

**Spektren und Dosisleistungen der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS)  
im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung  
von  
Edelstahl, Kupfer, Aluminium-Legierung, Molybdän und Wolfram**

Dieser Beitrag ist die Fortsetzung der Teile 1<sup>1</sup> und 2<sup>2</sup> der Information  
„Gefährliche Exposition von Röntgenstrahlung  
bei der Materialbearbeitung unter Schutzgas mit einer UKP-Laseranlage“  
(<https://www.researchgate.net/profile/Guenter-Dittmar>)

## Gliederung

Abbildungsverzeichnis.....	2
Tabellenverzeichnis.....	2
1 Einleitung.....	2
2 Versuchsaufbau und Messgerät.....	2
2.1 Eigenschaften des Messgerätes SILIX.....	7
2.2 Kennwerte des Laserstrahls und Verfahrensparameter bei den Versuchen.....	8
3 Ergebnisse der Messungen.....	8
3.1 Bearbeitung von Edelstahl: Spektrum und 3 Dosisleistungen.....	8
3.2 Bearbeitung von Kupfer: Spektrum und 3 Dosisleistungen.....	9
3.3 Bearbeitung von Molybdän: Spektrum und 3 Dosisleistungen.....	10
3.4 Bearbeitung von Aluminium-Legierung: Spektrum und 3 Dosisleistungen.....	11
3.5 Bearbeitung von Wolfram-Platte: Spektrum und 3 Dosisleistungen.....	12
4 Bewertung der Laseranlage nach dem StrlSchG.....	13
5 Literatur.....	14

---

<sup>1</sup> Der Teil 1 „Information von Messungen der Röntgenstrahlung mit einem sofort anzeigenden Spektrodosimeter“

<sup>2</sup> Der Teil 2 „Vergleich der Messergebnisse von der UKP-Laserbearbeitung aus dem Teil 1 mit den Vorgaben aus Verordnungen und Gesetzen zum Strahlenschutz, Vergleich der Messergebnisse mit den Vorgaben durch Verordnung und Gesetz“, Veröffentlicht am 22.11.2024 in  
<https://www.researchgate.net/profile/Guenter-Dittmar>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektrodosimeter SILIX in Messposition, Zustand: Laser nicht eingeschaltet, blauer Pfeil: Richtung des Laserstrahls, senkrechte Einstrahlung von oben.....	4
Abbildung 2: Prinzipskizze der Laseranlage und dem Messaufbau während der Strahlungsdurchgangsprüfung der Schutzumhausung.....	4
Abbildung 3: Transmission der LIS beim Durchgang durch das Schutzgas Argon (Quelle: CXRO X-Ray Interactions With Matter) .....	5
Abbildung 4: Transmission der LIS beim Durchgang durch das Polycarbonat-Fenster (Quelle: CXRO X-Ray Interactions With Matter) .....	6
Abbildung 5: Transmission der LIS beim Durchgang durch die Luft (Quelle: CXRO X-Ray Interactions With Matter).....	6
Abbildung 6: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Edelstahl.....	9
Abbildung 7: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Kupfer.....	10
Abbildung 8: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Molybdän.....	11
Abbildung 9: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung einer Aluminium-Magnesium-Legierung .....	12
Abbildung 10: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Wolfram .....	13

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten des Spektrodosimeters SILIX lamda .....	7
Tabelle 2: Dosisleistung bei der Bearbeitung der Edelstahlplatte unter Argon-Atmosphäre.....	8
Tabelle 3: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Kupferplatte unter Argon-Atmosphäre .....	9
Tabelle 4: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Molybdänplatte unter Argon-Atmosphäre .....	10
Tabelle 5: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Platte aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung unter Argon-Atmosphäre.....	11
Tabelle 6: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Wolfram-Platte unter Argon-Atmosphäre.....	12

## 1 Einleitung

Im Wissenschaftsportal [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) wurde am 23.11.2024 der 1. Teil unter dem Titel „Gefährliche Exposition von Röntgenstrahlung bei der Materialbearbeitung unter Schutzgas mit einer UKP-Laseranlage“ veröffentlicht, [Dittmar-11-2024]. Im Teil 2 „Vergleich der Messergebnisse mit den Vorgaben durch Verordnungen und Gesetze“, der am 7.12.24 ebenfalls in [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) veröffentlicht wurde, werden die Schlussfolgerungen aus der Sicht des Strahlenschutzes diskutiert.

## 2 Versuchsaufbau und Messgerät

Mit den nachfolgenden Bildern und Diagrammen werden Informationen bereitgestellt, die für zukünftige Auswertungen genutzt werden können.

### Vom Ultrakurzpuls-Laserstrahl bearbeitete Metalle:

Im diesem 3. Teil der Veröffentlichung werden die Versuchsergebnisse nicht nur vom Bearbeiten von Platten aus Wolfram, sondern auch von anderen Metall-Platten dargestellt, zum Beispiel Edelstahl 1.4401,

Aluminium-Magnesium-Legierung, Molybdän und Kupfer. Es ist nicht bekannt, ob die Platten aus reinem Molybdän und reinem Kupfer bestanden oder ob sie noch andere Metalle enthielten.

#### Verwendetes Messgerät und dessen Standort:

Die Spektren der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) und die Richtungs-Äquivalentdosisleistung für die Haut  $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ , die Richtungs-Äquivalentdosisleistung für das Auge  $\dot{H}'(3, \Omega)$  und die Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Körper  $\dot{H}^*(10)$  wurden mit einem Spektrodosimeter SILIX lamda gemessen. Die wichtigsten Eigenschaften des Messgerätes sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Das Spektrodosimeter war vom Hersteller rückführbar kalibriert und vor dem Einsatz am 23.5.2024 mit einem Aktivitätsnormal überprüft worden.

#### Geometrische Ausrichtung des Spektrodosimeters:

Das Spektrodosimeter SILIX wurde an der kritischsten Stelle im Personenraum positioniert, d.h. vor dem Polycarbonat-Fenster. Der Messaufbau ist in den Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

Das Kunststoff-Fenster hat im Vergleich zur Aluminium-Platte des Schutzgehäuses wesentlich geringere spektrale Schwächungskoeffizienten, [Hubbell, 1996]. Außerdem ist das Polycarbonat-Fenster dünner als die Aluminium-Platte. Der Abstand vom Messsensor bis zum Polycarbonat-Fenster betrug 10 cm. Der Abstand im Inneren der Box zwischen dem Polycarbonat-Fenster und dem Fokuspunkt des Laserstrahls lag bei 15 cm.

Zur Bestimmung der höchstmöglichen Dosisleistung im Personalbereich wurde das Spektrodosimeter so ausgerichtet, dass es durch das Polycarbonat-Fenster hindurch auf den Laserfokus gerichtet war. Die Neigung des Spektrodosimeters wäre optimal, wenn es unter einem Winkel von etwa 30° auf die zu bearbeitende Platte gerichtet gewesen wäre. Es konnte aber nur ein Neigungswinkel mit 16° von oben auf die Bearbeitungsebene genutzt werden, weil die Polycarbonat-Platte nicht groß genug war.

