



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn
<http://www.ssk.de>

**Bewertung der Risiken von
laserinduzierter ionisierender Strahlung**

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 335. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02./03.12.2024

Vorwort

Mit dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt bei der Entwicklung von Lasern mit immer höherer mittlerer Leistung wuchsen in den letzten Jahren auch ihre Verbreitung und Anwendungsbereiche in der Industrie und Medizin immer weiter an. Bei der Wechselwirkung von hoch intensiver Laserstrahlung mit Materie kann ionisierende Strahlung (Laserinduzierte Ionisierende Strahlung = LIS) entstehen. LIS kann insbesondere beim Betrieb von Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Lasern) mit Laseranlagen erzeugt werden – die für die LIS-Erzeugung erforderliche hohe Bestrahlungsstärke wird in sehr kurzen Pulsen und durch räumliche Fokussierung des Laserlichtes erreicht. Daher ist es nötig, den Betrieb von Laseranlagen nicht nur in Bezug auf den optischen Laserschutz, sondern auch unter strahlenschutzrechtlichen Gesichtspunkten zur ionisierenden Strahlung zu betrachten.

Breiten Einsatz finden potenziell LIS erzeugende Lasersysteme zum Beispiel in der industriellen Materialbearbeitung, beim Funktionalisieren und Strukturieren von Oberflächen oder beim Bohren, Schneiden, Drehen und Schweißen von verschiedenen Festkörpern. Sie werden aber auch in der Medizin direkt am Menschen (zum Beispiel in der Ophthalmologie, Dentaltechnik und Dermatologie) angewendet. In der Forschung werden UKP-Laser beispielsweise in der zeitaufgelösten Spektroskopie, der Untersuchung von atmosphärischen Prozessen sowie der Beschleunigung von Teilchen und der bewussten Erzeugung von Röntgenstrahlung eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) die Strahlenschutzkommission (SSK) mit Schreiben vom 03. Dezember 2018 um eine Stellungnahme zu den Voraussetzungen für die Erzeugung und die potenziellen Risiken von LIS sowie den erforderlichen Schutzmaßnahmen an Laseranlagen gebeten. Das vorliegende Beratungsergebnis fokussiert insbesondere die unbeabsichtigte Erzeugung von LIS. Laseranlagen, die gezielt LIS erzeugen, werden nicht betrachtet, da diese eine strahlenschutzrechtliche Einordnung als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung gemäß § 5 Absatz 2 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017) erfahren.

Von besonderer praktischer Relevanz ist ein genehmigungs- und anzeigefreier Betrieb von Laseranlagen. Die aktuelle Gesetzgebung hat dazu nach Anlage 3 Teil C Satz 2 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2018) eine Regelung auf der Basis der beiden Kriterien Bestrahlungsstärke im Fokus des Laserstrahls und Ortsdosisleistung durch LIS getroffen. Die SSK hat sich auch mit diesem Thema befasst und das Ergebnis inkludiert.

Zur Erarbeitung der vorliegenden Empfehlung richtete die SSK im Jahr 2019 eine Arbeitsgruppe ein, der folgende Mitglieder angehörten:

Herr PD Dr. habil. Jörg Pawelke, Vorsitzender der Arbeitsgruppe

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Dittmar

Herr Dr. Oliver Hupe

Herr Dr. Mathias Hoffmann †

Herr Dr. Stephan Kraft

Frau Dr. Lena Kuhne

Herr Dr. Herbert Legall

Unterstützt wurde die Arbeitsgruppe vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).

Bonn, im Februar 2025

PD Dr. Jörg Pawelke

Vorsitzender der Arbeitsgruppe
„Bewertung der Risiken von Laser-
induzierter ionisierender Strahlung“

Dr. Annette Röttger

Vorsitzende des Ausschusses
„Strahlenschutztechnik“

Prof. Dr. Ursula Nestle

Vorsitzende der
Strahlenschutzkommission

INHALT

1 Einleitung	5
2 Empfehlungen der SSK	7
3 Wissenschaftliche Begründung	9
3.1 Definitionen und Abgrenzungen	9
3.2 Eigenschaften von LIS	10
3.2.1 Erzeugung von LIS	10
3.2.2 Pulsung der LIS	11
3.2.3 Energiespektrum der LIS	12
3.2.4 Elektronenstrahlungskomponente in der LIS	13
3.3 Einsatzgebiete von Ultrakurzpuls-Lasern	13
3.3.1 UKP-Laser zur Materialbearbeitung	13
3.3.2 Anwendung von UKP-Lasern am Menschen	15
3.3.3 Weitere Anwendungen von UKP-Lasern	15
3.3.4 UKP-Laser zur gezielten Erzeugung von ionisierender Strahlung	16
3.4 Begründung der Empfehlungen und Stellungnahmen der SSK	17
3.4.1 Ursache der unbeabsichtigten Erzeugung von LIS	17
3.4.2 Maßnahmen zur Sicherstellung des Strahlenschutzes bei Laseranlagen, insbesondere zur Materialbearbeitung	17
3.4.2.1 Aktuelle Regelung	17
3.4.2.2 Festlegung von Betriebsparametern	18
3.4.2.3 Schutzgehäuse	19
3.4.2.4 Offene Laseranlagen	24
3.4.2.5 Nachweis des Strahlenschutzes bei Laseranlagen	24
3.4.2.6 Das Ortsdosisleistungskriterium bei der Risikoklassifizierung	25
3.4.2.7 Risikoklassifizierung ohne Ortsdosisleistungskriterium	28
3.4.2.8 Internationale Normung	28
3.4.3 Messung von LIS	29
3.4.4 LIS bei der Anwendung am Menschen	30
3.4.5 Strahlenbiologische Wirkung von Elektronen und Photonen mit einer Energie unterhalb von 5 keV	31
3.4.6 Laser im Mikrowellenbereich (Maser)	32
Literatur	33
A-1 Mindestanforderungen an Dosisleistungs-Messgeräte für Messungen an UKP-Laseranlagen und Laseranordnungen	39
A-2 Eigenschaften und Verwendung von Messgeräten außerhalb des Anwendungsbereiches des MessEG/der MessEV	41
A-2.1 Eignung für die Messung gepulster Strahlung	41

A-2.2	Einfluss starker elektromagnetischer Felder bei Messungen an UKP-Laseranlagen.....	42
Begriffserklärungen	43
Abkürzungsverzeichnis	46

1 Einleitung

Mit dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt bei der Entwicklung von Lasern mit immer höherer mittlerer Leistung wuchsen in den letzten Jahren auch ihre Verbreitung und Anwendungsbereiche in der Industrie und Medizin immer weiter an. Bei der Wechselwirkung von hoch intensiver Laserstrahlung mit Materie kann allerdings ionisierende Strahlung (Laserinduzierte Ionisierende Strahlung = LIS) entstehen. Eine so hohe Laserintensität kann durch Fokussierung gepulster Laserstrahlung erreicht werden. Die erforderlichen Laserpulsesenergien liegen im Bereich von μJ bis kJ mit Pulsdauern im Bereich von fs bis ns (Attwood et al. 2017, Chen 1974, Kruer 1988). LIS kann insbesondere beim Betrieb von Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Lasern)¹ mit Laseranlagen² erzeugt werden. Daher ist es nötig, den Betrieb von Laseranlagen nicht nur in Bezug auf den optischen Laserschutz, sondern auch unter strahlenschutzrechtlichen Gesichtspunkten zur ionisierenden Strahlung zu betrachten.

Breiten Einsatz finden potenziell LIS erzeugende Lasersysteme zum Beispiel in der industriellen Materialbearbeitung, beim Funktionalisieren und Strukturieren von Oberflächen oder beim Bohren, Schneiden, Drehen und Schweißen von verschiedenen Festkörpern. Sie werden aber auch in der Medizin direkt am Menschen (zum Beispiel in der Ophthalmologie, Dentaltechnik und Dermatologie) angewendet. In der Forschung werden UKP-Laser beispielsweise in der zeitaufgelösten Spektroskopie, der Beschleunigung von Teilchen, der bewussten Erzeugung von Röntgenstrahlung sowie der Untersuchung von atmosphärischen Prozessen eingesetzt.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) die Strahlenschutzkommission (SSK) mit Schreiben vom 03. Dezember 2018 um eine Stellungnahme unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte gebeten:

- Darstellung des Standes von Wissenschaft und Technik zu den Prozessen, die zur Entstehung der ionisierenden Strahlung durch elektromagnetische Strahlungsfelder, wie von Lasern erzeugt, führen.

Hierbei sind folgende Fragestellungen von besonderem Interesse:

- Welche Prozesse führen im Einzelnen zur Erzeugung der ionisierenden Strahlung und wie ist das zeitliche Verhalten der angeregten ionisierten Materie bzw. der emittierten Strahlung? Welche Lebensdauern können die angeregten Zustände erreichen bzw. welche Abklingzeiten sind aus Sicht des Strahlenschutzes zu beachten?
- Sind z. B. ausschließlich durch den Laser beschleunigte Elektronen für die Entstehung der ionisierenden Strahlung verantwortlich oder sind weitere Wechselwirkungen zu betrachten?
- Welche Parameter bestimmen die Ionisationsfähigkeit des Lasers bzw. der primären elektromagnetischen Strahlung und wie sind die quantitativen Zusammenhänge zur erzeugten ionisierenden Strahlung und dessen Strahlungsfeld, insbesondere der induzierten Energien, Intensitäten und Dosisleistungen?
- Kann man Grenzwerte für Laserparameter festlegen, so dass bei deren Unterschreitung die Entstehung von ionisierender Strahlung unabhängig von dem zu bearbeitenden Material ausgeschlossen bzw. vernachlässigt werden kann?

