

# Optimierung der Strahlenschutzeinhausung für UKPL-Maschinen

Sebastian Kraft<sup>1</sup>, Jörg Schille<sup>1</sup>, Udo Löschner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laserinstitut Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

*Infolge der raschen Entwicklung in der Lasertechnik werden in modernen Laserbearbeitungsmaschinen immer öfter Ultrakurzpulslaser (UKPL) verwendet. Die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten eröffnen industrielle Anwendungen in den Bereichen der Oberflächenfunktionalisierung, Medizin und vielen mehr. Durch die Eigenschaften der UKPL-Strahlung können neben der Primärgefährdung durch die Laserstrahlung auch Sekundärgefährdungen wie die laser-induzierte Röntgenstrahlung entstehen. Um diese meist weiche Röntgenstrahlung abzuschirmen und die Reglementierung nach §17 StrlSchV einzuhalten, wird die Abschwächung der Röntgenstrahlung von verschiedenen Materialien berechnet, validiert und an spektralen Verteilungen aus der Literatur angewendet. Dadurch soll es ermöglicht werden, die Schutzfunktion der UKPL-Maschineneinhausung an verschiedene Szenarien anzupassen und zu optimieren.*

## 1. Einleitung

Ultrakurzpulslaser (UKPL) werden seit Jahrzehnten in Spezialanwendungen großflächig eingesetzt. Diese erstrecken sich von der Nutzung in der Forschung für Analytik und Messtechnik bis zum Hauptgebiet der kommerziellen Nutzung, der Anwendung in der Medizin, speziell in der Augenheilkunde. Durch den rasanten Anstieg der verfügbaren mittleren Leistung von UKPL-Systemen rücken diese in den Fokus des industriellen Einsatzes in der klassischen Bearbeitung von Metallen und technischen Materialien. Auch hier wird die hohe Präzision infolge der guten räumlichen und zeitlichen Energiekonzentration ausgenutzt. Dabei können hochintensive Pulse mit Spitzenintensitäten  $I_0$  weit über  $1 \text{ TW/cm}^2$  erzeugt werden und durch die folgend angeregten Plasmen besteht die Möglichkeit der Emission von Röntgenphotonen. Diese laser-induzierte Röntgenstrahlung als Sekundäremission bei UKPL-Prozessen ist seit den 1990er bekannt. Infolge der Entwicklung bei Hochleistungs-UKPL in den letzten Jahren rückte diese Gefährdung wieder in den Blickpunkt.

## 2. Strahlenschutz bei UKPL-Maschinen

### 2.1. Gesetzliche Bestimmungen innerhalb der BR Deutschland

In Deutschland reglementiert das Strahlenschutzgesetz StrlSchG bzw. die Strahlenschutzverordnung StrlSchV den Betrieb und die Zulassung von Geräten mit ionisierender Strahlung. Der Bremsstrahlungsanteil der laser-induzierten Strahlung folgt dabei der MAXWELL-BOLTZMANN-Verteilung [1]–[3]. Aufgrund der Verteilung existiert theoretische keine maximale Energie der Röntgenphotonen und Lasermaschinen können somit nicht als Störstrahler klassifiziert werden. Störstrahler sind laut §5 (37) StrlSchG auf Elektronenenergien  $< 1 \text{ MeV}$  begrenzt. Dadurch werden die UKPL-Anlagen in die Gruppe der Anlagen zur Erzeugung von ionisierender Strahlung gezählt. Laut Anlage 3 Teil C StrlSchV können diese Anlagen in zwei Fällen genehmigungs- und anzeigefrei nach §7 StrlSchV betrieben werden, diese sind:

- eine Bauartzulassung laut §17 StrlSchV

„Die Bauart einer Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung, die nicht zur Anwendung am Menschen bestimmt ist, darf nach § 45 Absatz 1 Nummer 1 des Strahlenschutzgesetzes nur dann zugelassen werden, wenn sichergestellt ist, dass die Ortsdosisleistung im Abstand von 0,1 Meter von der berührbaren Oberfläche der Vorrichtung 1 Mikrosievert durch Stunde bei normalen Betriebsbedingungen nicht überschreitet.“

- der Betrieb mit niedrigen Bestrahlungsstärken und geringer Ortsdosisleistung laut Anlage 3 Teil C: Absatz 2 Satz 2 StrlSchV