#### Struktur der Laserlinien auf den Metallplatten:

Der Laserscanner erzeugte auf der zu bearbeitenden Metall-Platte parallele Linien, die einen Abstand von 100 µm hatten. Die Linienbreite betrug etwa 20 µm, so dass die Linien getrennt voneinander waren. Während einer Bearbeitungsdauer von 120 s wurde das Scan-Feld bis zu 40-mal vom Laser überfahren und die Linien wurden schrittweise tiefer. Das Verhältnis von Vorlaufdauer zur kurzer Rücklaufdauer wurde zwischen 10 zu 1 und 1:1 variiert. Das Spektrodosimeter hatte einen seitlichen Winkel von 25° zu den senkrecht verlaufenden Lasergräben, so dass die Grabenränder die Ausbreitung der LIS behinderten. Die gemessene Dosisleistung wäre größer gewesen, wenn das Spektrodosimeter eine steilere Stellung von ca. 30° und eine exakte Ausrichtung in die Lasergräben hinein gehabt hätte.

#### Versuchsbedingungen:

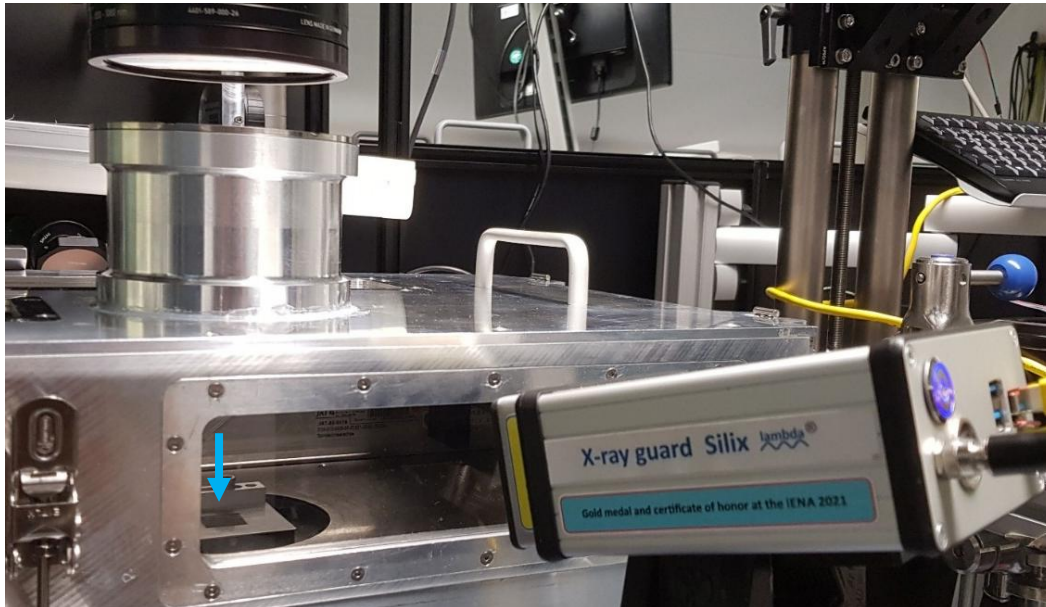
Zur Erzeugung des Worst Case (höchster gemessener Wert der Dosisleistung) wurden absichtlich Laserleistungen eingestellt, die über dem bestimmungsgemäßen Gebrauch der Laseranlage lagen. Der Anwendungsbereich der Laseranlage ist die laserunterstützte Pulver-Bett-Bearbeitung von hochschmelzenden Metallen unter einer Argon-Atmosphäre, [Kohl 2024].

Der Laserraum ist eine gasdichte Kammer, durch die das Schutzgas Argon mit geringem Überdruck ständig hindurchströmt. Das Argon hatte einen großen Einfluss auf die Ausbildung des laserinduzierten Plasmas,

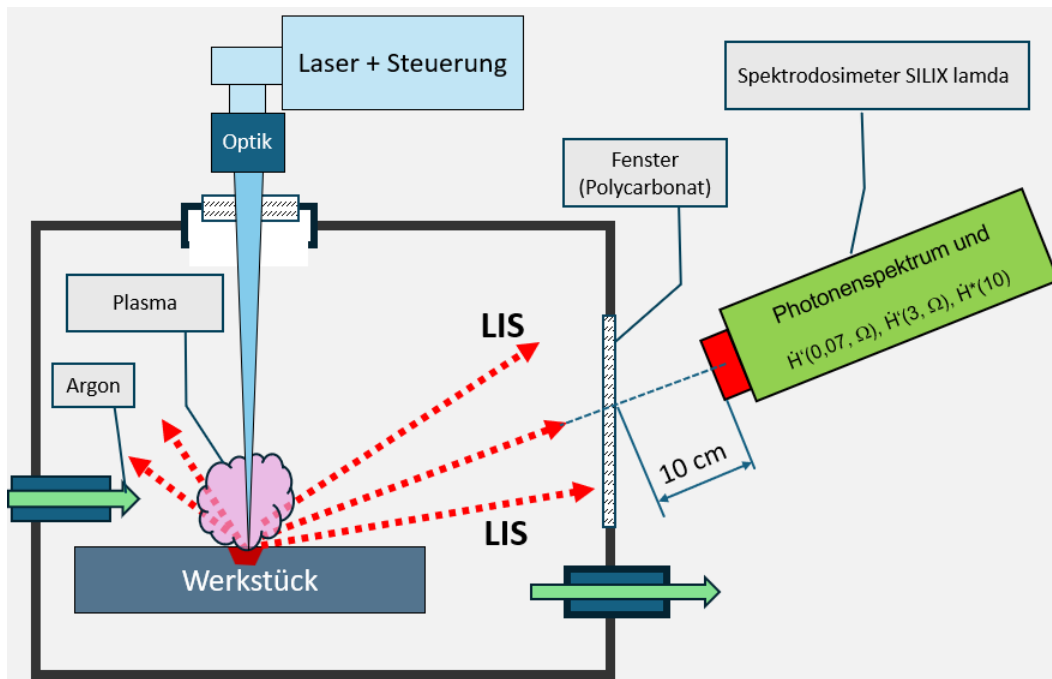
wenn eine Bestrahlungsstärke im Bereich von  $> 5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  genutzt wird.

Der Laserscanner (Baugruppe: Optik) befindet sich über der Schutzgas-Kammer. Durch einen Tubus mit einer hermetisch abschließenden Glasplatte wird der aufgeweitete Laserstrahl in den Arbeitsraum eingestrahlt. Nur im Arbeitsraum ist der Laserstrahl auf dem Werkstück fokussiert.

Die Wände der Schutzgas-Kammer bestehen aus Aluminium-Platten mit Fenstern aus durchsichtigem Polycarbonat ( $\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$ ).



**Abbildung 1: Spektrosdosimeter SILIX in Messposition, Zustand: Laser nicht eingeschaltet, blauer Pfeil: Richtung des Laserstrahls, senkrechte Einstrahlung von oben**