¹ Als UKP-Laser werden in diesem Dokument Laser mit einer maximalen Pulsdauer von einigen 10 ps bezeichnet.

² Zur Unterscheidung zwischen den Begriffen Laser und Laseranlage siehe Begriffsbestimmungen.

- Bis zu welchen Wellenlängen ist die ionisierende Wirkung von UKP-Laserstrahlung sowohl theoretisch möglich als auch nach derzeitigem technischem Stand praktisch realisierbar? Ist die Entstehung ionisierender Strahlung z. B. auch bei einem Mikrowellen-Laser („Maser“) möglich?
- Wie hängt die entstehende ionisierende Strahlung von der chemisch-physikalischen Zusammensetzung der bestrahlten Materie und der Bestrahlungsgeometrie ab? Gibt es hierbei für den Strahlenschutz besonders zu beachtende Materialien und Geometrien?
- Darstellung des derzeitigen und bereits abzusehenden Anwendungsspektrums von Lasern, die in der Lage sind, ionisierende Strahlung zu erzeugen, sowohl im Rahmen der industriellen Nutzung als auch bei Einzelanwendungen, auch zu Forschungszwecken.
- Klassifikation der existierenden Geräte hinsichtlich deren Gefährdungspotenzials im Hinblick auf die induzierte ionisierende Strahlung.
- Darstellung und Bewertung der erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen an Anlagen, bei denen durch den Einsatz von Lasern ionisierende Strahlung erzeugt werden kann.

Hierbei sind folgende Fragestellungen von besonderem Interesse:

- Welche Schutzmaßnahmen sind aus Sicht des Strahlenschutzes hierbei besonders effektiv?
- Welchen Beitrag können hierzu Schutzmaßnahmen leisten, die beim Betrieb von optischen Lichtquellen nach anderen Rechtsvorschriften oder auf der Basis technischer Normen zu ergreifen sind?

Das vorliegende Beratungsergebnis beantwortet diese Fragen und schließt dabei alle Laseranlagen ein, die unbeabsichtigt LIS erzeugen. Laseranlagen, die gezielt LIS erzeugen, werden nicht betrachtet, da die strahlenschutzrechtliche Einordnung als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung gemäß § 5 Absatz 2 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG 2017) bei diesen Anwendungen bekannt ist. Als LIS wird im Sinne der aktuellen Strahlenschutzgesetzgebung beim Betrieb von Lasern erzeugte ionisierende Strahlung mit einer Energie von mindestens 5 keV und nicht generell jede Strahlung mit der Fähigkeit zur Ionisierung von Atomen und Molekülen verstanden (weitere Erläuterungen hierzu, siehe Abschnitt 3.1).

Von besonderer praktischer Relevanz ist ein genehmigungs- und anzeigefreier Betrieb von Laseranlagen. Die aktuelle Gesetzgebung hat dazu nach Anlage 3 Teil C Satz 2 Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2018) eine Regelung auf der Basis der beiden Kriterien Bestrahlungsstärke im Fokus des Laserstrahls und Ortsdosiseistung durch LIS getroffen³. Die SSK hat sich auch mit diesem Thema befasst und das Ergebnis inkludiert.

³ 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 $1 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ nicht überschreitet und die Ortsdosiseistung in 0,1 m Abstand von der berührbaren Oberfläche $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ nicht überschreitet.

2 Empfehlungen der SSK

Empfehlung 1:

Die SSK empfiehlt, dass eine Klarstellung darüber, welche Laseranlagen von den Regelungen zur Anzeige- und Genehmigungsfreiheit nach Anlage 3 Teil C Satz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) umfasst sind, erfolgen soll. In diesem Zusammenhang sollen die Begriffe der vollständig umschlossenen Laseranlage und der berührbaren Oberfläche bei nicht vollständig umschlossenen Laseranlagen definiert werden.

Für nicht vollständig umschlossene Laseranlagen empfiehlt die SSK, dass für den genehmigungs- und anzeigefreien Betrieb die Anlage 3 Teil C Satz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) Anwendung finden soll⁴.

Für vollständig umschlossene Laseranlagen empfiehlt die SSK, dass die Kriterien angepasst werden sollen. Der Betrieb dieser Anlagen sollte anzeige- und genehmigungsfrei sein, wenn die Bestrahlungsstärke von $1 \cdot 10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ unterschritten ist und die Ortsdosisleistung in 0,1 m Abstand von der berührbaren Oberfläche $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ nicht überschritten wird.

Die Durchführung von Ortsdosisleistungsmessungen an Laseranlagen ist allerdings technisch aufwändig. Daher sollte die Anzahl der Ortsdosisleistungsmessungen auf die Laseranlagen eingegrenzt werden, bei denen nach aktuellem Stand des Wissens Messungen notwendig sind. Es ist daher wünschenswert, zukünftig den genehmigungs- und anzeigefreien Betrieb von Laseranlagen allein auf der Basis von Betriebsparametern zu erlauben, um unnötigen Prüfaufwand bei Laseranlagen zu vermeiden. Nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik ist aber noch kein sinnvoller Satz von Betriebsparametern bekannt, bei dessen Einhaltung ein ausreichend sicherer Betrieb von genehmigungs- und anzeigefrei betriebenen Laseranlagen gewährleistet wird, ohne gleichzeitig auch in erheblichem Umfang Laseranlagen einzuschließen, die keine LIS erzeugen.

Empfehlung 2:

Die SSK empfiehlt, dass Kriterien für den genehmigungs- und anzeigefreien Betrieb von Laseranlagen erarbeitet werden sollen, die nicht auf die Ortsdosisleistung bezogen und in der Praxis möglichst effektiv einsetzbar sind. Hierzu sollte der Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und den zahlreichen weiteren Einflussparametern auf die Ortsdosisleistung detailliert erforscht werden und auf einen Minimalsatz an relevanten Parametern zurückgeführt werden.

Empfehlung 3:

Die SSK empfiehlt, dass als beste technische Schutzmaßnahme bei allen LIS-erzeugenden Laseranlagen, soweit dies anwendungsbezogen möglich ist, eine vollständige und überwachte Umschließung des Entstehungsortes der LIS mit einem ausreichend strahlungsschwächen Schutzgehäuse angesehen werden soll.

Offene Laseranlagen⁵, die ionisierende Strahlung erzeugen können, weisen im Hinblick auf den Strahlenschutz ein erhöhtes Risiko auf. Hier besteht die Gefahr, dass die ionisierende Strahlung lediglich durch Luft geschwächt auf Personen treffen kann. Die SSK weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass – insbesondere bei nicht vollständig umschlossenen Laseranlagen –

⁴ vgl. Abbildung 2

⁵ Im Kontext dieses Dokuments werden nicht vollständig umschlossene Laseranlagen als offene Laseranlagen verstanden. – siehe Begriffsbestimmungen für vollständig umschlossene Laseranlage.

alle Anforderungen gemäß den strahlenschutzrechtlichen Regelungen (z. B. Einrichtung von Strahlenschutzbereichen, dosimetrische Überwachung etc.) einzuhalten sind.

Bei der Anwendung von UKP-Laserstrahlung direkt am Menschen ist der Einsatz eines Schutzhäuses nicht möglich.

Empfehlung 4:

Die SSK empfiehlt, dass das Auftreten von LIS bei der Anwendung von Laserbestrahlung am Menschen im Hinblick auf die sich daraus ergebenden strahlenschutzrelevanten Konsequenzen wissenschaftlich untersucht werden soll. Dabei sollen auch die strahlenbiologischen Wirkungen von Elektronen und Photonen mit einer Energie unterhalb von 5 keV berücksichtigt werden.

Empfehlung 5:

Die SSK empfiehlt, dass zur Bestimmung der Ortsdosisleistungen der LIS für gepulste Strahlung geeignete Dosimeter für die Messgrößen (Alberts et al. 1994)

- **Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ für Energien ab 5 keV,**
- **Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(3, \Omega)$ für Energien ab 8 keV und**
- **Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ für Energien ab 12 keV**

verwendet werden sollen.

Zur Beurteilung des Strahlenschutzes an Laseranlagen sind aktuell Ortsdosisleistungsbestimmungen der LIS, basierend auf Messungen, erforderlich. Für diesen Zweck geeignete Messgeräte, die den Vorschriften des Mess- und Eichgesetzes (MessEG) genügen, sind aktuell nicht verfügbar⁶ und sollten daher entwickelt werden. Voraussetzung für rückführbare Messungen an Laseranlagen sind Referenzfelder, die der LIS weitestgehend entsprechen.

Empfehlung 6:

Die SSK empfiehlt, dass die Entwicklung von Referenzfeldern, die der LIS weitestgehend entsprechen⁷, vorangetrieben werden soll.

Empfehlung 7:

Die SSK empfiehlt, dass Strahlenschutzaspekte bei Laseranlagen in die internationale Normung eingebracht werden sollen.

Um bei Laseranlagen einen angemessenen Schutz auch außerhalb Deutschlands zu gewährleisten, ist die frühzeitige Erstellung von harmonisierten Regelungen, insbesondere in Form von internationalen Normen, von grundlegender Bedeutung.

Zu den Prozessen, die zur Entstehung ionisierender Strahlung durch Laserstrahlung führen, nimmt die SSK gemäß dem Beratungsauftrag zusammenfassend wie folgt Stellung:

Für die unbeabsichtigte Erzeugung von LIS bei der Laserstrahl-Materie-Wechselwirkung ist ausschließlich das durch den Laserstrahl erzeugte Plasma mit seinen sogenannten „heißen“ Elektronen verantwortlich. Die LIS-Pulse folgen nach derzeitigem Kenntnisstand dem zeitlichen Verlauf der Laserpulse. Nach dem Abschalten des Laserstrahls, d. h. mit dem Verlöschen (Abkühlen) des Plasmas, verschwindet die LIS. Erst im Spezialfall der Erzeugung von LIS im

⁶ Bestehende Praxis ist es, Geräte zu verwenden, die keine Baumusterprüfung haben. Deren Eignung muss jedoch anders nachgewiesen werden. Die Verwendung muss von der Behörde nach § 90 Absatz 2 StrlSchV gestattet werden und ist auf eine einzelne Messaufgabe und ein einzelnes Messgerät beschränkt.