„Genehmigungs- und anzeigefrei ist der Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung, in denen durch das Auftreffen von Laserstrahlung nach § 2 Absatz 3 Satz 1 der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung auf Material ionisierende Strahlung erzeugt werden kann, falls die Bestrahlungsstärke der Laserstrahlung  $1 \times 10^{13} \text{ Watt pro Quadratmeter}$  nicht überschreitet und die Ortsdosisleistung in 0,1 Meter von der berührbaren Oberfläche 1 Mikrosievert durch Stunde nicht überschreitet.“

Zusammenfassend gesagt, muss unabhängig von den angewendeten Ordnungsparagrafen die Ortsdosisleistung auf maximal  $1 \mu\text{Sv/h}$  in 10 cm zur berührbaren Oberfläche begrenzt werden. Dabei sind Messgrößen für die Ortsdosen laut Anlage 18 StrlSchV:

- die Umgebungsäquivalentdosis  $H^*(10)$
- die Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(3, \Omega)$  in 3 mm Tiefe
- die Richtungs-Äquivalentdosis  $H'(0,07, \Omega)$  in 0,07 mm Tiefe.

### 2.2. Laser-induzierte Röntgenstrahlung in UKPL-Maschinen

Die Dosisleistung und spektrale Verteilung der laser-induzierten Röntgenstrahlung während modernen Hochleistungslaseranwendungen sind stark von den Laser-, Prozess- und Materialparametern abhängig [1]–[17]. In

einer Vielzahl von Untersuchungen mit NIR-UKPL konnten Richtungs-Äquivalentdosisleistungen  $H'(0,07)$  bis in den Sv/h-Bereich nachgewiesen werden. Ohne das Wissen über die spektrale Verteilung dieser Strahlung kann jedoch nur eine sehr ungenaue Schätzung der Abschirmung durchgeführt werden. Die laser-induzierte Röntgenstrahlung weist neben der Bremsstrahlung nach MAXWELL-BOLTZMANN auch die charakteristische Strahlung der bearbeiteten Materialien auf. Dabei ist das Verhältnis aus diesen beiden Anteilen ist nicht konstant zueinander und der Anteil des Linienspektrums der charakteristischen Strahlung kann die Bremsstrahlung in Bezug auf die Dosisleistung überwiegen.

Tabelle 1: Übersicht der Messbedingungen der exemplarischen spektralen Röntgenstrahlungsverteilung aus eigenen Versuchen, der Literatur und der Theorie. Materialien: Edelstahl (StSt), Titanlegierung (Ti), Wolfram (W)

Name	Material	Messabstand $d_0/m$	Richtungs-Äquivalentdosisleistung $H'(0,07) / mSv/h$	Spitzenintensität $I_0 / 10^{13} W/cm^2$	Quelle
(1)	---	0,2	1.000	---	[18]
(2)	W	0,4	2,8	30	[19]
(3)	StSt	0,1	46	(1,5 ± 0,4)	
(3)	Ti	0,1	28	(1,5 ± 0,4)	
(4)	StSt	0,1	0,4	(7,8 ± 0,6)	

Um die Auswirkung der verschiedenen Abschirmmaterialien genauer zu untersuchen, werden insgesamt fünf Prozesse genutzt, siehe Tabelle 1. Davon sind vier reale spektrale Verteilungen (2-4) und eine theoretische Bremsstrahlungsverteilung ohne charakteristische Strahlung (1), mit den oben benannten Fehlerquellen, ausgewählt. Diese Beispiele zeigen die messbare spektrale Verteilung bei verschiedensten Prozess- und Laserparametern, zu bearbeiteten Materialien, in diversen Messabständen  $d_0$  und Dosisleistungen. Die Spektren sind in Abbildung 1 dargestellt.

Neben den zur Validierung genutzten Prozessen, siehe Abschnitt 4, wird ein ‚worst-case‘ Spektrum [19] mit bis zu 40 keV Photonenenergie genutzt und soll die maximal mögliche Exposition darstellen. Durch die Weiterentwicklung der Laserquellen kann sich der ‚worst-case‘ in Zukunft weiter zu höheren Dosisleistungen oder Photonenenergien verschieben.

Als theoretischer möglicher Ansatz wird eine Verteilung mit einer Dosisleistung  $H'(0,07) = 1 Sv/h$  mit vergleichbarer Elektronentemperatur wie das ‚worst-case‘-Spektrum genutzt. Solche hohen Dosisleistungen wurden in der Literatur für Hochleistungslaseranwendungen berechnet [18].