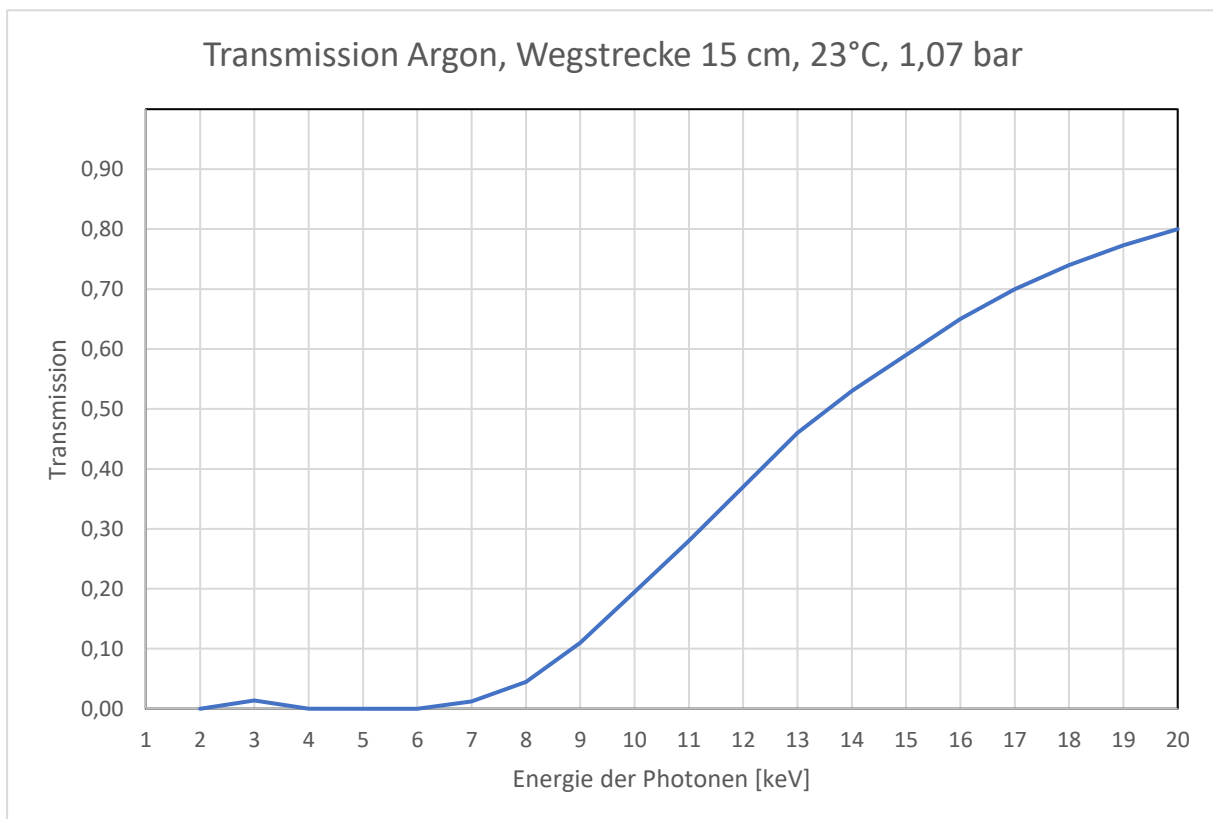
**Abbildung 2: Prinzipskizze der Laseranlage und des Messaufbaus während der Strahlungsdurchgangsprüfung der Schutzumhausung**

Die Transmissionseigenschaften des Polycarbonat-Fensters und der Gase (Luft und Argon), die die laserinduzierte ionisierende Strahlung (LIS) auf dem Weg von der Entstehungsstelle bis zum Eintrittsfenster des Messgerätes schwächen, werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Die Schichtdicke des Argon-Gases wurde mit 15 cm angenommen. Der Gasdruck lag etwas über dem normalen Luftdruck im Labor. In der Abbildung 3 ist gut erkennbar: Je geringer die Energie der Photonen der LIS ist, desto größer ist ihre Absorption im Argon-Gas.

Die energiedispersive Transmission des Kunststoff-Fensters wird in der Abbildung 4 dargestellt. Sie hat einen ähnlichen Verlauf wie die Kurve für das Argon-Gas. Die geringe Transmission des Polycarbonat-Fensters unterhalb von 8 keV vermindert die am Spektrodosimeter ankommende Photonenzahl. Unterhalb von 5 keV ist die Kunststoff-Scheibe praktisch undurchlässig.

Die Luftschichtdicke zwischen dem Fenster und dem Messgerät beträgt 10 cm. Bei der Berechnung der Transmission wurde ein Luftdruck von einem Bar und eine Temperatur von 23°C angenommen. Auch hier zeigt sich, dass die energieschwachen Photonen stärker absorbiert werden als die Photonen mit einer höheren Energie, Abbildung 5.



**Abbildung 3: Transmission der LIS beim Durchgang durch das Schutzgas Argon (Quelle: [CXRO X-Ray Interactions With Matter](#))**

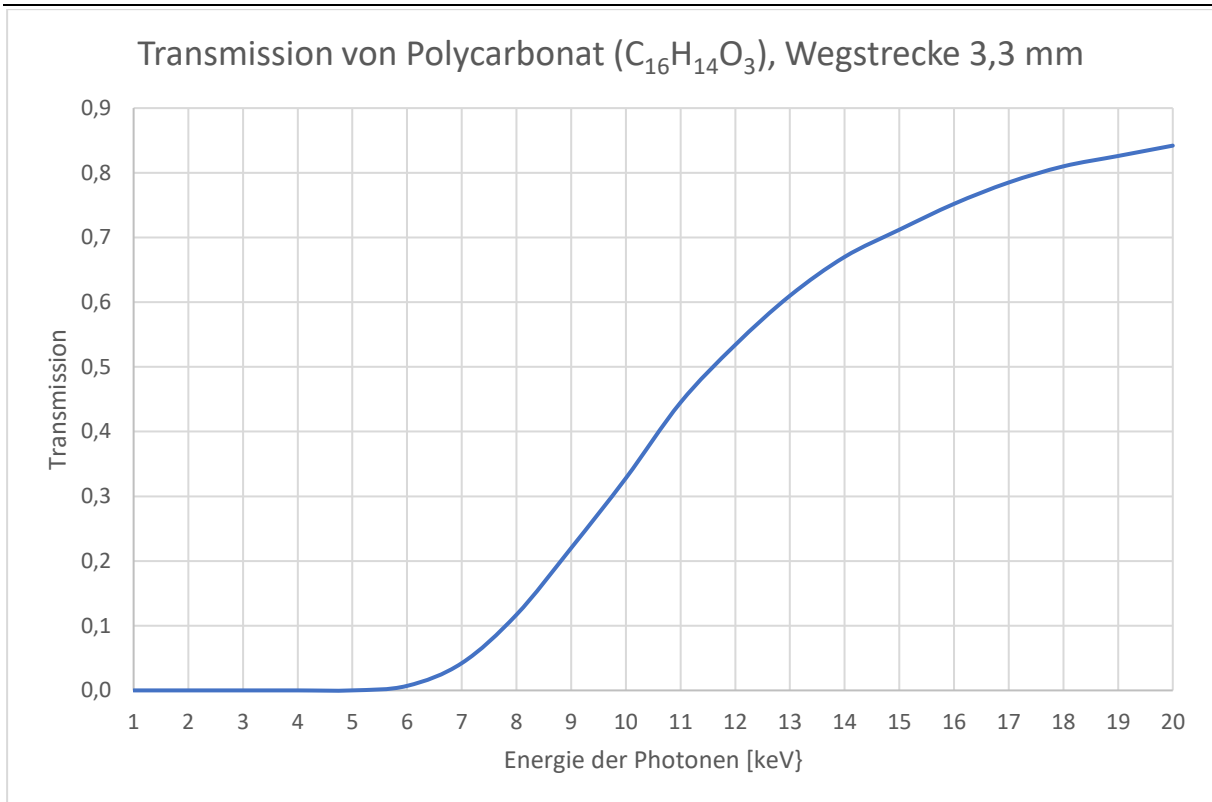


Abbildung 4: Transmission der LIS beim Durchgang durch das Polycarbonat-Fenster (Quelle: [CXRO X-Ray Interactions With Matter](#))