⁷ vgl. Tabelle 1 und Tabelle 4

MeV-Bereich kann es durch die Wechselwirkung von LIS mit Atomkernen zur Erzeugung von längerlebigen Radionukliden beziehungsweise zur Aktivierung von Materialien kommen.

Mit Lasern im Mikrowellenbereich (Masern) ist das Erreichen von Bestrahlungsstärken, die zur Erzeugung von LIS führen könnten, bei aktuellem Stand der Technik ausgeschlossen. Für alle anderen Lasertypen, die gepulste Laserstrahlung erzeugen, u. a. auch CO₂-Laser, kann bei entsprechend hoher Bestrahlungsstärke die Erzeugung von LIS nicht ausgeschlossen werden.

Zur Klassifikation der LIS erzeugenden Laseranlagen hinsichtlich deren Gefährdungspotenzials nimmt die SSK gemäß dem Beratungsauftrag wie folgt Stellung:

Das untergesetzliche Regelwerk sollte zum Nachweis eines ausreichenden Strahlenschutzes bei Laseranlagen weiterentwickelt werden.

3 Wissenschaftliche Begründung

3.1 Definitionen und Abgrenzungen

Die SSK beschäftigt sich in der vorliegenden Empfehlung mit der Erzeugung ionisierender Strahlung durch optische Strahlung sehr hoher Bestrahlungsstärke mittels Laser. Dafür sind folgende Definitionen und Abgrenzungen festgelegt worden:

- *Als UKP-Laser werden in diesem Dokument Laser bezeichnet, die Laserpulse mit einer Pulsdauer von bis zu einigen 10 ps aussenden.*

Die Abgrenzung von UKP-Lasern gegenüber Lasern mit einer längeren Pulsdauer ist nicht eindeutig festgelegt. Eine Abgrenzung wird im Rahmen dieser Empfehlung auf der Basis der verschiedenen Erzeugungsprozesse von LIS getroffen. Bei sehr kurzen Laserpulsen im fs- bis ps-Bereich dominiert die Absorption der Laserstrahlung im Plasma durch stoßfreie Prozesse, insbesondere die resonante Absorption. Dabei wird von den Plasmaelektronen kinetische Energie im Laserfeld aufgenommen. Durch eine Abbremsung der Plasmaelektronen im umgebenden Material wird Bremsstrahlung und durch Wechselwirkung mit kernnahen Elektronen charakteristische Strahlung emittiert. Bei Pulsdauern oberhalb einiger 10 ps kann sich durch Stoßabsorption (inverse Bremsstrahlung) ein quasi-thermisches Gleichgewicht im Plasma einstellen und das Plasma kann physikalisch wie ein Schwarzkörperstrahler behandelt werden (Attwood et al. 2017). Dieser Prozess dominiert die LIS bei Pulsdauern von einigen 100 ps bis einigen 10 ns und Pulsenenergien im mJ-Bereich – Laser mit diesen Pulsdauern werden als Kurzpulsse bezeichnet. Dabei verhindern bei längeren Pulsdauern im ns-Bereich die dominierenden Stoßprozesse die resonante Anregung von Plasmawellen und somit die Erzeugung von Röntgenstrahlung mit Photonenenergien > 5 keV (Attwood et al. 2017), und sind damit strahlenschutzrechtlich nicht relevant.

- *Die vorliegende Empfehlung der SSK schließt alle Laseranlagen ein, die unbeabsichtigt LIS erzeugen. Laseranlagen, die absichtlich LIS erzeugen, werden nicht betrachtet, da die strahlenschutzrechtliche Einordnung bei diesen Anwendungen bekannt ist.*

Die Erzeugung von LIS ist prinzipiell nicht nur mit ultrakurzen Laserpulsen, sondern auch mit längeren Laserpulsen möglich, wenn deren Pulsenenergie ausreichend hoch ist (z. B. Attwood et al. 2017). Dementsprechend kann eine umfassende Betrachtung des Schutzes vor LIS in Anbetracht auf zukünftige Laserentwicklungen und Anwendungen nicht auf UKP-Laser beschränkt werden (Condamine et al. 2022, Mead et al. 1983).

- Als LIS wird im Sinne der aktuellen Strahlenschutzgesetzgebung beim Betrieb von Lasern erzeugte ionisierende Strahlung mit einer Energie von mindestens 5 keV und nicht generell jede Strahlung mit der Fähigkeit zur Ionisierung von Atomen und Molekülen verstanden.

Für die Ionisation von Atomen und Molekülen, d. h. um ein Elektron von einem Atom oder Molekül zu trennen, reichen Energien von einigen eV aus. In den strahlenschutzrechtlichen Regelungen wird jedoch für die Energie von ionisierender Strahlung eine untere Grenze von 5 keV festgelegt mit der historischen Begründung⁸, dass ionisierende Strahlung mit geringerer Energie aufgrund von Absorptionseigenschaften aus Strahlenschutzsicht weniger bedeutend ist.

3.2 Eigenschaften von LIS

3.2.1 Erzeugung von LIS

Durch das Auftreffen eines UKP-Laserpulses auf Materie kann ein Plasma erzeugt werden.

Der Begriff Laser steht für Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung (engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Mit diesem Begriff werden Quellen optischer Strahlung mit einem verstärkenden Medium innerhalb eines optischen Resonators bezeichnet, die unter Ausnutzung des Effektes der stimulierten Emission kohärente elektromagnetische Strahlung emittieren. Es wird zwischen gepulster und kontinuierlicher Laserstrahlung unterschieden. Im Gegensatz zu anderen Lichtquellen, kann das elektromagnetische Feld eines Laserpulses so stark sein, dass ein Gas oder Festkörper von dem auftreffenden Laserpuls in ein Plasma, also ein heißes Teilchengemisch aus Ionen und freien Elektronen umgewandelt werden kann.

Die freien Elektronen eines Plasmas können – vereinfacht dargestellt – durch das elektromagnetische Feld des Laserpulses beschleunigt werden und in der Folge durch die Wechselwirkung mit den Ionen des Plasmas Röntgenstrahlung erzeugen. Der Prozess der Erzeugung ionisierender Strahlung hängt somit von der kinetischen Energie ab, die der Laser den Elektronen in einem Plasma zuführen kann. Die für die Erzeugung von LIS erforderliche hohe Feldstärke ist proportional zur Bestrahlungsstärke (Pulsenergie pro Fläche und Pulsdauer) des Laserpulses und kann in der Regel nur für kurze Zeitdauer (gepulst) und durch eine räumliche Fokussierung des Laserstrahls realisiert werden. Diese zur Erzeugung von ionisierender Strahlung nötigen hohen Bestrahlungsstärken können insbesondere durch UKP-Laseranlagen bereitgestellt werden oder bei längeren Pulsdauern durch Laseranlagen mit sehr hoher Einzelpulsenergie im kJ-Bereich.

Der Begriff Laseranlage umfasst neben dem Laser auch alle optischen, mechanischen und elektrischen Komponenten zur Strahlführung, -formung und -fokussierung. Beispielhaft hat ein Laserpuls von der Dauer 1 ps mit einer Energie von 1 mJ eine Leistung von 1 GW, was etwa der Dauerleistung eines großen Kraftwerkes entspricht, wenn auch nur für eine extrem kurze Zeitdauer. Durch die Fokussierung dieses Laserpulses auf einen Strahldurchmesser von 50 μm wird eine Bestrahlungsstärke von etwa $10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ erreicht.

Die Plasmabildung bzw. dessen Heizung (durch die Erhöhung der kinetischen Energie der Plasmaelektronen) hängt von den Wechselwirkungen der Laserstrahlung mit Materie (Plasma) und somit von einer Reihe von Materialparametern (z. B. Lichtabsorption und Wärmeleitung),

⁸ Bereits 1973 wurden Anlagen mit einer Energie unterhalb 5 keV in der Verordnung über den Schutz von Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung) vom 1. März 1973 (Bundesgesetzblatt Jahrgang 1973 Teil I Nr. 18) von der strahlenschutzrechtlichen Überwachung freigestellt, da deren Strahlung in ihrer Reichweite und ihrer Wirkung so begrenzt sei, dass besondere Schutzmaßnahmen nicht erforderlich seien.

dem Einstrahlwinkel des Lasers auf das Plasma (Material) und den Laserparametern (z. B. Pulsennergie, Pulsdauer und Pulsfolgefrequenz) ab. Die Parameter können hierbei über einen großen Bereich variieren, z. B. erstreckt sich die Pulsfolgefrequenz von UKP-Lasern vom Hz- bis in den GHz-Bereich. Mittlerweile erreichen auch kleinere kommerzielle UKP-Laser eine mittlere Leistung von mehreren 100 W bis in den kW-Bereich.

