

7.8.22

Lizenziert für Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Dittmar.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.
In Kooperation mit:



73. Jahrgang
Juli/August 2022
ISSN 2199-7330
1424

sicher ist sicher

www.SISdigital.de

Sicher arbeiten mit Gefahrstoffen



Gefahrstoffschutz Grundlagen der betrieblichen Praxis

Von Dr. Heiner Wahl

2022, 193 Seiten, € 29,90. ISBN 978-3-503-20930-9

eBook: € 27,40. ISBN 978-3-503-20931-6

www.ESV.info/20930

Lärm- und Vibrations-
exposition 309
Sicherheit und Gesundheit in
der digitalen Arbeitswelt 333

Mechanische Gefähr-
dungen an energetisch
höhenverstellbaren
Liegen 317

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG



GÜNTER DITTMAR · JÜRGEN NOLTING

Neue Anforderungen an den Betrieb von Laseranlagen
mit ultrakurzen Laserpulsen

Prüfung von Lasern auf Emission von Röntgenstrahlung bei der Bearbeitung von Werkstücken

Seit dem 1.1.2022 sollen die zuständigen Landesbehörden die „Anforderungen an die Prüfung von Laseranlagen als Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung sowie zum Nachweis des anzeige- und genehmigungsfreien Betriebs“ anwenden¹. Diese Anforderungen gelten für alle bereits im Betrieb und im Bau befindlichen und für zu importierende Laseranlagen.

In Ausgabe 07/08-2021 dieser Zeitschrift wurden von den Autoren Schlussfolgerungen aus dem Strahlungsschutzgesetz vom 20.5.2021 (StrlSchG) gezogen. Dabei ging es um die neuen Bedingungen für den Betreiber von Laseranlagen mit ultrakurzen Laserpulsen. Bekannt ist: Die Emission von „weicher“ Röntgenstrahlung bei der Bearbeitung von Werkstoffen ist ab bestimmter Leistungsparameter physikalisch bedingt und nicht vermeidbar. Sobald sich ein Plasma (kleine blau leuchtende Kugel aus ionisiertem

Gas) über der Bearbeitungsstelle bildet, ist mit Röntgenstrahlung zu rechnen. Die Emission der Röntgenstrahlung hängt von mehr als 20 sich untereinander beeinflussenden Einstellwerten ab. Die Dosisleistung der Röntgenstrahlung ist für einige gut definierte Betriebsbedingungen abschätzbar. Die Vielfalt der in der Forschung und der Werkstückbearbeitung verwendeten Betriebsbedingungen machen aber bisher eine verlässliche Berechnung der Röntgenemission nicht möglich.

Der Gesetzgeber hat demzufolge in die § 5 und § 17 StrlSchG Textpassagen eingeführt, die den Betrieb bestehender und zukünftiger Laseranlagen regeln. Eine Laseranlage wird demzu-

¹ Quelle: Gemeinsames Ministerialblatt des Bundesministeriums des Inneren und für die Heimat, Ausgabe Nr. 05-06/2022, Seite 105 oder www.gmbi-online.de/dokument/?user_nvurlapi_pi1%5Bdid%5D=9983680&cHash=1057949e08&src=redirect, Seite 105 ff.

DIE AUTOREN



**Prof. Dr.-Ing. habil.
Günter Dittmar**
Ingenieurbüro G. Dittmar
www.ukpl.de



**Prof. Dr. rer. nat.
Dipl.-Phys. Jürgen Nolting**
Studiendekan und Leiter des Studiengangs
Augenoptik/Optomietrie
Studienbereichsleiter Health and Optical Technologies
Prodekan der Fakultät Optik und Mechatronik
Hochschule Aalen
Leiter des Steinbeis-Transferzentrums jn.scientific

folge zu einer „Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung“, wenn sie eine Photonenstrahlung mit einer Energie von mindestens 5 keV erzeugen kann. Im Umkehrschluss gilt, wenn keine Photonenstrahlung von ≥ 5 keV erzeugt werden könnte, wird der Betrieb dieser Laseranlage nicht durch das StrlSchG geregelt, sondern nur noch von der Maschinenrichtlinie und der optischen Strahlungsverordnung OStrV. In dem Fall ist der organisatorische Aufwand und sind die Fertigungs- und die Betriebskosten für die Laseranlage wesentlich geringer, als wenn die Laser-Anlage unter das StrlSchG fällt.