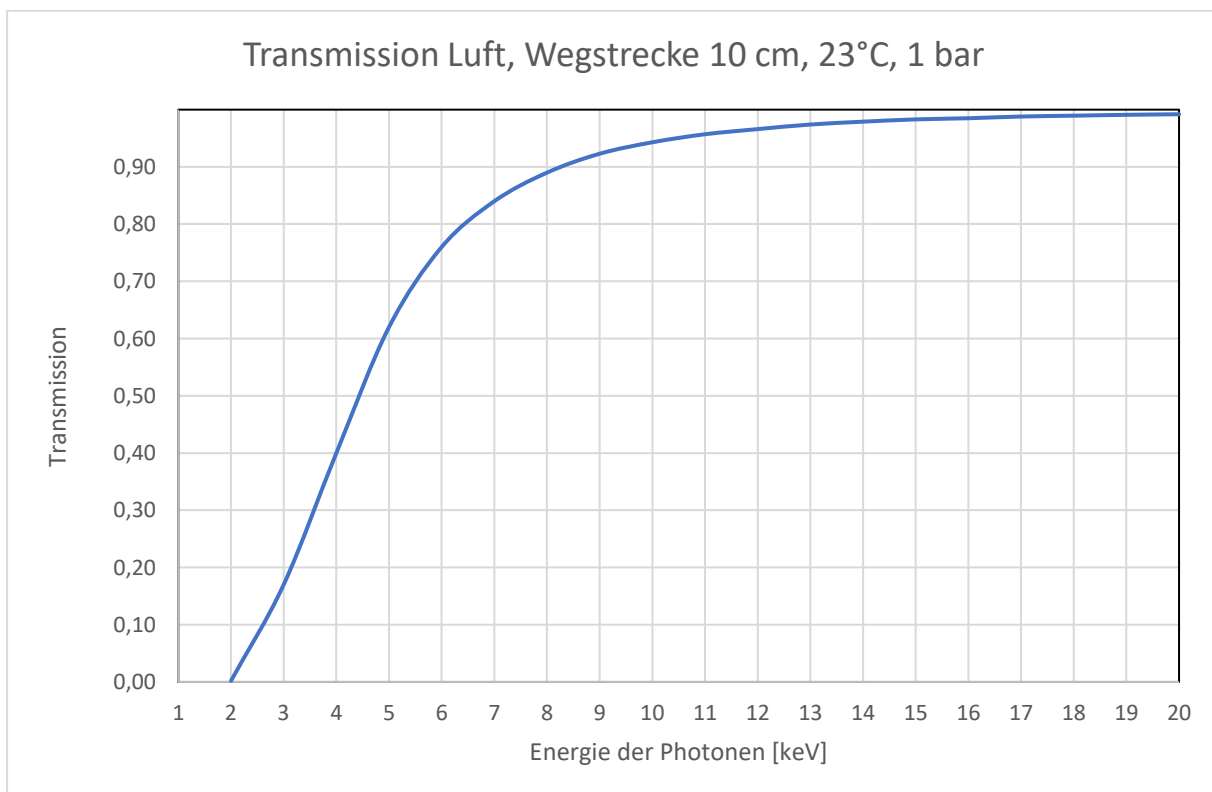


Abbildung 5: Transmission der LIS beim Durchgang durch die Luft (Quelle: [CXRO X-Ray Interactions With Matter](#))

## 2.1 Eigenschaften des Messgerätes SILIX

Als Messgerät zur Bestimmung des Photonenspektrums, der 3 Dosisleistungen und 3 Dosen wurde ein speziell für UKP-Laser entwickeltes Spektrodosimeter eingesetzt. Die Eigenschaften des SILIX lamda werden in [Dittmar 9-2024] beschrieben.

*Anmerkung: Ein Exemplar des Spektrodosimeters mit Laptop und Zubehör kann auch für Messungen an Interessenten ausgeliehen werden.*

Mit dem Spektrodosimeter SILIX lamda können die Messergebnisse in Echtzeit dargestellt werden. Dazu wird das Spektrodosimeter SILIX lamda über ein LAN-Kabel mit einem zur Verfügung gestellten Laptop verbunden. Die Fernsteuerung ermöglicht einen sicheren Betrieb beim Messen, selbst dann, wenn ein Strahlenschutzbereich nach § 52 StrlSchV eingeführt werden muss. Die Kabellänge kann bis zu 30 m betragen, so dass aus einer sicheren Entfernung die Messungen durchgeführt werden können.

**Tabelle 1: Technische Daten des Spektrodosimeters SILIX lamda**

• Messbereich der Photonenenergie: 2 keV bis 20 keV.
• Spektrale Auflösung: FWHM = 0,24 keV.
• Fehler bei der Angabe der Photonenenergie: $< \pm 0,1$ keV.
• Anzeigebereiche für Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07)$ und $\dot{H}'(3)$ : von 1 $\mu\text{Sv/h}$ bis 6000 mSv/h.
• Anzeigebereiche für Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ : von 1 $\mu\text{Sv/h}$ bis 1000 mSv/h.
• Messzeit: Einstellbar von 0,1 Sekunden bis 8 Sekunden und Dauerbetrieb
• Messfläche: 0,1 cm <sup>2</sup>
• Winkelabhängigkeit: 5% Abweichung von Cos-Funktion im Bereich von 45°.
• Abmessungen: L x B x H = 160 x 105 x 70 mm <sup>3</sup> .
• Masse: 740 g.
• Stromversorgung mit einem Netzteil: 5 V, 3 A.

Das Spektrodosimeter SILIX lamda wird in Kleinserie unter strenger Qualitätskontrolle gefertigt. Drei einzelne Spektrodosimeter SILIX wurden am Referenzstrahler der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig kalibriert. Die bei diesem Vorgang erzeugten Referenzdateien sind in jedem nachfolgenden Spektrodosimeter SILIX hinterlegt und werden als Vergleich bei jeder Messung genutzt. Das Spektrodosimeter SILIX ist das einzige auf dem Markt befindliche Spektrodosimeter, dass gleichzeitig alle 3 Ortsdosisleistungen  $\dot{H}'(0,07)$ ,  $\dot{H}'(3)$ ,  $\dot{H}^*(10)$ , alle 3 Ortsdosen  $H'(0,07)$ ,  $H'(3)$ ,  $H^*(10)$  und das Photonenspektrum mit hoher Genauigkeit ermittelt und mit geringer Verzögerung anzeigt. Vor der Auslieferung wird jedes Spektrodosimeter SILIX zusätzlich mit zwei verschiedenen Aktivitätsnormalen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt abgeglichen. Das Spektrodosimeter SILIX überwacht sich selbst und meldet automatisch eigene Fehler, wie Übersteuerung, Alterung, Kabelfehler usw. Im Spektrodosimeter SILIX werden alle Messdaten im Modus 24/7 abgespeichert. Beim Messen kann in einem zweiten Messfenster auf dem Bildschirm des Laptops zeitgleich eine ausgewählte Messgröße zusätzlich als Funktion der Zeit dargestellt werden. Zeitliche Veränderungen der Emission der LIS oder Instabilitäten des Laserstrahls sind so schnell erkennbar.