Es gilt für die Erzeugung von LIS, dass bei einer gegebenen Bestrahlungsstärke mit der abnehmenden Wellenlänge des Lasers auch die Dosisleistung der erzeugten LIS abnimmt und das Energiespektrum der erzeugten LIS sich zu niedrigeren Energien verschiebt. Jedoch auch bei den geringsten im Einsatz befindlichen optischen Wellenlängen im UV-Bereich lassen sich aktuell Bestrahlungsstärken zur Erzeugung von LIS erreichen. Experimentelle Untersuchungen zur Röntgenemission in der Laserstrahl-Materie-Wechselwirkung haben gezeigt, dass die Erzeugung von LIS mit Photonenergien $> 5 \text{ keV}$ unter anderem von der Pulsdauer des einfallenden Laserstrahls abhängt (Chichkov et al. 1996, Holland et al. 2022). Bis zu einer maximalen Bestrahlungsstärke von ca. $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ begünstigen Pulsdauern im ps- und fs-Bereich sowie hohe Pulsfolgefrequenzen des Lasers den Erzeugungsprozess von LIS (Bastiani et al. 1997). Hohe Pulsfolgefrequenzen treten beim Burst-Mode bei der Laser-Materialbearbeitung sowie bei versehentlich oder absichtlich erzeugten Vorpulsen auf, so dass der einfallende Laserpuls mit dem sich bereits ausgedehnten und durch den Vorgängerpuls erzeugten Plasma wechselwirken kann.

3.2.2 Pulsung der LIS

Die Lebensdauer der während der Laserstrahl-Plasma-Wechselwirkung erzeugten, sogenannten „heißen“ Elektronen ist durch Wechselwirkungsprozesse im Plasma auf wenige Femtosekunden bis zu einer Pikosekunde beschränkt und somit deutlich kürzer als die Plasmalebensdauer, die bei nicht präsentem Laserfeld im μs -Bereich liegt. Der zeitliche Verlauf der LIS folgt somit der Laserpulsdauer. Die durch die Wechselwirkung des Laserstrahles mit dem Plasma entstehende LIS ist ebenfalls gepulst. Die Pulsdauer der hier betrachteten UKP-Laser liegt aktuell im Bereich von einigen fs bis zu einigen 10 ps.

Die Pausen zwischen den Laserpulsen erstrecken sich, abhängig von der verwendeten Pulsfolgefrequenz, von wenigen Nanosekunden bis zu Sekunden. Die Dosisleistung in einem Puls liegt entsprechend dem Pause-Puls-Verhältnis über dem zeitlichen Mittelwert der Ortsdosisleistung. UKP-Laseranlagen zur Materialbearbeitung weisen ein Pause-Puls-Verhältnis im Bereich von 10^5 bis 10^{10} auf. Damit wird eine Betrachtung der Dosis und Dosisleistung im Puls sowie der integralen Dosis und des zeitlichen Mittelwertes der Dosisleistung notwendig.

Messungen an einer UKP-Laseranlage mit einem mit Thermolumineszenzdetektoren ausgestatteten Wenigkanal-Spektrometer der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) wurden von (Behrens et al. 2019) veröffentlicht. Aus den gemessenen Spektren (siehe Abbildung 1) wurde die Ortsdosisleistung im Luft-Abstand von 10 cm vom Plasma ermittelt. Es wurde eine praxisübliche Bestrahlungsstärke im Laserfokus von $2,1 \cdot 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ verwendet. Die Pulsdauer des Laserpulses betrug 924 fs und die Pulsfolgefrequenz 400 kHz, was ein Pause-Puls-Verhältnis von $2,7 \cdot 10^6$ ergibt. Die zeitlich gemittelte Dosisleistung der LIS betrug: $\dot{H}'(0,07, \Omega) = 8300 \text{ mSv h}^{-1}$, $\dot{H}'(3, \Omega) = 76 \text{ mSv h}^{-1}$, $\dot{H}^*(10) = 4,3 \text{ mSv h}^{-1}$. Durch das sehr große Pause-Puls-Verhältnis steigt die Dosisleistung in dem kurzen Puls auf einen sehr hohen Wert, für z. B. $\dot{H}'(0,07, \Omega) = 2,24 \cdot 10^7 \text{ Sv h}^{-1}$, an. Diese hohe Dosisleistung bzw. die dadurch erzeugte Dosis muss von den für die LIS geeigneten Messgeräten erfasst werden können. Es darf zu keinen Sättigungsverlusten wegen der zu hohen Amplitude oder wegen des extrem schnellen Signalanstieges zur Fehlerkennung als Störimpuls kommen. Gleichzeitig berechnet sich aus dem zeitlichen Mittelwert der gemessenen Dosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega) = 8300 \text{ mSv h}^{-1}$ und der

Anzahl der in einer Stunde vom Laser erzeugten $1,44 \cdot 10^9$ Pulse die Ortsdosis der LIS eines Pulses zu $5,76 \cdot 10^{-9}$ Sv.

Durch die Schwächung der LIS beim Durchgang durch ein Schutzgehäuse aus Stahlblech von der im Inneren des Gehäuses ermittelten $\dot{H}^*(10) = 4,3 \text{ mSv h}^{-1}$ auf einen Wert außerhalb des Schutzgehäuse von $\dot{H}^*(10) = 0,5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ werden die Messprobleme nicht kleiner. Die Pulsung der LIS bleibt erhalten und damit die Überhöhung der Dosisleistung im Puls gegenüber dem zeitlichen Mittelwert der Dosisleistung. Das hochempfindliche Dosimeter, mit dem sicher der zeitliche Mittelwert der LIS im Personenaufenthaltsbereich außerhalb des Schutzgehäuses und bei vorhandener natürlicher Umgebungsstrahlung nachgewiesen werden soll, muss eine hohe Dosisleistung im Puls von $\dot{H}(0,07, \Omega) = 1,4 \text{ Sv h}^{-1}$ bei einer sehr kleinen Dosis von ca. $4 \cdot 10^{-16}$ Sv pro Puls verarbeiten können.

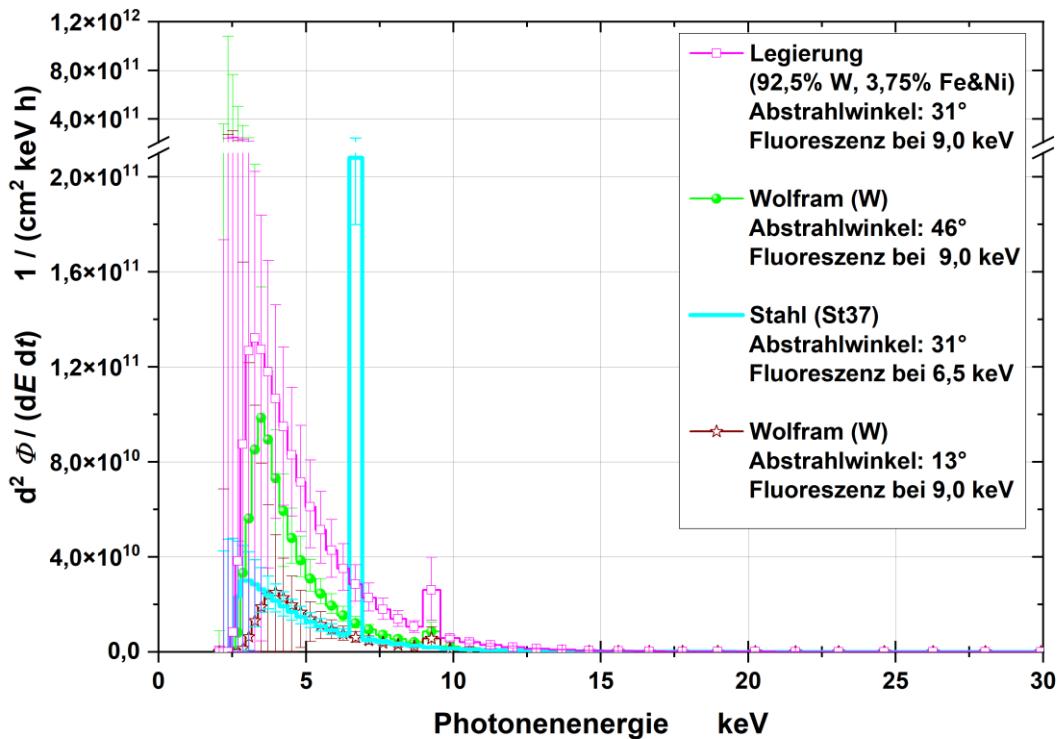


Abbildung 1: Fluenzspektren an vier Messpositionen (normiert auf die effektive Bestrahlungszeit und 10 cm Abstand). Die Unsicherheitsbalken stellen den 95 %-Vertrauensbereich dar. Zu beachten ist die Unterbrechung der Ordinate mit einer zehnmal größeren Skalierung nach der Unterbrechung (nach Behrens et al. 2019)

3.2.3 Energiespektrum der LIS

Das Energiespektrum der LIS beschränkt sich bei einem Großteil der Anwendungen, insbesondere in der Laser-Materialbearbeitung fast ausschließlich auf Photonenenergien unterhalb von 70 keV. Die für den Strahlenschutz relevanten Dosisleistungen der LIS werden mit UKP-Laseranlagen bei Pulsenenergien im μJ -Bereich in einem Energiebereich bis 20 keV (siehe Abbildung 1) erzeugt (Behrens et al. 2019). Unter bestimmten Bedingungen (Burst-Modus) konnte bei diesen Pulsenenergien in jüngeren Untersuchungen aber auch LIS mit einer Photonenenergie von bis zu 40 keV nachgewiesen werden (Böttcher et al. 2022). Aus den bisherigen Veröffentlichungen und Messungen lässt sich eine obere Energie des Mindest-Nenngebrauchs der zur Bewertung der LIS eingesetzten Messtechnik von ca. 70 keV für die Energie der Photonenstrahlung konservativ abschätzen (siehe Tabelle 1), wobei diese Abschätzung nicht alle Laseranlagen und deren Betriebsmodalitäten abdecken muss.

Tabelle 1: Aus dem Messzweck resultierende Mindest-Nenngebrauchsbereiche des Dosimeters für die Energie der Photonenstrahlung.