In einer 2-jährigen Arbeitsperiode hat der Fachausschuss „Strahlenschutz“ des Länderausschusses für Atomkernenergie (FAS) ein international beispielgebendes Prüfkonzept für Laseranlagen, die Röntgenstrahlung erzeugen können, erarbeitet. Das Prüfkonzept dient dem einheitlichen Vollzug des Strahlenschutzrechts

und soll ab dem 01.01.2022 von allen Landesbehörden angewendet werden.

In der folgenden Tabelle 1 werden die vom Betreiber zu treffenden Maßnahmen erläutert, wenn er beabsichtigt, einen Laser in Betrieb zu nehmen, der Röntgenstrahlung emittieren könnte. Die Autoren schlagen vor, die Gruppenbezeichnungen „UKPL-R0“ bis „UKPL-R4“ für Prozesse und Maschinen mit Lasern einzuführen, um die notwendigen Arbeiten der Betreiber und der Behörden übersichtlicher zu gestalten:

- ▶ Die Gruppe UKPL-R0 verlangt vom Betreiber keine Maßnahmen für eine Anzeige bzw. Genehmigung nach dem StrlSchG.
- ▶ Die Gruppe UKPL-R1 ist noch anzeige- und genehmigungsfrei, obwohl schon vom Laser Röntgenstrahlung mit einer Energie > 5 keV erzeugt wird.
- ▶ Die Gruppen UKPL-R2 bis UKPL-R4 beinhalten leistungsstärkere Laser, die eine erhebliche

Einteilung in Gruppen und zu treffende Maßnahmen	Art der Laseranlage, gesetzliche Grenzwerte und Beispiele aus der Praxis
UKPL-R0: Keine Anzeige und keine Genehmigung notwendig.	Keine Erzeugung von Röntgenstrahlung möglich. Beispiele: Laser der Klasse 1 bis 3 nach OStrV und TROS Laser, wie auch Laserpointer, Laserlichtschranken, Lasermessgeräte, Laser der Klasse 4 mit nicht fokussiertem Laserstrahl, CW-Laser der Laserklasse 4.
UKPL-R0: Keine Anzeige und keine Genehmigung notwendig.	UKP-Lasermaschinen mit und ohne Schutzumhausung: Der Nachweis wurde erbracht, dass die Photonenenergie im Worst Case einen Wert von 5,0 keV nicht erreicht. Beispiele: Einige, aber nicht alle UKP-Laseranlagen mit fokussiertem Laserstrahl und einer optischen Wellenlänge von 532 nm oder 355 nm. Leistungsschwache UKP-Laser oder Einzweckmaschinen in der Serienfertigung ohne leistungserhöhende Einstellmöglichkeiten.
UKPL-R1: Keine Anzeige und keine Genehmigung notwendig.	UKP-Lasermaschinen mit und ohne Schutzumhausung: Der Nachweis wurde erbracht, dass im Worst Case die Ortsdosisleistung $< 1 \mu\text{Sv/h}$ im Abstand von 10 cm von der berührbaren Oberfläche ist und die Bestrahlungsstärke den Wert von 10^{13} W/cm^2 im Laserfokus bei maximalen Betriebsbedingungen (Worst Case) nicht überschreitet. Beispiele: Leistungsschwache UKP-Laser zum Bearbeiten von Kunststoffen, Gläsern und Metallen.
UKPL-R2: Anzeige notwendig.	UKP-Lasermaschinen mit und ohne Schutzumhausung: Der Nachweis des sicheren Betriebs wurde erbracht, dass im Worst Case die Ortsdosisleistung $< 10 \mu\text{Sv/h}$ im Abstand von 10 cm von der berührbaren Oberfläche ist und die Grenzwerte der effektiven Dosis von 20 mSv pro Kalenderjahr nach StrlSchG § 78 für beruflich exponierte Personen über 18 Jahre nicht überschritten werden. Beispiele: Leistungsschwache UKP-Laser zum Bearbeiten mit hoher Produktivität von Kunststoffen, Gläsern und Metallen.
UKPL-R3: Genehmigung notwendig.	UKP-Lasermaschinen mit Schutzumhausung: Der Nachweis des sicheren Betriebs wurde erbracht, dass der fokussierte Laserstrahl sicher von einer Schutzumhausung umschlossen ist und dass die berufliche Exposition für die effektive Dosis unter 1 mSv pro Kalenderjahr liegt (StrlSchV § 71), und dass die Bestrahlungsstärke den Wert von 10^{16} W/cm^2 im Laserfokus bei normalen Betriebsbedingungen nicht überschreitet, und dass die Funktionsfähigkeit der Sicherheitseinrichtung zum Abschalten der Laseranlage im Bearbeitungsbetrieb gewährleistet ist.
UKPL-R4: Genehmigung notwendig.	UKP-Lasermaschinen mit und ohne Schutzumhausung: Der Nachweis wurde erbracht, dass die Grenzwerte für beruflich exponierte Personen nach StrlSchG § 78 eingehalten werden und dass die Grenzwerte für die Exposition der Bevölkerung (StrlSchG § 80, Effektive Dosis 1 mSv, für die Augenlinse 15 mSv und für die Haut 50 mSv jeweils im Kalenderjahr) eingehalten werden.