## 2.2 Kennwerte des Laserstrahls und Verfahrensparameter bei den Versuchen

Die Laseranlage wurde mit einem UKP-Laser Typ AFS der Active Fiber Systems GmbH, 07745 Jena, betrieben. Der fokussierte Laserstrahl hatte folgende Eigenschaften:

Mittlere Laserleistung bis 150 W,

konstante Laserwellenlänge 1030 nm,

Pulsdauer von 0,25 ps bis 20 ps,

Pulswiederholffrequenz von 200 kHz bis 32,5 MHz,

konstante Brennweite des Scanner-Objektivs  $f = 163$  mm,

konstanter Durchmesser  $D = 12$  mm des Laserstrahles vor dem Fokussierobjektiv,

berechneter Durchmesser  $d = 20$   $\mu$ m des Laserstrahls im Fokus (Annahme: Gaußstrahl),

berechnete maximale Bestrahlungsstärke im Laserpuls:  $1,3 \times 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>,

Scangeschwindigkeit beim Materialabtrag: 250 mm/s bis 3000 mm/s,

Scangeschwindigkeit beim Rücklauf: 3000 mm/s, Zeilenabstand der Laserlinien: 100  $\mu$ m und damit größer als der Fokusedurchmesser. Der Fokuslage über dem Werkstück wurde variiert.

## 3 Ergebnisse der Messungen

Alle Personen befanden sich bei den Messungen in einem großen Abstand von der Laseranlage, so dass die Dosisleistung an diesem Aufenthaltsort der natürlichen lokalen Ortsdosisleistung entsprach. Die Messstelle Jena hatte am 23.5.2024 eine Tagesmittelwert der Ortsdosisleistung von 0,11  $\mu$ Sv/h registriert. Zuerst wurden Stahlplatten bearbeitet und danach Platten aus Wolfram, Aluminium, Molybdän und Kupfer. Es wurde kein Metallpulver als Target benutzt. In den nachfolgenden Abbildungen werden die Spektren der jeweils maximalen Dosisleistungen der unterschiedlichen Metalle dargestellt.

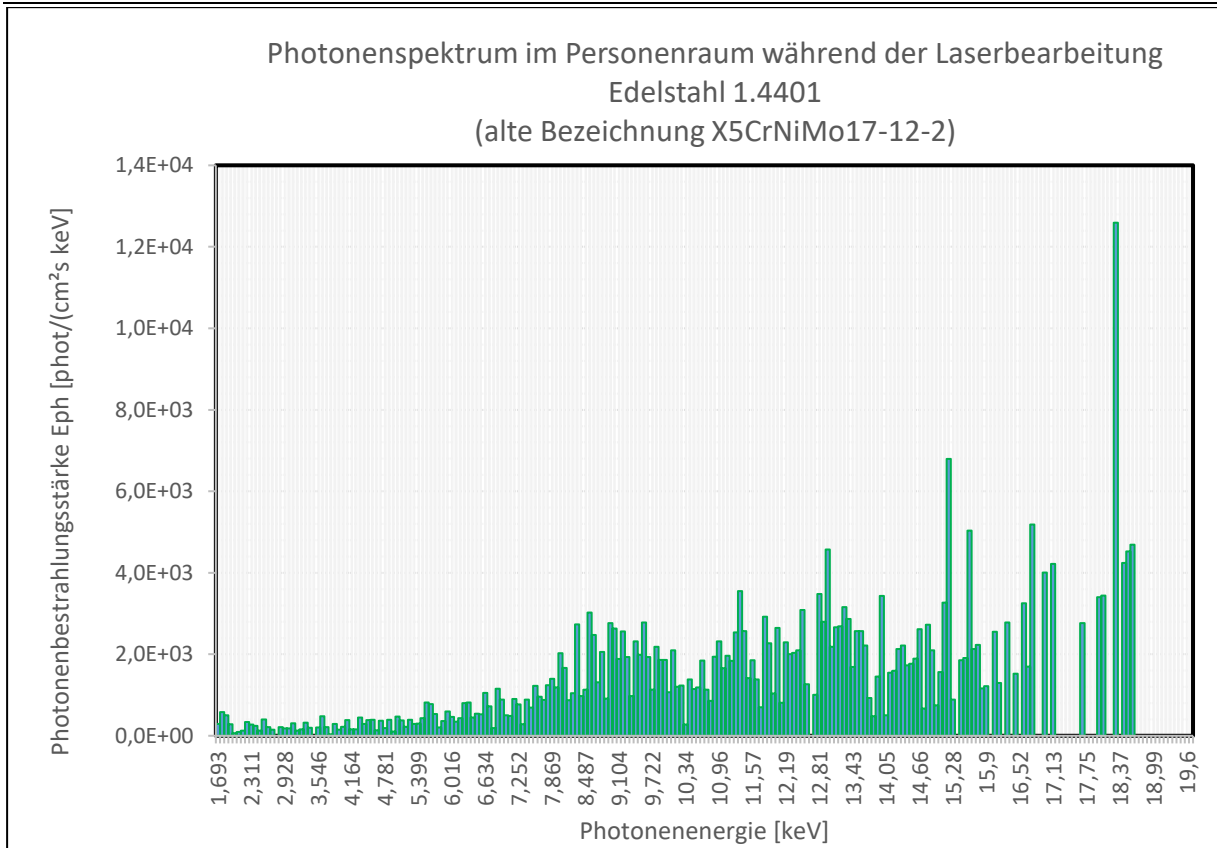
### 3.1 Bearbeitung von Edelstahl: Spektrum und 3 Dosisleistungen

Der Werkstoff Edelstahl 1.4401 bzw. mit der alten Bezeichnung X5CrNiMo17-12-2, ist ein nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl und weist einen Chrom-Gehalt bis 18,5 %, einen Mangangehalt bis 2%, einen Nickelgehalt bis 13 % und einen Molybdängehalt bis 2,5 % sowie einen Kohlenstoffgehalt von max. 0,07 % auf.

**Tabelle 2: Dosisleistung bei der Bearbeitung der Edelstahlplatte unter Argon-Atmosphäre**

<p style="text-align: center;"><b>Dosisleistungen</b> Versuch Afs_003-3</p>	<p style="text-align: center;"><b>Kurzzeitiger maximaler Messwert im Personenraum im Abstand von 10 cm vor der Schutzgas-Box.</b> Messdauer für den Maximalwert: 8 Sekunden</p>
<p>Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 0,07 Millimeter Tiefe für die Haut <math>\dot{H}'(0,07, \Omega)</math>.</p>	<p style="text-align: center;">503 <math>\mu</math>Sv/h.</p>
<p>Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 3 Millimeter Tiefe für das Auge <math>\dot{H}'(3, \Omega)</math>,</p>	<p style="text-align: center;">145 <math>\mu</math>Sv/h.</p>
<p>Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Körper <math>\dot{H}^*(10)</math></p>	<p style="text-align: center;">97 <math>\mu</math>Sv/h.</p>