Messgröße	Mindest-Nenngebrauchsbereich
Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\bar{H}'(0,07, \Omega)$	5 keV bis 70 keV
Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\bar{H}'(3, \Omega)$	8 keV bis 70 keV
Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\bar{H}^*(10)$	12 keV bis 70 keV

Bei Messungen außerhalb des Schutzgehäuses kann der Nenngebrauchsbereich für die eingesetzten Messgeräte auch bei höheren Energien anfangen, da der sehr niederenergetische Anteil schon durch geringe Abschirmungen signifikant geschwächt wird.

3.2.4 Elektronenstrahlungskomponente in der LIS

Die LIS entsteht aus den beschleunigten Plasmaelektronen und kann somit ggf. auch aus Elektronenstrahlung bestehen. Bei Pulsennergien im μJ -Bereich konnte bisher keine Elektronenstrahlung durch den Betrieb von UKP-Laseranlagen nachgewiesen werden. Bei Pulsennergien im Bereich einiger 10 mJ bis 100 mJ wurde mit UKP-Laseranlagen bei Bestrahlungsstärken von ca. $10^{15} \text{ W cm}^{-2}$ bis $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ Elektronenstrahlung mit einer Energie von mehr als 100 keV beobachtet (Bastiani et al. 1997). Diese Anlagen werden derzeit allerdings nur in Forschungseinrichtungen für die gezielte Erzeugung von LIS betrieben. Zudem werden Elektronen mit Energien von weniger als 100 keV schon durch wenige Zentimeter Luft erheblich geschwächt und können ein Schutzgehäuse aus Stahl nicht durchdringen. In den meisten Fällen kann diese Elektronenstrahlung bei der Messung daher vernachlässigt werden. Eine Ausnahme bilden Situationen, wo Körperteile wenige Zentimeter dicht an den Ort der Strahlungsentstehung bei offenen Laseranordnungen kommen können (z. B. bei Wartungs- und Einstellarbeiten). Hier können geeignete Teilkörperdosimeter zur Erfassung von Betastrahlung eingesetzt werden.

3.3 Einsatzgebiete von Ultrakurzpuls-Lasern

Die zur Erzeugung von ionisierender Strahlung erforderlichen hohen Bestrahlungsstärken können insbesondere durch UKP-Laseranlagen erzeugt werden. Daher werden aktuelle und potenzielle Anwendungsfelder von UKP-Lasern in den nachfolgenden Abschnitten kurz skizziert.

3.3.1 UKP-Laser zur Materialbearbeitung

Weltweit sind geschätzt mehr als 10 000 UKP-Laser in Betrieb, die zur **industriellen Materialbearbeitung** eingesetzt werden. Diese stellen einen Großteil der potenziell LIS erzeugenden Laseranlagen dar. Nicht mitgezählt sind die UKP-Laser, die keine LIS anregen können. Die Zahl der benutzten UKP-Laser, die potenziell LIS erzeugen können, wächst geschätzt jährlich um mehr als 10 %. In der Laser-Materialbearbeitung genutzte UKP-Laseranlagen liefern typischerweise Pulsennergien im μJ -Bereich bis zu wenigen mJ bei Pulsfolgefrequenzen von einigen 100 kHz bis GHz.

Im Bereich der industriellen Materialbearbeitung mit UKP-Lasern gibt es im Hinblick auf eine unbeabsichtigte Erzeugung von ionisierender Strahlung unterschiedliche Anwendungen mit teilweise firmeneigenen Bezeichnungen. Im Wesentlichen lassen sich diese jedoch in die Kategorien Schneiden, Bohren, Abtragen, Beschriften, Zerstäuben, Strukturieren, Funktionalisieren von Oberflächen oder Schweißen einordnen. Bei der Verwendung von UKP-Lasern wird durch den einzelnen Laserpuls (oder wenige aufeinanderfolgende Laserpulse) ausreichend Energie in dem zu bearbeitenden Material deponiert, so dass es im Idealfall von einem festen Zustand direkt in einen gasförmigen oder plasmaförmigen Zustand übergeht. UKP-Laser zeichnen sich gegenüber kontinuierlichen Lasern und Kurzpulslasern durch die höhere Präzision bei Bear-

beitungsprozessen und die minimale thermische Belastung der Werkstücke aus. Der Wärmeeintrag in das Werkstück ist bei UKP-Lasern deutlich geringer, es gibt keine Phase, in der das Material flüssig ist oder diese Phase ist stark reduziert. Auch lassen sich Materialien, wie z. B. Glas oder Keramik, die sich mit rein mechanischen Werkzeugen teilweise schwer bearbeiten lassen, besser mit einem UKP-Laser bearbeiten. Für den Aspekt der Entstehung von Röntgenstrahlung ist die Erzeugung eines Plasmas wesentlich, eine Einschränkung auf UKP-Laser ist hier nicht ausreichend. Im Folgenden werden einzelne Verfahren kurz umrissen. Teilweise überlappen diese sich; eine Bohrung ist z. B. auch immer mit einem Materialabtrag verbunden.

Beim **Schneiden** mit UKP-Lasern entfällt die Phase, in der das Material durch die eingebrachte Energie verflüssigt ist, oder sie ist stark reduziert. Es können daher „schärfere“ Kanten ohne oder mit sehr geringer Aufschmelzung erzeugt werden. Teilweise kommen auch Prozessgase zum Einsatz, um Oxidierungen an Schnittkanten zu minimieren. Durch Setzen verschiedener, sich überlappender Bohrungen kann ein Schnitt erzeugt werden. Bei diesem Verfahren ist der thermische Eintrag in das Werkstück gering. Gerade bei der Herstellung filigraner Produkte, wie z. B. in der Medizintechnik kommt diese Technik zum Einsatz. Für das Schneiden mit Lasern werden auch die Begriffe Mikrolaserschneiden oder Laserfeinschneiden verwendet.

Beim **Bohren** mit dem UKP-Laserstrahl können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden, die sich durch die Art der Führung des Laserfokus unterscheiden. Es gibt Verfahren, bei denen ein einziger Puls die Bohrung erzeugt oder auch mehrere Pulse hintereinander (Perkussionsbohren). Beim Trepanierbohren wird ein Bohrloch nach Erzeugung einer Bohrung durch Führen des Fokus auf einer Kreisbahn mit größer werdendem Radius gefertigt. Wird kein Bohrloch zu Beginn erzeugt und wird der Fokus zur Erzeugung der Bohrung auf einer Kreisbahn geführt, so wird auch der Begriff Helixbohren verwendet. Je nach Größe der Bohrung gibt es auch den Begriff des Mikrobohrrens. Technisch ist eine Aufteilung eines Laserstrahls in mehrere Teilstrahlen möglich, so dass derzeit bis zu tausend Mikrobohrungen pro Sekunde möglich sind.

Das dem **Abtragen** zu Grunde liegende Prinzip funktioniert ähnlich wie beim Schneiden oder Bohren: durch den geringen Wärmeeintrag entsteht kein oder wenig flüssiges Material. Beim Laserdrehen wird ein Werkstück während der Bearbeitung unter dem Laserstrahl gedreht. Je nach Prozess ist ein großflächiger Oberflächenabtrag (Schruppen) oder feiner Abtrag (Schlichten) möglich. Beim Gravieren und Beschriften werden nur wenige Mikrometer große Strukturen in die Oberfläche eingebracht. Die Abtragtiefen liegen oft im Bereich von einigen 100 nm bis 100 µm.

Beim Beschriften kann eine Oberfläche im nm-Bereich strukturiert werden. Dies führt dazu, dass Licht von diesen Strukturen hinsichtlich Streuung und Reflektion reduziert wird. Auf diese Weise ist eine dunkle Markierung möglich. Dieses Verfahren arbeitet nicht mit einem Materialabtrag, sondern durch eine **Strukturierung** der Oberfläche und ist somit für den Aspekt der Erzeugung ionisierender Strahlung weniger interessant. Auch die Aufrauhung von Oberflächen oder die Funktionalisierung von Oberflächen, z. B. zur Minimierung von Reibung in Lagern, nutzt die Strukturierung. Ziel hinter diesen Verfahren ist immer eine Änderung der Oberflächeneigenschaften, um z. B. Adhäsionseigenschaften von Flüssigkeiten auf einer Oberfläche zu verändern und damit eine selbstreinigende oder reibungsoptimierte Oberfläche herzustellen.

Das Anwendungsfeld der Strukturierung lässt sich in Mikro-, Nano- und Makrostrukturierung unterteilen, wobei die Grenze fließend ist. Als Mikrostrukturierung kann die Arbeit an „kleinen“ Strukturen, z. B. medizinischen Gefäßstützen, verstanden werden. Es wird mehr „in die Tiefe“ des Materials gegangen und es kommt zu einem Materialabtrag im Sinne einer Mikromaterialbearbeitung. Bei der Nanostrukturierung geht es verstärkt um z. B. Oberflächenfunk-

tionalisierung. Hier wird die Oberfläche mit Strukturen versehen, um ihre Eigenschaften zu optimieren. Es geht im Vergleich zur Mikrostrukturierung um eher räumlich gesehen großflächige Anwendungen und weniger um einen tiefen Materialabtrag. Bei der Oberflächenbearbeitung werden bei großflächiger Bestrahlung Strukturgrößen bis in den nm-Bereich realisiert. Bei der Makrostrukturierung wird Material ohne größere Anforderungen an die Präzision des Bearbeitungsergebnisses bearbeitet.

Beim **Schweißen** werden zwei Materialien miteinander verbunden. UKP-Laser kommen hier z. B. beim Verschweißen von Glas zum Einsatz.