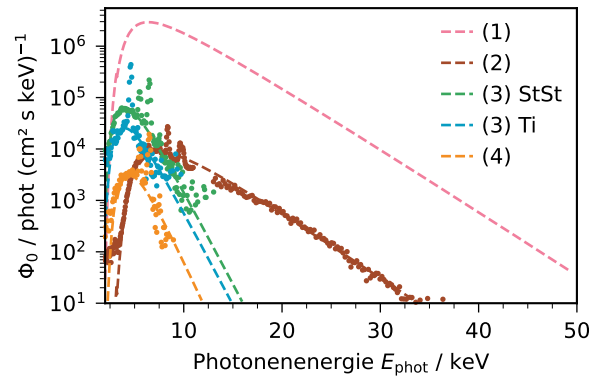


Abbildung 1: Spektrale Verteilung der laser-induzierten Röntgenstrahlung, vgl. Tabelle 1, aus eigenen Untersuchungen (3) und (4), siehe Sektion 4, der Literatur (2) [19] und einer theoretischen Bearbeitung (1) angelehnt an [18]. Die gestrichelten Linien zeigen die Verteilung nach MAXWELL-BOLTZMANN des Bremsstrahlungsanteils.

### 2.3. Berechnung der Röntgenstrahlungsbildschirmung

Die Ausbreitung der Ortsdosis wird aus den gemessenen spektralen Verteilungen der Röntgenstrahlung bestimmt. Diese Energiedosen (Qualitätsfaktor  $Q$  von 1 für Photonen) beschreiben die absorbierte Energie in einem Volumen in der Tiefe  $d_p$  im Gewebe der Dichte  $\rho_{tis}$  [20]. Die Richtungs-Äquivalentdosis

$$H'(d_p) = \frac{1}{\rho_{tis}} \int_0^{\infty} \Phi_0(E) \frac{E_{Phot}}{\Delta E} e^{-\mu_{tis}(E)d_p} \mu_{tis}(E) dE$$

kann aus dem normierten energiedispersiven Photonfluss  $\Phi_0$  (Röntgenspektrum) durch Integration berechnet werden. [18] Die Absorption des  $d_p$ -dicken Gewebes wird durch das LAMBERT-BEER'sche Gesetz berücksichtigt. Infolge der sehr weichen Röntgenstrahlung bei der Laserbearbeitung wird hier der Maximalwert ( $\Omega = 0$ ) der Richtungs-Äquivalentdosis in einer Tiefe von 0,07 mm betrachtet.

Ausgehend von den oben gezeigten spektralen Verteilungen kann der Einfluss der Ausbreitung in der Prozessumgebung, d. h. Atmosphäre und Einhausung, bestimmt werden. Die lineare Absorption der Strahlung wird durch die Aneinanderreihung von  $d_i$ -dicken Schichten

$$\frac{\Phi_1(E)}{\Phi_0(E)} = \prod_i e^{-\mu_i(E)d_i}$$

mittels der Absorptionskoeffizienten der Materialien  $\mu$  aus der NIST-Datenbank [21] bestimmt. Neben der der Absorption verringert sich der Fluss mit zunehmendem Abstand zur Strahlungsquelle. Unter Annahme einer Punktquelle reduziert sich der Photonfluss ausgehend vom Messort  $d_0$  durch das Abstandsgesetz

$$\frac{\Phi_1(E)}{\Phi_0(E)} = \frac{d_0^2}{(d_0 + \sum_i d_i)^2}$$

Durch diese simple Abschätzung der Ausbreitung der Röntgenstrahlung können neben der Berechnung mit

einlagigen Materialien auch Stapel von verschiedenen Materialien genutzt werden. Außerdem können dadurch auch Messungen in verschiedenen Abständen infolge der teilweise verschiedenen Messbedingungen an real existierenden Maschinen verglichen werden.

## 2.4. Validierung der Berechnung

Zur Überprüfung der gezeigten Berechnungsvorschrift wurden UKP-Laserbearbeitungsszenarien mit entstehender Röntgenstrahlung untersucht. Dazu wurde ein NIR-UKP-Laser ( $\lambda = 1030 \text{ nm}$ ,  $\tau_H = 600 \text{ fs}$ ,  $P_{av/\max} = 80 \text{ W}$ ) innerhalb einer vollumschlossenen Anlage in zwei verschiedenen Szenarien eingesetzt.