Tab. 1: Einteilung von Lasern nach ihrem Gefährdungspotential durch Röntgenstrahlung

Gefahr darstellen können, wenn ihre Schutzvorrichtungen versagen. Diese Laseranlagen dürfen nur mit einer Anzeige bzw. Genehmigung betrieben werden.

Die Eingruppierung einer Laseranlage in eine „UKPL-R“ – Gruppe setzt Sachkenntnisse der Lasertechnik und des Strahlenschutzes voraus. Der Betreiber, nicht der Hersteller, ist für den sicheren Betrieb seiner Lasermaschine verantwortlich. Der Betreiber veranlasst auch das Anzeige- bzw. Genehmigungsverfahren und setzt sich mit den Behörden ins Benehmen. Der Betrieb von Laseranlagen der Gruppe UKPL-R2 bis UKPL-R4 erfordern beim Betreiber einen Strahlenschutzverantwortlichen und einen geprüften Strahlenschutzbeauftragten. Das Anzeige- bzw. Genehmigungsverfahren setzt in der Regel Messungen der Röntgenemission durch einen Sachverständigen voraus. Dabei werden vom Sachverständigen alle 3 Dosisleistungen $\dot{H}'(0,07)$, $\dot{H}'(3)$ und $\dot{H}^*(10)$ unter den Bedingungen gemessen, die zur maximalen Röntgenemission der betreffenden Laseranlage führen. Bei offenen Laseraufbauten wird im Abstand von 10 cm vom Laserfokus gemessen. Bei Anlagen mit einer sicheren Umhausung wird 10 cm vor der Schutzumhausung, also im Personenbereich, die Dosisleistung ermittelt. Für die Messungen unter Worst Case-Bedingungen sollten sofort anzeigende Dosisleistungsmessgeräte eingesetzt werden, die alle Einzelmesswerte und die Maximalwerte speichern. Bei den ersten Messungen ist strengstens auf die Sicherheit vor ionisierender Strahlung zu achten. In den „Anforderungen an die Prüfung von Laseranlagen als Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung sowie zum Nachweis des anzeige- und genehmigungsfreien Betriebs“ werden die durchzuführenden Maßnahmen anhand von Beispielen und Layout dem Antragsteller auf 46 Seiten erläutert.

Beispiel für eine UKP-Lasermaschine mit hochwertiger und sicherer Schutzumhausung für einen UKP-Laser kleiner Leistung

Die Schutzumhausung der Lasermaschine (Abbildung 1) wurde aus Stahlblech gefertigt. Alle Blechteile sind überlappend montiert. Die Türen und Luken sind mit Sicherheitsschaltern überwacht. Die Messungen haben ergeben, dass alle 3 laserinduzierte Dosisleistungen im Personenbereich unterhalb von 1 $\mu\text{Sv/h}$ liegen.



Abb. 1: UKP-Laseranlage mit sicherer Schutzumhausung

Kennwerte der Anlage: mittlere Laserleistung 17 W, Laserwellenlänge 1032 nm, Pulsdauer 309 fs, maximale Bestrahlungsstärke am Werkstück $E = 2,6 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$.