3.3.2 Anwendung von UKP-Lasern am Menschen

In der Medizin ist der Einsatz von Lasern in der Standardtherapie in einigen Bereichen fest etabliert. Neben dem Einsatz in der Augenheilkunde (Ophthalmologie), werden Laser auch in der Zahnbehandlung (Stomatologie), Hautbehandlung (Dermatologie), Behandlung von Tumoren (Onkologie) und zur Herstellung und Anpassung von Implantaten angewendet. Die medizinische Anwendung von Lasern ist ein Spezialfall der Materialbearbeitung bei dem die Laserstrahlung direkt am Menschen Anwendung findet, so dass dieser quasi das „Werkstück“ darstellt. Die Vorteile der Laserbestrahlung im Vergleich zu alternativen Verfahren sind die Selektivität, Präzision und der vergleichsweise geringe Energieeintrag ins Gewebe. UKP-Laser ermöglichen im Vergleich zu Kurzpulslasern die aus der Materialbearbeitung bekannten Vorteile einer weiteren Steigerung der Präzision bei geringerer Schädigung umliegender Bereiche und Bearbeitung mit möglichst geringem Energieeinsatz. Es können auch weitere optische Effekte, deren Erzeugung Bestrahlungsstärken von über $10^{11} \text{ W cm}^{-2}$ erfordert, in den zu bearbeitenden Materialien ausgenutzt werden. Dabei wird jedoch keine LIS erzeugt. Anwendungsbeispiele von UKP-Lasern am Menschen sind z. B. das gezielte Abtragen der Hornhaut des Auges (Cornea), der selektive Abtrag von Zahngewebe (Zahnbein und -schmelz) oder kariösem Zahnmaterial und die kosmetische Anwendung an der Haut, wie Akne- und Narbenbehandlung oder Sommersprossen-Bleichung. Ein weiteres, großes Anwendungsgebiet ist die Tattooentfernung. Hierbei zeigen Laser mit Pulsdauern im ps-Bereich bei der gezielten Zerstörung der Farbpigmente in der Haut eine Effizienzsteigerung gegenüber dem Standardeinsatz von Nanosekunden langen Pulsen. Insbesondere bei der Anwendung von UKP-Lasern in der Zahn- und Augenmedizin kann die Bestrahlungsstärke Werte im Bereich von $10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ erreichen.

Für eine mögliche Erzeugung ionisierender Strahlung gilt auch hier wieder, dass ein Plasma mit entsprechend energiereichen Elektronen entstehen muss. Eine Abschirmung der LIS zwischen dem Laserfokus und dem unmittelbar benachbarten Gewebe des Patienten ist nicht oder nur sehr schlecht möglich. Der sehr kurze Abstand von wenigen Millimetern bis zum gesunden Gewebe führt nicht zur ausreichenden Schwächung der LIS.

In wenigen Jahren werden voraussichtlich UKP-Laseranlagen zur Tattoo-Entfernung eingesetzt, deren Wirkung bezüglich des Schutzes vor ionisierender Strahlung berücksichtigt werden muss. Bei der Tattoo-Entfernung auf der Haut sollte kein Plasma erzeugt (Hautabtrag), sondern die Bindungen der Farbstoffmoleküle aufgebrochen, also der Farbstoff ausgeblieben werden. Wenn kein Plasma erzeugt wird, ist davon auszugehen, dass auch keine LIS erzeugt wird. Weitere Beispiele der Anwendung von UKP-Laserstrahlung am Menschen mit dem Potenzial LIS zu erzeugen, sind im Leitfaden „Laserstrahlung“ dargestellt (Reidenbach et al. 2019, Abbildung 2 und Tabelle 13).

3.3.3 Weitere Anwendungen von UKP-Lasern

Neben den bereits aufgeführten Anwendungen gibt es weitere, nachfolgend nur exemplarisch aufgeführte Einsatzzwecke von UKP-Lasern. Darüber hinaus erschließt der Einsatz von UKP-Lasern kontinuierlich neue Anwendungen.

Für die **Untersuchung von atmosphärischen Prozessen** werden in der Forschung UKP-Laser mit geringerer mittlerer Leistung aber sehr hoher Pulsleistung z. B. zur Auslösung und Ablenkung von Blitzen eingesetzt. Nach erfolgreichem Nachweis der Führung von Blitzen im Labor Ende der 1990er Jahre, gelang jüngst auch der Versuch im Freien (Houard et al. 2023). Intensive Laserpulse (Pulsdauer im ps-Bereich, Pulsleistung im TW-Bereich) heizen die Luft stark auf, sodass viele Luftmoleküle in die kühlere Umgebung entweichen. Es entsteht entlang des Laserstrahls eine Art Kanal mit sehr geringer Luftdichte, ein sogenanntes Filament, in dem die Luft erheblich leitfähiger ist als in der Umgebung.

Die **Ultrakurzzeitspektroskopie** ist eine optische Methode zur zeitaufgelösten Messung der elektronischen und optischen Eigenschaften von organischen und anorganischen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen. Sie beruht auf der Beobachtung der zeitlichen Entwicklung eines optischen Signals und liefert Informationen über lineare und nichtlineare Eigenschaften der Materie, zu deren Untersuchung viele verschiedene Methoden eingesetzt werden wie z. B. die Lumineszenzspektroskopie, das Vierwellenmischen und die Pump-Probe-Spektroskopie. Für die standardmäßige Erzeugung von fs-Pulsen ist am weitesten verbreitet der Einsatz eines Titan-Saphir-Lasers, dessen Pulse mit verschiedenen Techniken auf sehr hohe Pulsleistungen (> 20 TW) verstärkt und bei dem ein weites Frequenzspektrum mittels Frequenzverdopplung, nicht-linearer Frequenzmischung oder Weißlichtpulserzeugung abgedeckt werden kann.

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die **Erzeugung von THz-Strahlung**. THz-Strahlung, auch Submillimeterwellen-Strahlung genannt, liegt im elektromagnetischen Spektrum zwischen der Infrarot- und der Mikrowellenstrahlung. Sie durchdringt viele Materialien (z. B. Papier, Kleidung, Polymere, Gläser, Keramiken und organisches Gewebe), sie wird aber von Wasser stark absorbiert und von Metallen reflektiert. Sie wirkt nicht ionisierend und hat eine Energie im Bereich charakteristischer Schwingungs- oder Rotationsbanden von Festkörpern und Molekülen. Die Kombination von abbildenden Verfahren mit spektroskopischen Messungen erlaubt den Einsatz in neuen Anwendungsfeldern, insbesondere im Bereich der zerstörungsfreien Materialprüfung, der Qualitätskontrolle oder der Sicherheitstechnologie, z. B. als Körperscanner für die Sicherheitskontrolle an Flughäfen. Bisher war THz-Strahlung kaum zu erzeugen, inzwischen können mit Hilfe von Femtosekunden-Lasern in Halbleitern oder nichtlinear-optischen Materialien sehr kurze THz-Pulse mit einem extrem breiten Spektrum erzeugt werden. Die optische Anregung kann mit Wiederholraten bis in den GHz-Bereich erfolgen, die Laserpulsenergie reicht bis in den mJ-Bereich.

3.3.4 UKP-Laser zur gezielten Erzeugung von ionisierender Strahlung

Die gezielte Erzeugung von ionisierender Strahlung wird für die Grundlagenforschung wie auch für die Anwendung, z. B. in der medizinischen Therapie und Diagnostik, aber auch bei Prüf- und Analyseverfahren, verfolgt. Häufig werden dazu UKP-Laser verwendet, von denen einige Pulsleistungen von mehr als einem TW erreichen können. Mit diesen Hochleistungs-Lasern können Bestrahlungsstärken von $\geq 10^{18} \text{ W cm}^{-2}$ realisiert werden (Mourou 2019) und Elektronen relativistisch beschleunigt werden (Umstadter 2003). Derartige Höchstfeld-Laseranlagen befinden sich in der Regel in Forschungseinrichtungen und erfordern als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung eine Genehmigung nach Strahlenschutzrecht. Im Folgenden werden zur Abgrenzung zu Laseranlagen, die nicht zur gezielten Erzeugung von LIS betrieben werden, und zum umfassenderen Verständnis der im Beratungsauftrag erfragten Prozesse, die zur Entstehung ionisierender Strahlung durch Laser führen, auch verschiedene Verfahren zur gezielten Erzeugung von ionisierender Strahlung vorgestellt:

Bei der **Elektronenstrahlerzeugung** werden sehr intensive Pulse eines UKP-Lasers mit Bestrahlungsstärken von $\geq 10^{18} \text{ W cm}^{-2}$ in ein Gas fokussiert. Dabei erzeugt das elektromagnetische Feld des Laserstrahles ein Plasma und kann durch Strahlungsdruck die Elektronen aus

dem Gebiet der höchsten Bestrahlungsstärke entfernen (Malka et al. 2008). In der dadurch entstandenen positiven Raumladungszone, die sich mit dem Laserpuls mitbewegt, können wiederum Elektronen relativistisch auf Energien von bis zu mehreren GeV beschleunigt werden (Kielfeldbeschleunigung) (Gonsalves et al. 2019, Malka et al. 2008). Die nichtrelativistische Erzeugung von Elektronenstrahlung durch UKP-Laseranlagen konnte nur vereinzelt beobachtet werden. So wurde bei Bestrahlungsstärken von ca. $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ mit Laserpulsenergien von einigen 10 mJ bis einigen 100 mJ, Pulsdauern im fs-Bereich und der Nutzung eines Vorpulses zur Plasmaerzeugung, Elektronenstrahlung mit Energien bis zu einigen 100 keV beobachtet (Bastiani et al. 1997).