Zum einen wurde eine hochrepetierende Bearbeitung ( $f_P = 1,6 \text{ MHz}$ ,  $P_{av} = 30 \text{ W}$ ) mit einer Spitzenintensität von  $I_0 = (1,5 \pm 0,4) \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$  eingesetzt. Hierbei wurde eine Strahlbewegung durch einen Galvanometer-scanner durchgeführt und der Laserstrahl durch eine  $f$ -Theta Optik ( $f = 167 \text{ mm}$ ,  $w_{0,86} = 15,5 \mu\text{m}$ ) fokussiert. Die Pulsabstände während der unidirektionalen Bearbeitung lagen bei  $0,88 \mu\text{m}$  und Linienabstände von  $20 \mu\text{m}$  wurden genutzt. Die entstehende Röntgenstrahlung,

Spektrien (3) in Tabelle 1, bei der Bearbeitung von Edelstahl (X5CrNi18-10) und Titanlegierung (TiMo4) wurde untersucht und abgeschwächt, siehe Tabelle 1.

Zum anderen wurde eine Bearbeitung mit Festoptik, Spektrum (4), ( $f = 80 \text{ mm}$ ) und Achsenbewegung bei  $f_P = 5 \text{ kHz}$  und einem Pulsabstand von  $1 \mu\text{m}$  untersucht. Hier wurde ein bidirektionaler Prozess mit einer Spitzenintensität von  $I_0 = (7,8 \pm 0,6) \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$  auf den Edelstahlproben durchgeführt.

Die Validierung wurde durch die Abschirmung des Messgerätes mit dünnen Folien verschiedener Materialien durchgeführt. Dazu wurden Metallfolien, Aluminiumfolie mit  $13 \mu\text{m}$  und Messing-, Stahl- und Edelstahlfolie mit  $25 \mu\text{m}$ , verwendet und durch eine federbelastete Vorrichtung vor dem Messgerät gehalten. In der Messreihe (4) wurden außerdem Kunststofffolien aus Polyethylen (PE) und Polyethylenterephthalat (PET) verwendet. Diese wiesen mit  $200 \mu\text{m}$  bzw. einem mm dickere einzelne Lagen auf. Die Ergebnisse der Messungen stimmen gut mit den berechneten Werten überein, siehe Abbildung 2. Die initiale Messung des Spektrums  $d = 0$  wurde mit einem SILIX Spektrometer durchgeführt. Um den Einfluss des Messgerätes zu reduzieren, wurden die beiden Messserien (3) mit einem Ortsdosimeter OD-02 aufgezeichnet und die Messserie (4) mit dem SILIX durchgeführt. Der Einfluss der beiden Messgeräte ist im kleinen Dosisleistungsbereich unterhalb  $10 \mu\text{Sv/h}$  sichtbar. Die Werte mit dem OD-02 stimmen mit der Berechnung auch in diesem Bereich noch gut überein, wohingegen dass SILIX hier im Bereich der Ansprechschwelle rangiert.

## 3. Anwendungsmöglichkeiten

Durch die gute Übereinstimmung von den gemessenen Dosisleistungen mit den berechneten Werten können folgend verschiedenste Szenarien bezüglich der Anlagendimensionierung durchgespielt werden. Denkbare Möglichkeiten der Anwendung wären z.B.:

- Definition der Dicke der Schutzeinhausung von UKPL-Maschinen aus realen Messungen im F&E-Prozess oder bei Änderung der Prozessstrategie oder Upgrade der Laserquelle in existierenden Anlagen
- Entwicklung von Schutzwänden aus Schichtsystemen für ökonomische und ökologische Optimierung

### 3.1. Bestimmung der Schutzeinhausung

Bespiehhaft sollen ausgehend von den spektralen Verteilungen in Abschnitt 2.2 die Richtungs-Äquivalentdosisleistungen  $H'(0,07)$  auf die Vorgaben des StrlSchG abgeschwächt werden, um einen genehmigungs- und anzeigefreien Betrieb der Anlage zu ermöglichen. Dazu wird die Schichtdicke der Materialien stetig erhöht, bis die Forderung von maximal  $1 \mu\text{Sv/h}$  in  $10 \text{ cm}$  Abstand zur berührbaren Oberfläche an Luft erreicht wird. Aus der Fülle der zur Verfügung stehenden Materialien werden