Bewertung: Gruppe UKPL-R2. Die Laseranlage ist anzeigepflichtig.

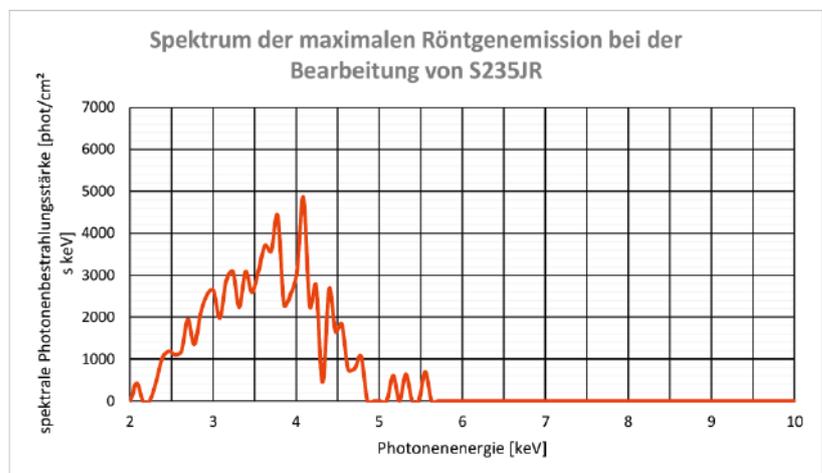


Abb. 2: Photonenspektrum der maximalen Röntgenemission bei der Bearbeitung des Baustahls S235 JR in der Laseranlage nach Abbildung 1, gemessen mit dem Spektro-Dosimeter SILIX.

Maximalwerte im Inneren im Abstand von 10 cm vom Laserfokus: Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Haut $\dot{H}'(0,07) = 525 \mu\text{Sv/h}$, Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Augen $\dot{H}'(3) = 0,0 \mu\text{Sv/h}$ und Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10) = 0,0 \mu\text{Sv/h}$.

Messwerte 10 cm vor der Schutzumhausung, d. h. im Personenbereich: Bei eingeschaltetem Laser und maximalen Dosisleistungen im Inneren wurde außen keine Erhöhung der natürlichen Dosisleistung von 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ nachgewiesen.

Beispiel für Messergebnisse einer UKP-Laseranlage mittlerer Laserleistung und mittlerer Dosisleistung



4178 cts

4,07 mSv/h

$\dot{H}'(0,07)$



Abb. 3: Photonenspektrum vom Maximalwert der Dosisleistung beim Bearbeiten von Baustahl C235, Screenshot des Spektro-Dosimeters Silix

UKP-Laseranlage mit sicherer Schutzhäuserung:
Kennwerte der Anlage: mittlere Laserleistung 90 W, Laserwellenlänge 515 nm, Pulsdauer 900 fs, maximale Bestrahlungsstärke am Werkstück $E = 8 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$. Natürliche Dosisleistung (Nulldosisleistung) = 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ bei ausgeschaltetem Laser. Messabstand 10 cm vom Laserfokus im Inneren der Schutzhäuserung,
Messergebnisse für den Worst Case im Inneren: Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Haut $\dot{H}'(0,07) = 4070 \mu\text{Sv/h}$, Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Augen $\dot{H}'(3) = 2,4 \mu\text{Sv/h}$ und Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10) = 0,0 \mu\text{Sv/h}$.

Das Maximum der spektralen Photonenbestrahlungsstärke liegt bei 3,2 keV. Der Peak der charakteristischen Strahlung für Eisen liegt bei 6,4 keV. Material: Baustahl C235 mit Kohlenstoff, aber ohne Stahlveredler.

Beispiel für Messergebnisse einer UKP-Laseranlage mittlerer Laserleistung und höherer Dosisleistung