Durch das Auftreffen eines ultrahochintensiven Laserpulses auf einen Festkörper kann es bei Bestrahlungsstärken von $\geq 10^{18} \text{ W cm}^{-2}$ durch verschiedene Mechanismen zur **Röntgenstrahlerzeugung** mit Photonenergien von einigen 10 keV (Umstadter 2003) und Röntgenstrahlung von bis zu einigen MeV (Schwoerer et al. 2001) kommen. Bei diesen Bestrahlungsstärken können die Elektronen eines Plasmas auf nahezu Lichtgeschwindigkeit und durch das magnetische Feld des Lasers in die Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls beschleunigt werden. Bei kleineren Bestrahlungsstärken kann die Röntgenemission nur mit in der Forschung realisierbaren Laserparametern in einen Photonenergiebereich bis zu 100 keV getrieben werden (z. B. Weisshaupt et al. 2014).

Für eine direkte Beschleunigung von Ionen reichen selbst die höchsten Feldstärken nicht aus, die momentan mit Lasern erzeugt werden können. Da die Ionen im Vergleich zu Elektronen um mehrere Größenordnungen höhere Massen besitzen, sind sie zu träge, um direkt von Laserstrahlung beschleunigt zu werden, selbst wenn der UKP-Laser Pulselistungen von mehreren PW aufweist. Ionen können allerdings indirekt über mehrere Mechanismen beeinflusst werden. Für die **Ionenstrahlerzeugung** werden meist dünne Folien in den Fokus eines Laserstrahls gebracht. Der Laserstrahl erzeugt ähnlich wie bei der Elektronenbeschleunigung ein Plasma und überträgt Energie an die Elektronen. Durch die Beschleunigung der Elektronen kann es zu einer räumlichen Trennung von Elektronen und der nun positiv aufgeladenen Folie kommen, die über einige Pikosekunden stabil sein kann. Dieses Feld ist in der Lage, auch Ionen zu beschleunigen (Schaeffer et al. 2023, Umstadter 2003). Protonen erreichen dadurch mit den momentan aufgebauten Lasern Energien von bis zu 100 MeV (Zimmer et al. 2021).

3.4 Begründung der Empfehlungen und Stellungnahmen der SSK

3.4.1 Ursache der unbeabsichtigten Erzeugung von LIS

Die unbeabsichtigte Erzeugung von LIS mit Energien $> 5 \text{ keV}$ kann auf eine einfache Laserstrahl-Plasma-Wechselwirkung und auf die dabei erzeugten sogenannten „heißen“ Plasmaelektronen eingeschränkt werden. Die relativistische Teilchenbeschleunigung bzw. Kielfeldbeschleunigung (Plasmabeschleunigung) auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit und die Laserstrahl-Materie-Wechselwirkung bei sehr hohen Laserpulsenergien im kJ-Bereich sind technologisch und konzeptionell so komplex, dass eine unbeabsichtigte Erzeugung von LIS aufgrund dieser Prozesse somit unter den genannten Bedingungen aktuell ausgeschlossen werden kann.

3.4.2 Maßnahmen zur Sicherstellung des Strahlenschutzes bei Laseranlagen, insbesondere zur Materialbearbeitung

3.4.2.1 Aktuelle Regelung

Anlage 3 Teil C Satz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) regelt den genehmigungs- und anzeigenfreien Betrieb von Laseranlagen basierend auf den beiden Kriterien Ortdosisleistung und Bestrahlungsstärke. Zur Unterstützung der Durchführung und Dokumentation der notwendigen

Messung der Ortsdosiseleistung wurde in einem Rundschreiben des BMUV ein Prüfkonzept für offene und vollständig umschlossene Laseranlagen veröffentlicht (BMUV 2022). In Tabelle 2 sind die einzuhaltenden Obergrenzen der Ortsdosiseleistung mit ihrem Bezug zur gestuften behördlichen Zulassung angegeben.

Tabelle 2: Gestufter Ansatz der behördlichen Zulassungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung von ionisierender Strahlung und Laseranlagen außerhalb der Anwendung am Menschen – dabei ist für den genehmigungs- und anzeigenfreien Betrieb zu beachten, dass die Bestrahlungsstärke einen Wert von $1 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ nicht überschreiten darf.

Rechtliche Rahmenbedingung	Obergrenze der Ortsdosiseleistung
Genehmigungs- und anzeigenfreier Betrieb nach § 7 StrlSchV i.V.m. Anlage 3 Teil C Satz 2 (StrlSchV 2018) einer Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung	$1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in 10 cm Abstand von der berührbaren Oberfläche
Anzeigebefürftiger Betrieb nach § 17 Absatz 1 Satz 1 Nr. 4 StrlSchG (StrlSchG 2017) einer bauartzugelassenen Vollschutzanlage nach § 23 StrlSchV	$3 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in 10 cm Abstand von der berührbaren Oberfläche
Anzeigebefürftiger Betrieb nach § 17 Absatz 1 Satz 1 Nr. 3 StrlSchG (StrlSchG 2017) einer Laseranlage	$10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in 10 cm Abstand von der berührbaren Oberfläche
Genehmigungsbedürftiger Betrieb nach § 12 Absatz 1 Nr. 1 StrlSchG (StrlSchG 2017) einer Laseranlage als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung	Keine allgemeine Begrenzung (ggf. Begrenzung durch Genehmigungsauflagen)

Bei einer vollständig umschlossenen Laseranlage ist die berührbare Oberfläche die Außenwand des Schutzgehäuses. Bei einer offenen Laseranlage ist mit Bezug auf Empfehlung 1 die berührbare Oberfläche zu definieren. Hierbei ist bezüglich der gesetzlichen Anforderungen zu prüfen, ob die berührbare Oberfläche dem Ort der Plasmaentstehung bzw. dem Ort der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Material gleichgesetzt werden kann. In der Praxis sollte die Ortsdosiseleistung an einer offenen Laseranlage in einer Entfernung von 10 cm vom Auf treffpunkt des Laserstrahls auf dem Target bestimmt werden.

Die in Tabelle 2 angegebenen Werte von Ortsdosiseleistungen in 10 cm Abstand von der berührbaren Oberfläche dienen als Basis für die Ermittlung der einzusetzenden Abschirmung. Da für die Gewährleistung des Strahlenschutzes auch Teilkörperdosen relevant sein können, sind gemäß Anlage 18 StrlSchV (StrlSchV 2018) für die Messung der Ortsdosiseleistung neben der Umgebungs-Äquivalentdosiseleistung $\dot{H}^*(10)$ je nach betrachtetem Schutzziel ggf. auch die Messgrößen (Alberts et al. 1994) Richtungs-Äquivalentdosiseleistung $\dot{H}(3, \Omega)$ und Richtungs-Äquivalentdosiseleistung $\dot{H}(0,07, \Omega)$ zu berücksichtigen.

3.4.2.2 Festlegung von Betriebsparametern

Ein umfassender und belastbarer Satz an Kriterien abhängig von den Betriebsparametern nach Tabelle 3, der das Ortsdosiseleistungskriterium (vgl. Tabelle 2) ersetzen könnte (vgl. Empfehlung 2), kann auf der Grundlage bisheriger experimenteller und theoretischer Arbeiten nicht ermittelt werden. Auf der Grundlage bisher durchgeföhrter Untersuchungen, unter Einbeziehung der physikalischen Wirkungsmechanismen, kann das Gefahrenpotenzial einer UKP-Laseranlage zurzeit nur für die Laser-Mikromaterialbearbeitung eingeschätzt werden.

Tabelle 3: Einflussgrößen und deren Wirkungen auf die Dosisleistung der laserinduzierten Röntgenstrahlung bei UKP-Laseranlagen (Schille et al. 2021a)