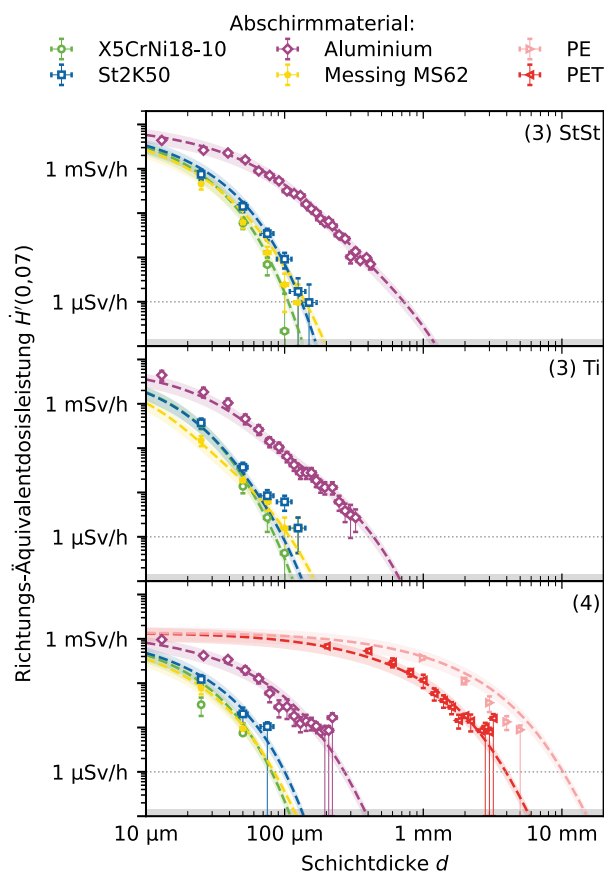


Abbildung 2: Validierung (Marker) der berechneten Dosisleistungsverläufe (gestrichelte Linien) infolge der Abschwächung durch verschiedene Materialien. Die Fehler zeigen die  $2\sigma$ -Abweichungen der Dosisleistungen und die farbigen Bereiche markieren einen  $\pm 20\%$ -Bereich der Berechnungen. Der graue Bereich ( $80 \pm 60 \text{ nSv/h}$ ) zeigt den Bereich der natürlichen Röntgenstrahlung im Labor zur Unterscheidung zwischen laser-induzierter und natürlicher Strahlung.

