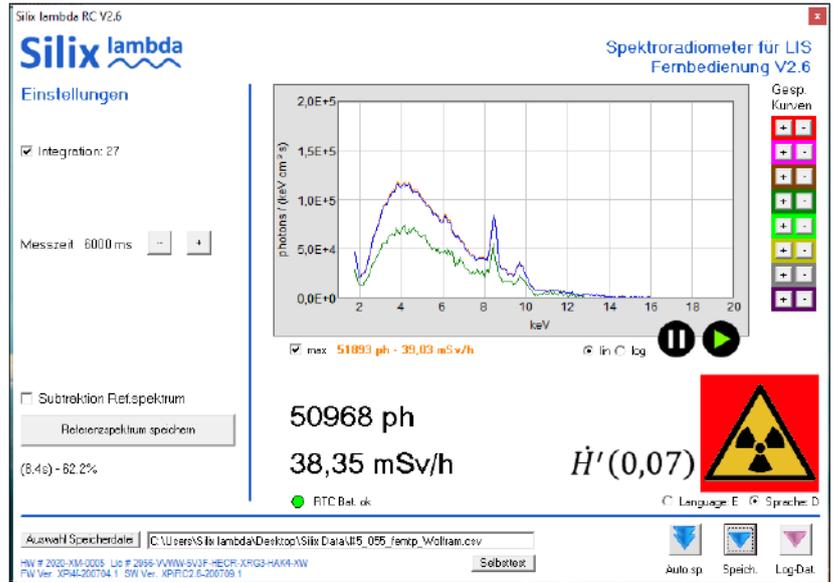
Das Sichtbarwerden der Fluoreszenzlinien im Spektrum ist ein herausragendes Leistungsmerk-

mal des Gerätes und ermöglicht zusätzlich eine exakte Kalibrierung der Energieskala.

Der Röntgenwächter SILLIX lambda lieferte bei der Bearbeitung des Wolframs das in Abbildung 2 dargestellte Röntgenspektrum und die folgenden Messwerte: Richtungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}'(0,07;\Omega) = 38,35 \text{ mSv/h}$ , Richtungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}'(3;\Omega) = 625,8 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ , Umgebungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}^*(10) = 63,5 \text{ }\mu\text{Sv/h}$ , Bestrahlungsstärke auf dem Sensor  $E = 0,51 \text{ nW/cm}^2$ , Photonen-Bestrahlungsstärke auf dem Sensor  $E_{ph} = 5,69 \times 10^5 \text{ ph/cm}^2\text{s}$ .

**Zusammenfassung**

Die Änderung des Strahlenschutzgesetzes vom 20. Mai 2021 macht neue Vorgaben für den Betrieb von Ultrakurzpulslasern, die Röntgenstrahlung erzeugen können. Produktionsanlagen mit „überschaubarem“ Gefährdungspotential müssen von einer doppelt überwachten und geprüften Schutzumhausung umgeben sein. Die Anlagen können nach einer „einfachen“ Anzeige bei der Landesbehörde in Betrieb genommen werden. Offene Ultrakurzpulslaseranlagen unterliegen weiterhin einem aufwändigen Genehmigungsverfahren, wenn sie Röntgenstrahlung erzeugen können. Davon gibt es bereits mehr als 100 Anlagen in Deutschland. Der Röntgenwächter SILIX lambda ist der erste Überwachungssensor für UKP-Laser mit sehr geringer Messunsicherheit, der Ausgabe von Warnsignalen und der Fähigkeit, die Laserleistung zu steuern. Weil der Röntgenwächter als ein sich selbst überwachendes, kalibriertes Röntgenspektrometer arbeitet, liefert er eine Messgenauigkeit und Funktionssicherheit, die von den weltweit verfügbaren, herkömmlichen Dosimetern nicht erreicht wird. ■



**Abb. 2:** Screenshot der Datenausgabe des SILIX lambda während der Bearbeitung von Wolfram mit dem Ultrakurzpulslaser

© Hr. Dr. Cvecek, Hr. Heberle, Universität Erlangen, Lehrstuhl für Photonische Energien.