**Abbildung 6: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Edelstahl**

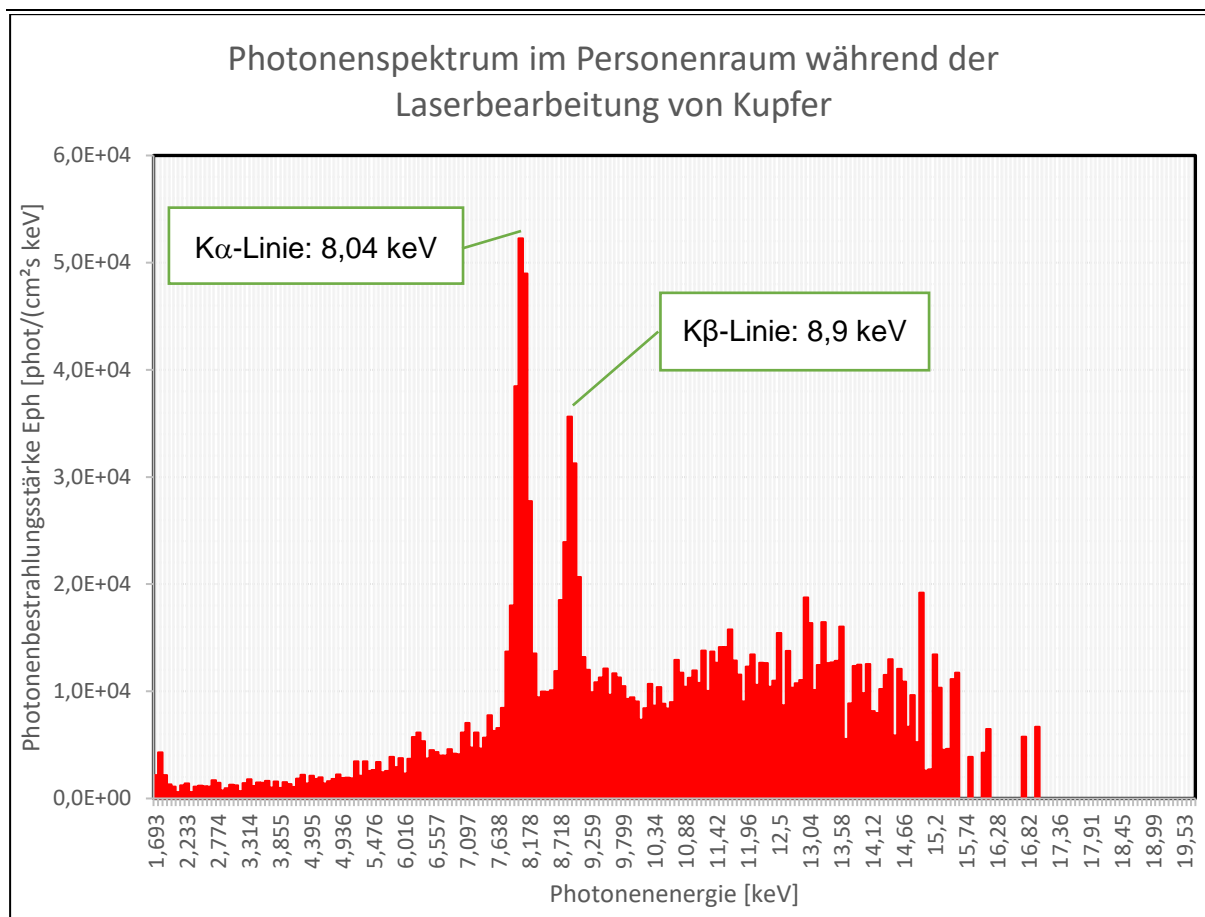
Das üblicherweise spektral breite Bremsstrahlungsspektrum wurde im Energiebereich < 10 keV beim Durchgang durch die Polycarbonat-Platte stark geschwächt.

### 3.2 Bearbeitung von Kupfer: Spektrum und 3 Dosisleistungen

Es gab keine Kenntnisse zu den Legierungsanteilen und der Reinheit der Kupferplatte.

**Tabelle 3: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Kupferplatte unter Argon-Atmosphäre**

Dosisleistungen Versuch Afs_009_Cu	Kurzzeitiger maximaler Messwert im Personenraum im Abstand von 10 cm vor der Schutzgas-Box. Messdauer für den Maximalwert: 8 Sekunden
Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 0,07 Millimeter Tiefe für die Haut $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ .	3430 $\mu\text{Sv/h}$ .
Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 3 Millimeter Tiefe für das Auge $\dot{H}'(3, \Omega)$ ,	683 $\mu\text{Sv/h}$ .
Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Körper $\dot{H}^*(10)$	282 $\mu\text{Sv/h}$ .



**Abbildung 7: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Kupfer**

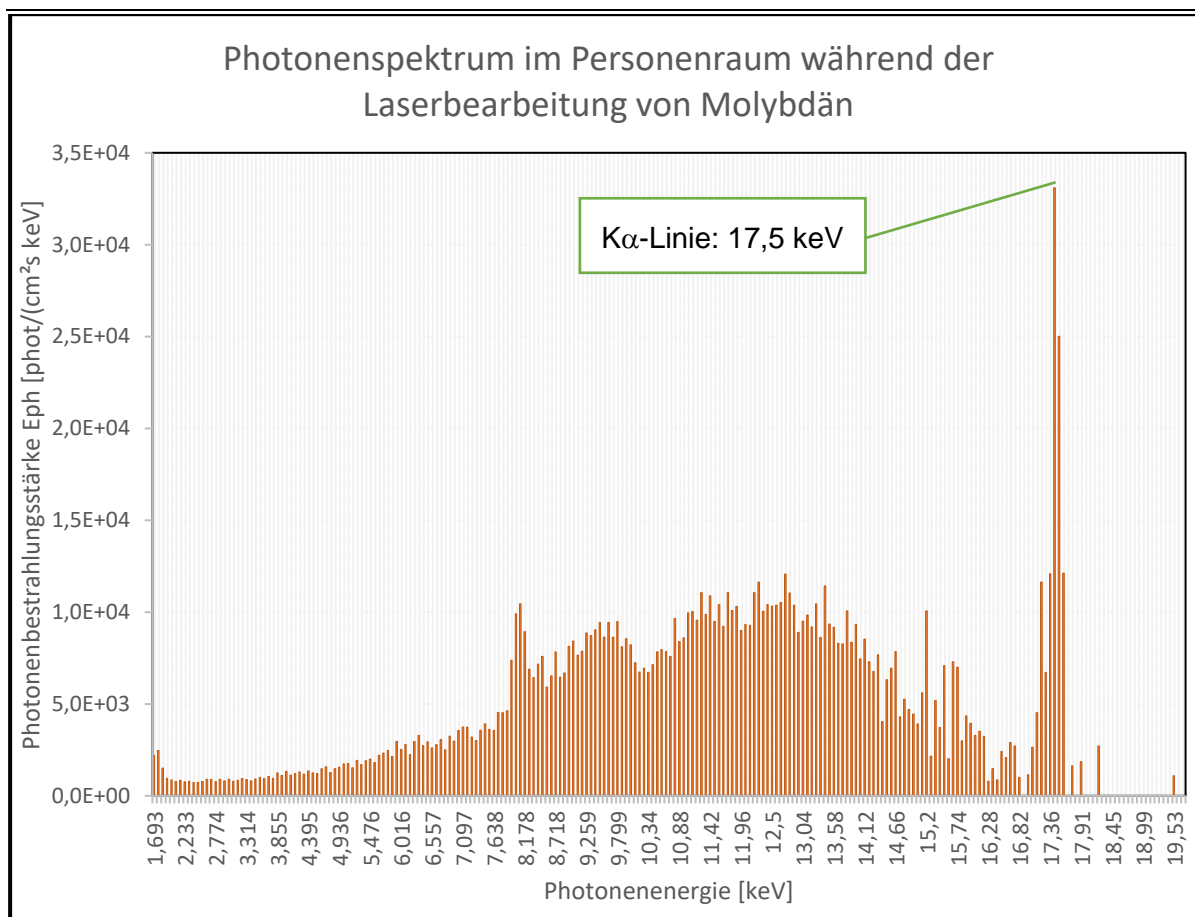
Das üblicherweise spektral breite und hohe Bremsstrahlungsspektrum bei der Bearbeitung von Kupfer wurde im Energiebereich < 10 keV beim Durchgang durch die Polycarbonat-Platte stark geschwächt.