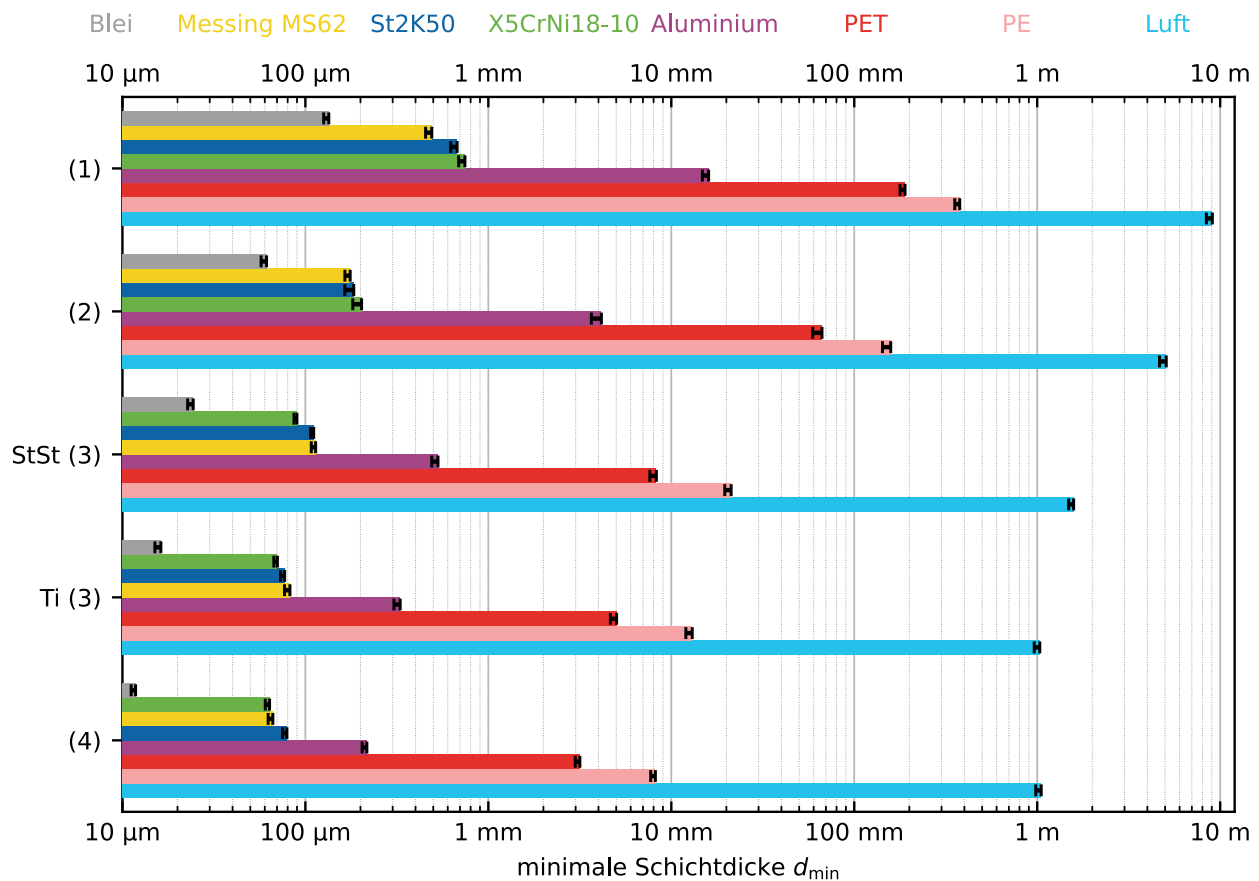


Abbildung 4: Minimale Schichtdicken von einlagigen Materialien zur Reduzierung der spektralen Verteilungen der laser-induzierten Röntgenstrahlung, siehe Tabelle 1 und Abbildung 1, auf  $H'(0,07) = 1 \mu\text{Sv/h}$  in 10 cm Abstand zur berührbaren Oberfläche an Luft ausgehend vom Messort  $d_0$ . Die Fehlerbalken geben den ermittelten Dickenbereich an, ausgehend von  $\pm 20\%$ -fehlerbehafteten Messung der spektralen Verteilung an  $d_0$ .

gängige Materialien für Schutzeinhausungen ausgewählt. Neben den Materialien aus den Untersuchungen in Abschnitt 2.4: Aluminium, Stahl, Edelstahl, Messing und den Kunststoffen PE und PET werden die Werte für Blei und an Luft bestimmt. Die Werte für Luft sollen dabei für einen offenen Betrieb der Anlage stehen.

In Bezug auf die realen spektralen Verteilungen, Tabelle 1 (2-4), zeigen die Berechnungen der minimalen Schichtdicken, Abbildung 4, dass die Metalle, wie z.B. Stahl, Edelstahl und Messing, die weiche laser-induzierte Strahlung bereits nach ca. 200 µm auf die gewünschte Dosisleistung reduziert haben. Im Falle des ‚worst-case‘-Spektrums, würde Blei mit ca. 70 µm die geringste Schichtdicke benötigen. Für Aluminium hingegen würde aufgrund der geringen Absorption eine Wandstärke von ca. 4,5 mm notwendig sein. Maschineneinhausungen von mehreren mm-Wandstärke sind jedoch unüblich und der Gewichtsvorteil einer Aluminiumwand würde hier durch die geringe Schutzwirkung zunichte gemacht. Für unsere Laserprozesse, Tabelle 1 (3) und (4), sind hingegen unter 500 µm Aluminium theoretisch ausreichend.

Beim Bremsstrahlungsspektrum, Tabelle 1 (1), würde im Vergleich deutlich mehr Material zur Abschirmung benötigt werden, da das Spektrum deutlich härter ist. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, kann durch die nicht

beachtete charakteristische Strahlung hier ein großer Fehler auftreten. Nichtsdestotrotz würde eine Stahlstärke von < 1 mm ausreichen, um die Röntgenstrahlung ausreichend abzuschwächen.

Von Einhausungen aus den Kunststoffen ist selbst bei der weichen Strahlung abzusehen bzw. würden eine mehrere 10 mm-dicke Wand notwendig werden, um eine ausreichende Schutzwirkung zu erzielen. Der Betrieb von offenen Anlagen hingegen würde einen Mindestabstand von mehreren Metern benötigen um die Strahlungsbelastung auf ein Niveau unterhalb von 1 µSv/h abzusenken. Da die berührbare Fläche aber in diesem Falle das Laserplasma wäre, würde eine Bauartzulassung nicht infrage kommen und auch hinsichtlich der Primär- und anderer Sekundärgefährdungen würde kein ausreichender Schutz entstehen.