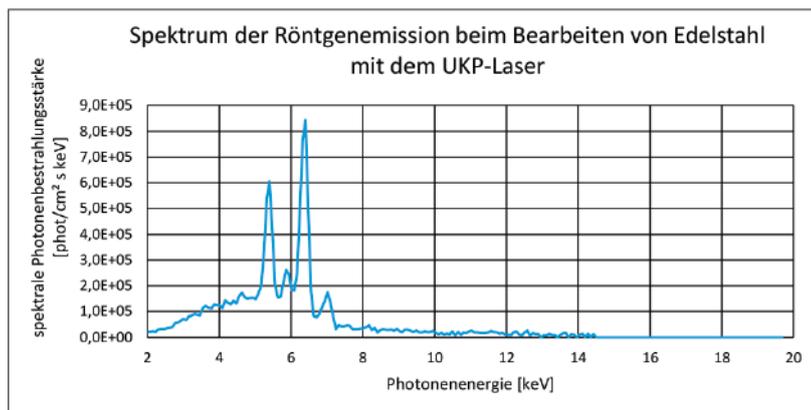


Abb. 4: UKP-Laseranlage mit sicherer Schutzhäuserung
Kennwerte der Anlage: Laserwellenlänge 1030 nm, Pulsdauer 200 fs, maximale Bestrahlungsstärke am Werkstück $1,2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Die Dosisleistung der natürlichen Umgebungsstrahlung (Nulldosisleistung) beträgt bei ausgeschaltetem Laser 0,1 $\mu\text{Sv/h}$. Messabstand 10 cm vom Laserfokus im Inneren der Schutzhäuserung

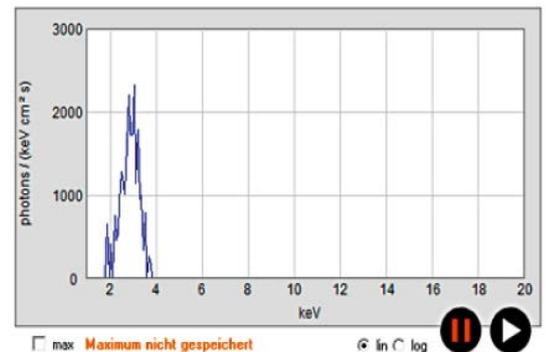
Achtung!

Messergebnisse für den Worst Case: Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Haut $\dot{H}'(0,07) = 68,72 \text{ mSv/h}$, Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Augen $\dot{H}'(3) = 0,982 \text{ mSv/h}$ und Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10) = 0,201 \text{ mSv/h}$. Der Grenzwert für die Jahresdosis der Haut wäre beispielsweise schon nach weniger als 1 Stunde erreicht. Das Laserplasma ist so heiß, dass zusätzlich zum Bremsstrahlungsspektrum auch die charakteristischen Linien der im Edelstahl enthaltenen Legierungsbestandteile angezeigt werden.

In Abbildung 4: Chrom $K\alpha$ -Linie bei 5,399 keV, Mangan $K\alpha$ -Linie bei 5,862 keV, Eisen $K\alpha$ -Linie bei 6,402.

Beispiel für ionisierende Strahlung unterhalb des Geltungsbereiches des Strahlungsschutzgesetzes

Diese Laseranlage würde nach Tabelle 1 in die Gruppe UKPL-R0 gehören, weil das Spektrum der Photonenstrahlung unterhalb von 5 keV endet.



163 ph

123,1 $\mu\text{Sv/h}$

$\dot{H}'(0,07)$

Abb. 5: Photonenspektrum beim Bearbeiten von Quarzglas mit dem UKP-Laser, Screenshot des Spektrodosimeters SILX, Quelle: Bayerisches Laserzentrum und Universität Erlangen, J. Heberle, K. Cvecek

Messergebnisse: Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Haut $\dot{H}'(0,07) = 123,1 \mu\text{Sv/h}$, Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Augen $\dot{H}'(3) < 1 \mu\text{Sv/h}$ und Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10) << 1 \mu\text{Sv/h}$.

Der Fehler, der im Text angegebenen Werte für die Dosisleistung, wird auf ca. $\pm 15\%$ geschätzt.

Zusammenfassung

Das neue Strahlenschutzgesetz vom 20.5.2021 wurde von der Bund-Länder-Arbeitsgruppe durch die „Anforderungen an die Prüfung von Laseranlagen ...“ in eine handhabbare Arbeitsrichtlinie für Betreiber, Sachverständige und die Landesbehörden untersetzt. Die neuen Richtlinien sind ab dem 1.1.2022 anzuwenden. Zur besseren Übersicht haben die Autoren die Gruppen UKPL-R0 bis UKPL-R4 vorgeschlagen, in die die UKP-Laser nach ihrem Gefahrenpotenzial eingestuft werden können. ■