### 3.3 Bearbeitung von Molybdän: Spektrum und 3 Dosisleistungen

Kenntnisse zu den Legierungsanteilen und der Reinheit der Molybdänplatte lagen nicht vor.

**Tabelle 4: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Molybdänplatte unter Argon-Atmosphäre**

<b>Dosisleistungen</b> Versuch Afs_008-3_Mo	<b>Kurzzeitiger maximaler Messwert im Personenraum im Abstand von 10 cm vor der Schutzgas-Box.</b> Messdauer für den Maximalwert: 8 Sekunden
Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 0,07 Millimeter Tiefe für die Haut $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ .	2170 $\mu\text{Sv/h}$ .
Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 3 Millimeter Tiefe für das Auge $\dot{H}'(3, \Omega)$ ,	552 $\mu\text{Sv/h}$ .
Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Körper $\dot{H}^*(10)$	301 $\mu\text{Sv/h}$ .



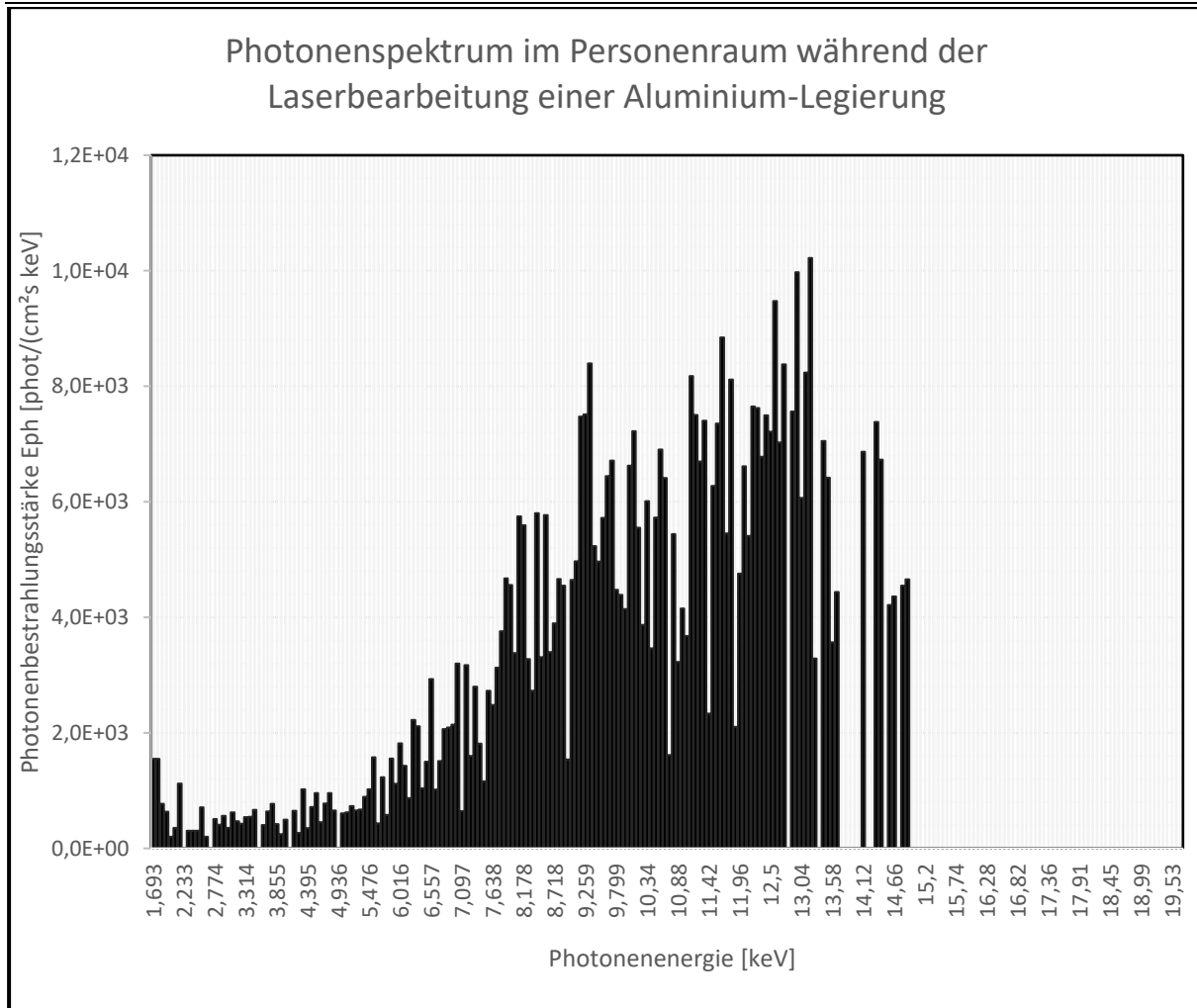
**Abbildung 8: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Molybdän**

### 3.4 Bearbeitung von Aluminium-Legierung: Spektrum und 3 Dosisleistungen

Es ist anzunehmen, dass die Aluplatte aus der üblichen Legierung AlMg5 bestand.

**Tabelle 5: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Platte aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung unter Argon-Atmosphäre**

<p><b>Dosisleistungen</b> Versuch Afs_007_AI</p>	<p><b>Kurzzeitiger maximaler Messwert im Personenraum im Abstand von 10 cm vor der Schutzgas-Box.</b> Messdauer für den Maximalwert: 8 Sekunden</p>
<p>Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 0,07 Millimeter Tiefe für die Haut <math>\dot{H}'(0,07, \Omega)</math>.</p>	<p>1155 <math>\mu\text{Sv/h}</math>.</p>
<p>Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 3 Millimeter Tiefe für das Auge <math>\dot{H}'(3, \Omega)</math>,</p>	<p>253 <math>\mu\text{Sv/h}</math>.</p>
<p>Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Körper <math>\dot{H}^*(10)</math></p>	<p>90 <math>\mu\text{Sv/h}</math>.</p>