### 3.2 Entwicklung von Schutzeinhausung

Neben der Wahl eines Materials mit genügend Schutzwirkung gegenüber der Röntgenstrahlung darf hier der Schutz von der Primärgefährdung der Laserstrahlung nicht unterschlagen werden. Untersuchungen mit hochbrillanter NIR-Laserstrahlung bei Hochleistungsprozessen zeigten, dass Aluminium eine höhere Widerstandskraft aufweist als Stahlwerkstoffe [22]. Dazu könnten spezielle Verbundplatten oder Mehrschichtkonzepte

genutzt werden, welche eine Kombination aus Laser- und Strahlenschutz darstellen.

#### 4. Zusammenfassung

Moderne Laseranlagen werden zunehmend mit Hochleistungslasern ausgestattet und benötigen neben dem Schutz gegen die primäre Gefährdung der Laserstrahlung auch einen Schutz gegen die auftretenden Sekundärgefährdungen. Bei Prozessen mit hochintensiver Laserstrahlung kann dabei Röntgenstrahlung in beträchtlich hohen Dosisleistungen entstehen. Der Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung wird durch das StrlSchG in Deutschland reglementiert. Dabei ist es für einen genehmigungs- und anzeigefreien Betrieb mit einer Bauartzulassung notwendig die Ortsdosisleistung auf  $1 \mu\text{Sv/h}$  in 0,1 m Entfernung zur berührbaren Oberfläche zu reduzieren. Infolge der komplexen Abhängigkeiten der Laser-, Prozess und Materialparameter auf die emittierte Röntgenstrahlung ist es schwierig eine allgemeingültige Vorhersage auf die mögliche Gefährdung zu treffen.

Um mögliche Schutzeinhausung der Maschinen zu charakterisieren, wurden hier verschiedene spektrale

Verteilungen von laser-induzierter Strahlung aus Grundlage genutzt, um die Abschirmwirkung von verschiedenen Materialien darzustellen. Die Berechnungen für diese Verteilungen zeigen, dass Metallen/Legierungen, wie Messing und Stahl, ab 1 mm Dicke eine ausreichende Schutzwirkung aufweisen und die Richtungs-Äquivalentdosisleistung  $H'(0,07)$  auf unterhalb von  $1 \mu\text{Sv/h}$  reduziert. Die Verwendung von Aluminium kann jedoch nur bedingt eine vergleichbare Abschirmung mit geringen Schichten unterhalb von 1 mm aufweisen. Infolge der geringen Absorption sollte von Kunststoff oder Luft (offene Anlage) abgesehen werden, um einen ausreichenden Schutz zu garantieren.

Die hiergezeigten Berechnungen sollen als Denkanstoß für die Auslegung von UKPL-Anlagen dienen, jedoch müssen die notwendigen Prüfungen der Schutzeinrichtung messtechnisch überprüft werden.

#### Kontakt Daten

Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Sebastian Kraft

kraft@hs-mittweida.de

#### Literaturverzeichnis

- [1] Legall, Herbert; Bonse, Jörn; Krüger, Jörg (2020): Review of X-ray exposure and safety issues arising from ultra-short pulse laser material processing in: *Journal of radiological protection: Official journal of the Society for Radiological Protection*.
- [2] Legall, Herbert; Bonse, Jörn; Krüger, Jörg (2021): Emission of X-rays during ultrashort pulse laser processing, Lasers in Manufacturing Conference. München.
- [3] Schille, Joerg; Kraft, Sebastian; Pflug, Theo; Scholz, Christian; Clair, Maurice; Horn, Alexander; Loeschner, Udo (2021): Study on X-ray Emission Using Ultrashort Pulsed Lasers in Materials Processing in: *Materials*, 14, 16, 1–18.
- [4] Barkauskas, V.; Plukis, A. (2022): Prediction of the irradiation doses from ultrashort laser-solid interactions using different temperature scalings at moderate laser intensities in: *Journal of radiological protection*, 42, 1.
- [5] Behrens, R.; Pullner, B.; Reginatto, M. (2019): X-Ray emission from materials processing lasers in: *Radiation protection dosimetry*, 183, 3, 361–374.
- [6] Garmatina, A. A.; Shubnyi, A. G.; Asadchikov, V. E.; Nuzdin, A. D.; Baranov, A. I.; Myasnikov, D. V.; Minaev, N. V.; Gordienko, V. M. (2021): X-ray generation under interaction of a femtosecond fiber laser with a target and a prospective for laser-plasma x-ray microscopy in: *Journal of Physics: Conference Series*, 2036, 1, 12037.
- [7] Holland, Julian; Weber, Rudolf; Sailer, Marc; Graf, Thomas (2022): Influence of Pulse Duration on X-ray Emission during Industrial Ultrafast Laser Processing in: *Materials*, 15, 6.
- [8] Kraft, Sebastian; Böttcher, Katrin; Bonse, Jörn; Schille, Jörg; Löschner, Udo; Krüger, Jörg (2023): Unwanted X-ray emission in ultrashort pulse laser processing, Lasers in Manufacturing Conference. München.
- [9] Legall, Herbert; Schwanke, Christoph; Bonse, Jörn; Krüger, Jörg (2019): The influence of processing parameters on X-ray emission during ultra-short pulse laser machining in: *Applied Physics A*, 125, 8.
- [10] Legall, Herbert; Schwanke, Christoph; Pentzien, Simone; Dittmar, Günter; Bonse, Jörn; Krüger, Jörg (2018): X-ray emission as a potential hazard during ultrashort pulse laser material processing in: *Journal of Applied Physics*, 124, 6.
- [11] Mosel, Philip; Sankar, Pranitha; Düsing, Jan Friedrich; Dittmar, Günter; Püster, Thomas; Jäschke, Peter; Vahlbruch, Jan-Willem; Morgner, Uwe; Kovacev, Milutin (2021): X-ray Dose Rate and Spectral Measurements during Ultrafast Laser Machining Using a Calibrated (High-Sensitivity) Novel X-ray Detector in: *Materials*, 14, 16.
- [12] Mosel, Philip; Sankar, Pranitha; Zulqarnain; Appi, Elisa; Jusko, Christoph; Zuber, David; Kleinert, Sven; Düsing, Jan; Mapa, Jose; Dittmar, Günter; Püster, Thomas; Böhmer-Brinks, Petra; Vahlbruch, Jan-Willem; Morgner, Uwe; Kovacev, Milutin (2022): Potential hazards and mitigation of X-ray radiation generated by laser-induced plasma from research-grade laser systems in: *Optics express*, 30, 20, 37038–37050.
- [13] Rucker, Jan; Fricke, Alexandra; Kahle, Martin (2022): Unwanted x-ray emission during ultra-short pulse laser material processing and the influence of processing parameters in: *Procedia CIRP*, 111, 850–854.
- [14] Schille, Jörg; Kraft, Sebastian; Kattan, Dany; Löschner, Udo (2022): Enhanced X-ray Emissions Arising from High Pulse Repetition Frequency Ultrashort Pulse Laser Materials Processing in: *Materials*, 15, 8.
- [15] Stolzenberg, Ulf; Schmitt Rahner, Mayka; Pullner, Björn; Legall, Herbert; Bonse, Jörn; Kluge, Michael; Ortner, Andreas; Hoppe, Bernd; Krüger, Jörg (2021): X-ray Emission Hazards from Ultrashort Pulsed Laser Material Processing in an Industrial Setting in: *Materials*, 14, 23.
- [16] Valle Brozas, F.; Crego, A.; Roso, L.; Peralta Conde, A. (2016): Laser-based X-ray and electron source for X-ray fluorescence studies in: *Applied Physics B*, 122, 8.

- [17] Holland, Julian; Weber, Rudolf; Hagenlocher, Christitan; Graf, Thomas (2023): Process monitoring during ultrafast laser processing by means of soft X-ray emission, Lasers in Manufacturing Conference. München.
- [18] Weber, Rudolf; Giedl-Wagner, Roswitha; Förster, Daniel J.; Pauli, Anton; Graf, Thomas; Balmer, Jürg E. (2019): Expected X-ray dose rates resulting from industrial ultrafast laser applications in: *Journal of Applied Physics*, 125, 9.
- [19] Böttcher, Katrin; Schmitt Rahner, Mayka; Stolzenberg, Ulf; Kraft, Sebastian; Bonse, Jörn; Feist, Carsten; Albrecht, Daniel; Pullner, Björn; Krüger, Jörg (2022): Worst-Case X-ray Photon Energies in Ultrashort Pulse Laser Processing in: *Materials*, 15, 24.
- [20] Krieger, Hanno (2013): *Strahlungsmessung und Dosimetrie*.
- [21] Seltzer, Stephen (1995): Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients, NIST Standard Reference Database 126.
- [22] Weinhold, Sebastian (2008): Inbetriebnahme eines 3 kW Faserlasers unter Beachtung der Lasersicherheit und erste Versuche zum Lasertiefschweißen. Diplomarbeit. Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences. Mittweida. Laserinstitut Hochschule Mittweida.