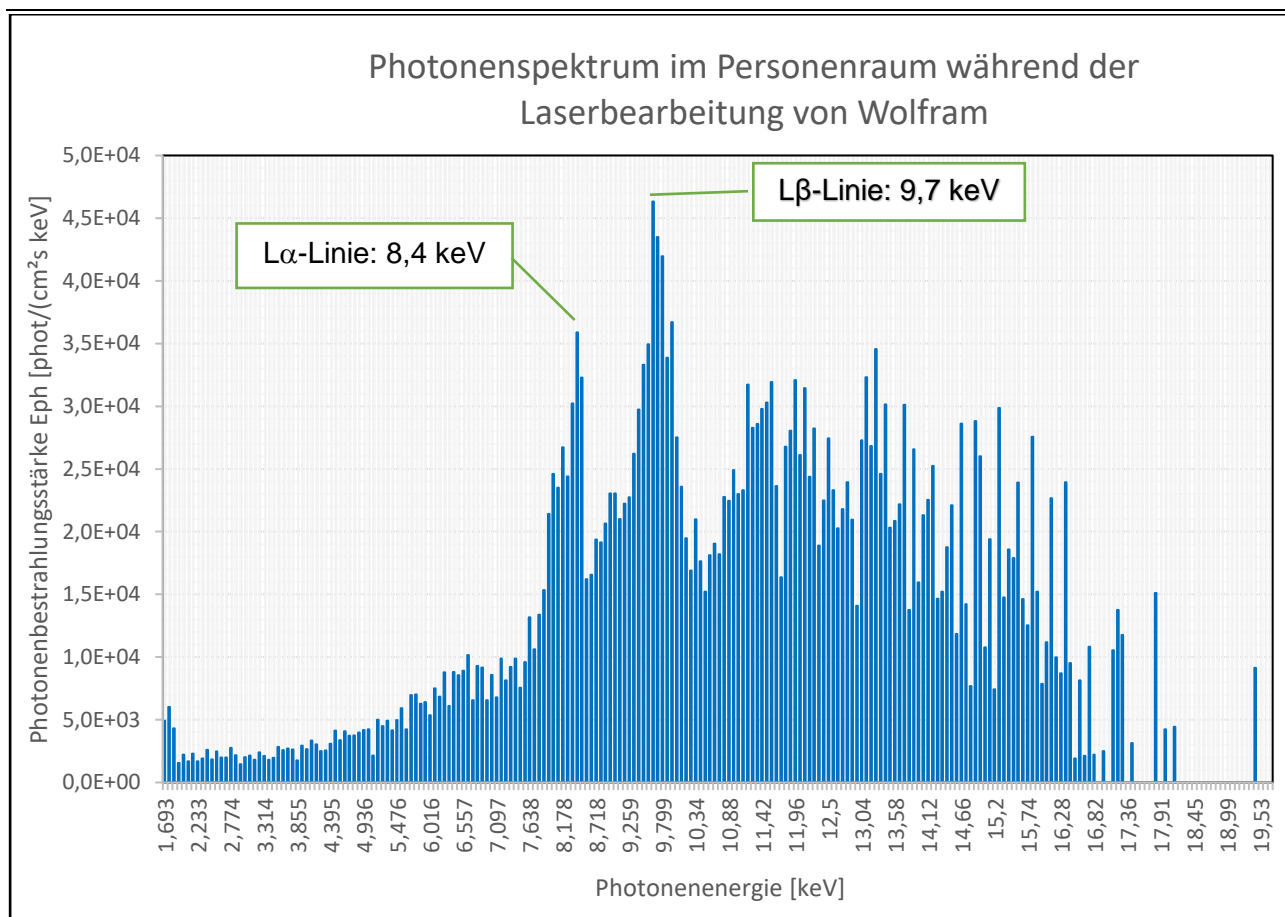
**Abbildung 9: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung einer Aluminium-Magnesium-Legierung**

### 3.5 Bearbeitung von Wolfram-Platte: Spektrum und 3 Dosisleistungen

Kenntnisse zu den Legierungsanteilen und der Reinheit der Wolfram-Platte lagen nicht vor.

**Tabelle 6: Dosisleistung bei der Bearbeitung einer Wolfram-Platte unter Argon-Atmosphäre**

<p style="text-align: center;"><b>Dosisleistungen</b> Versuch Afs_004_Wo</p>	<p style="text-align: center;"><b>Kurzzeitiger maximaler Messwert im Personenraum im Abstand von 10 cm vor der Schutzgas-Box.</b> Messdauer für den Maximalwert: 8 Sekunden</p>
<p>Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 0,07 Millimeter Tiefe für die Haut <math>\dot{H}'(0,07, \Omega)</math>.</p>	<p style="text-align: center;">5990 <math>\mu\text{Sv/h}</math>.</p>
<p>Richtungs-Äquivalentdosisleistung in 3 Millimeter Tiefe für das Auge <math>\dot{H}'(3, \Omega)</math>,</p>	<p style="text-align: center;">1458 <math>\mu\text{Sv/h}</math></p>
<p>Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Körper <math>\dot{H}^*(10)</math></p>	<p style="text-align: center;">707 <math>\mu\text{Sv/h}</math>.</p>



**Abbildung 10: Photonenspektrum der Laserinduzierten Ionisierenden Strahlung (LIS) im Personenraum während der UKP-Laserbearbeitung von Wolfram**

Bei der Laserbearbeitung der Wolfram-Platte unter einer Argon-Atmosphäre war das Photonenspektrum durch ein unterdrücktes Bremspektrum und zwei charakteristische Linien bei 8,4 keV und 9,7 keV gekennzeichnet. Der sonst hohe Bremsstrahlungsberg bei 4 keV bis 8 keV, mit seinem Maximum bei ca. 5 keV, konnte sich durch die Absorption der niederenergetischen LIS in der Polycarbonat-Platte nicht ausbilden.

## 4 Bewertung der Laseranlage nach dem StrlSchG

Unter Beachtung der geltenden Prüfvorschriften [BMUV 2022] für Laseranlagen und unter Berücksichtigung des StrlSchG der Bundesrepublik Deutschland müsste die untersuchte Laseranlage AFS sofort stillgelegt werden.

Die Anlage AFS dürfte erst wieder in Betrieb genommen werden, wenn die Anforderungen an den Strahlenschutz erfüllt sind **und** dieser Zustand von einem Sachverständigen bestätigt wurde **und** die Landesbehörde die Genehmigung zum Betrieb der Laseranlage erteilt hat. Dazu ist ein Genehmigungsantrag vom Betreiber zwingend einzureichen. Ausführliche Informationen zum Strahlenschutz bei dieser Laseranlage sind in dem Teil 2<sup>3</sup> enthalten.

<sup>3</sup> Der Teil 2 „Vergleich der Messergebnisse von der UKP-Laserbearbeitung mit den Vorgaben aus Verordnungen und Gesetzen zum Strahlenschutz Verordnung und Gesetz“

<https://www.researchgate.net/profile/Guenter-Dittmar>

## 5 Literatur

- [BMUV 2022] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). RdSchr. v. 15.12.21, Vollzug des Strahlenschutzrechts; Anforderungen an die Prüfung von Laseranlagen als Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung. GMBI Nr. 5 vom 18.02.2022, S.105  
<https://www.dinmedia.de/de/verwaltungsvorschrift/strlschionlaseranlpruefanfvv/352428955>
- [CXRO] The Center for X-Ray Optics is a multi-disciplined research group within Lawrence Berkeley National Laboratory's (LBNL) Materials Sciences Division, CXRO X-Ray Interactions With Matter
- [Dittmar 9-2024] Silix lambda, das Messgerät für alle 3 Dosisleistungen, <https://ukpl.de/www-ukpl-de7/>
- [Dittmar 11-2024] Dittmar, G.; Teil 1 „Information von Messungen der Röntgenstrahlung mit einem sofort anzeigenden Spektrosdosimeter“  
<https://www.researchgate.net/profile/Guenter-Dittmar/publications>
- [Dittmar 12-2024] Dittmar, G.; Teil 2 „Vergleich der Messergebnisse von der UKP-Laserbearbeitung mit den Vorgaben aus Verordnungen und Gesetzen zum Strahlenschutz Verordnung und Gesetz“  
<https://www.researchgate.net/profile/Guenter-Dittmar/publications>
- [Hubbell, 1996] Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>
- [Kohl, 2024] Kohl, P.; Matthäus, L.; Seyfarth, B.; Nolte S.; Laser assisted Powder Bed Fusion of pure Molybdenum using ultrashort laser pulses; 13th CIRP Conference on Photonic Technologies 15-19 September 2024, Fürth, Germany.
- [StrlSchG 2017] Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzgesetz - StrlSchG) vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 15) geändert worden ist.
- [StrlSchV 2018] Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) vom 29. November 2018. BGBl. I S. 2034, 2036, die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert worden ist.
- [Thompson, 2009] X-RAY DATA BOOKLET, Center for X-ray Optics and Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, update October 2009, <https://xdb.lbl.gov>