Einflussgröße		Wirkung
laserseitig	Bestrahlungsstärke	- eine Verdopplung der Bestrahlungsstärke erhöht die Dosisleistung um rund das Zehnfache
	Pulsenergie	- mit höherer Pulsenergie sind tendenziell höhere Dosisleistungen zu erwarten, die freigesetzte Röntgenstrahlung nimmt dabei nichtlinear zu - der Einfluss der Bestrahlungsstärke auf die Dosisleistung ist stärker zu bewerten (s. oben)
	Mittlere Laserleistung	- die Dosisleistung skaliert annähernd linear mit der mittleren Laserleistung - ACHTUNG: Wirkung höherer Pulsenergien beachten; stark erhöhte Dosisleistung bei hochrepetierenden Laserprozessen oder im Laser-Burst-Modus, insbesondere bei kleinen geometrischen Pulsabständen
	Pulswiederholfrequenz	- die Dosisleistung skaliert annähernd linear mit der Pulswiederholfrequenz durch Akkumulation der pro Laserpuls freigesetzten Röntgenstrahlung - ACHTUNG: stark erhöhte Dosisleistungen bei Pulswiederholfrequenzen im MHz-Bereich oder im Laser-Burst-Modus infolge Laserpuls-Plasma-Interaktion
	Pulsdauer	- tendenziell ist für Pulse längerer Dauer eine höhere Dosisleistung zu erwarten
	Fokus-durchmesser	- die Verdopplung der Fokusfläche bei konstanter Bestrahlungsstärke erhöht die Dosisleistungen bis zu 2,5fach - mit zunehmender Fokusfläche verschieben sich Spektrum und Amplitude zu höheren Photonenergien
	Wellenlänge	- bei Laserstrahlung kürzerer Wellenlänge werden tendenziell geringere Dosisleistungen freigesetzt
	Polarisation	- parallel zur Scanrichtung polarisierte Laserstrahlung erhöht die Dosisleistung infolge Resonanzabsorption
prozesseitig	Bestrahlungsregime	- beim Laserbohren oder der Tiefengravur wird die freigesetzte Röntgenstrahlung an den Wandungen abgeschirmt, wodurch sich im Laserprozess fortlaufend die Dosisleistung reduziert - ACHTUNG: durch Rückkopplung der einfallenden Laserstrahlung im Laserplasma erhöht sich die Dosisleistung, z.B. im stationären Laserprozess, beim Lasedrehen oder Scannen mit hohem Pulsüberlapp
	Scanrichtung	- eine höhere Dosisleistung wird entgegengesetzt der Scanrichtung freigesetzt
	geometrischer Pulsabstand	- kleine geometrische Pulsabstände erzeugen eine größere Oberflächenrauheit, die zu geringeren Dosisleistungen führen (s. Einfluss Oberflächenrauheit) - ACHTUNG: kleine Pulsabstände (μm-Bereich) bei hochrepetierenden Laserprozessen verstärken die Dosisleistung durch Rückkopplungen im Laserplasma
	Linienabstand	- größerer Linienabstande haben eine höhere Dosisleistung zur Folge
	Scananzahl	- tendenziell nimmt die Dosisleistung mit zunehmender Scananzahl ab
	Fokuslage	- die höchste Dosisleistung entsteht am Ort der höchsten Bestrahlungsstärke, thermische Drift optischer Komponenten beim Einsatz hoher mittlerer Laserleistungen beachten
	Crossjet	- ein größerer Volumenstrom hat eine höhere Dosisleistung zur Folge
	Absaugung	- mit größerem Abstand der Absaugung und geringerer Strömungsgeschwindigkeit nimmt die Dosisleistung zu
materialseitig	Einfallswinkel	- ein schräger Strahleinfall vergrößert den Einfallswinkel zwischen Laserstrahlung und Plasmaflanke, was bei Resonanzabsorption die Dosisleistung tendenziell erhöht
	Werkstoff	- höhere Dosisleistungen treten bei Elementen mit höherer Ordnungszahl auf - höchste Dosisleistung wurde an Wolfram festgestellt, an Stahl- bzw. Edelstahlwerkstoffen ist die Röntgenemission vergleichbar hoch
	Oberflächenbeschaffenheit	- eine höhere Oberflächenrauheit führt durch die Abschirmung der Röntgenstrahlung an mikroskopisch kleinen Substrukturen (vgl. abschirmende Wirkung von Bohrlöchern oder Gräben) zu geringeren Dosisleistungen
	Bauteilgröße	- die großflächige Laserbearbeitung unter gleichen Bestrahlungsbedingungen und Dosisleistungen setzt eine größere Menge (Dosis) an Röntgenstrahlung frei

Datensätze, die insbesondere außerhalb der Laser-Mikromaterialbereitung den genehmigungs- und anzeigenfreien Betrieb von Laseranlagen ohne eine messtechnische Prüfung erlauben, stehen derzeit nicht zur Verfügung. Dies führt aus Sicht der SSK zu einem hohen messtechnischen Prüfaufkommen und damit verbundenen Kosten. Die SSK schlägt daher vor, einen entsprechenden Datensatz, u. a. durch weitere Forschungstätigkeiten, zu erarbeiten.

3.4.2.3 Schutzgehäuse

Die beste technische Schutzmaßnahme bei allen LIS-erzeugenden Laseranlagen ist eine vollständige und überwachte Umschließung des Entstehungsortes der LIS mit einem ausreichend strahlungsschwächen Schutzgehäuse (vgl. Empfehlung 3).

In den Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) mit den Teilen zur inkohärenten optischen Strahlung (TROS IOS 2013) und zur

Laserstrahlung (TROS Laserstrahlung 2013) liegt der Schwerpunkt auf dem Schutz vor direkten und indirekten Gefährdungen der Augen und der Haut der Beschäftigten durch optische Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz. Als indirekte Gefährdungen werden dabei u. a. vorübergehende Blendung, Freisetzung von Gefahrstoffen sowie Brand- und Explosionsgefahr betrachtet. Für eine Vielzahl an Gefährdungen werden in den TROS Schutzmaßnahmen angegeben, wobei insbesondere herstellerseitig vorgesehene technisch-konstruktive Schutzmaßnahmen an den Laseranlagen grundsätzlich zu bevorzugen sind. Das häufig als Schutzmaßnahme gegen das Austreten von Laserstrahlung um den Prozess- oder Arbeitsbereich eingesetzte Schutzgehäuse ist aber nicht zwangsläufig ein ausreichender Schutz vor LIS. Insbesondere bei offenen Laseranlagen erfolgt die Schwächung von LIS nur durch die Luftabsorption und geometrische Effekte (z. B. Abstandsquadratgesetz).

Der wesentliche Teil der LIS, insbesondere bei Laseranlagen in der Materialbearbeitung, liegt im Energiebereich von ca. 2 keV bis etwa 15 keV (Behrens et al. 2019, Legall et al. 2018, Weber et al. 2019), wobei strahlenschutzrechtlich ionisierende Strahlung ab 5 keV zu berücksichtigen ist (StrlSchG 2017). Die freien Elektronen des Plasmas werden schon durch die umgebende Luft stark absorbiert oder vollständig abgebremst. Daher sind bei den meisten Laseranlagen nur die Strahlungsanteile der Photonen, d. h. die entstehende Brems- und die charakteristische Strahlung für die Konzeption der Abschirmung, zu betrachten.

Die häufig für das Schutzgehäuse von Laseranlagen verwendeten Werkstoffe sind Stahl, Aluminium oder Metalllegierungen. Ein Schutzgehäuse aus Stahlblech mit einer Wandstärke von etwa 1 mm bis 2 mm kann für viele Laseranlagen bereits einen ausreichenden Laser- und Strahlenschutz bieten (Legall et al. 2022, Schmitt Rahner et al. 2024). Für Laseranlagen, die mit Bestrahlungsstärken von mehr als 10^{16} W·cm⁻² oder mit Pulsfolgen, bei denen der Folgepuls mit dem Plasma des Vorpulses wechselwirkt (Burst-Modus), betrieben werden, muss dagegen ggf. auch die Abschirmung von LIS mit einer Energie von mehr als 40 keV berücksichtigt werden. Hierfür kann z. B. eine Erhöhung der Wandstärke oder die Anbringung zusätzlicher Abschirmmaterialien aus Werkstoffen mit höherer Dichte und Kernladungszahl erforderlich sein. Grundsätzlich sollte das Schutzgehäuse als Abschirmung gegen LIS ausgelegt werden. Der Begriff der vollständig umschlossenen Laseranlage ist im Kapitel Begriffserklärungen für den Kontext dieses Dokuments definiert. Im Rahmen des Strahlenschutzrechts sind der Begriff der vollständigen Umschließung und entsprechende technische Anforderungen noch zu definieren.

Schutzgehäuse von Laseranlagen in der Materialbearbeitung sind häufig mit Sichtfenstern ausgestattet, um den Bearbeitungsprozess direkt beobachten zu können. Diese Beobachtungsfenster dienen normalerweise nur dem Schutz vor Laserstrahlung und bestehen meist aus dünnem Kunststoff oder ggf. Mineralglas. Diese Materialien sind aufgrund ihrer zu geringen Abschirmwirkung als Schutz vor der LIS nicht geeignet. Bei höheren Photonenenergien können Laserschutzfenster aus Mineralglas beispielsweise erst dann geeignet sein, wenn sie eine sehr hohe Gesamtstärke (eine Wandstärke von 36 mm Mineralglas entspricht der Abschirmwirkung von 1 mm Stahl bei einer Photonenenergie von 30 keV) besitzen, die Bestrahlungsstärke des fokussierten Laserstrahls nicht größer als 10^{14} W cm⁻² ist und kein Burst-Modus angewendet wird (Legall et al. 2020). Um den Einbau von Gehäusefenstern und damit mögliche Schwachstellen im Strahlenschutz zu vermeiden, sollten zukünftig vermehrt technische Systeme wie Kameras zur Beobachtung des Laserbearbeitungsprozesses genutzt werden.

Weitere Schwachstellen von Schutzgehäusen, die unter dem Gesichtspunkt des Strahlenschutzes betrachtet werden müssen, können Bauteilstöße oder Verbindungen unterschiedlicher Materialien sein. Im Außen- und Innenbereich eines Schutzgehäuses sollten dabei folgende Orte auf mögliche Strahlungslecks überprüft werden:

- Kanten und Eckverbindungen,
- Fenstereinfassungen,
- Verschraubungen oder Vernietungen,
- Gravuren,
- Schweißstellen, insbesondere wenn sie (z.B. von Lack oder Plaketten) verdeckt sind,
- Türen, Teilezuführungen, Löcher, Lufteinlässe, Dichtungen und Schlauchdurchführungen sowie
- angebrachte Etiketten oder Plaketten.

Zur Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte des Strahlenschutzes sind bei LIS-erzeugenden Laseranlagen häufig Schutzgehäuse notwendig. Zur Dimensionierung der Schutzwände sind folgende Kenntnisse notwendig:

1. Zu unterschreitende Ortsdosisleistung gemäß Tabelle 2,
2. quantitatives Energiespektrum der Photonen im Innenraum des Schutzgehäuses,
3. Abstand vom Laserfokus bis zur Innenseite des Schutzgehäuses,
4. energieabhängiger Massenschwächungskoeffizient des Werkstoffes der Schutzwand und
5. Dicke der Schutzwand.

Aus diesen fünf Größen lassen sich die Parameter für die Konstruktion und der Werkstoff der Schutzwand festlegen.

Bei der Identifikation sehr kleinfächiger Strahlungslecks (siehe oben) ist zu beachten, dass konventionelle Dosisleistungsmessgeräte hierfür häufig nicht geeignet sind. Da die schmalen Strahlenbündel an solchen Strahlungslecks nur eine Teilausleuchtung der im Verhältnis zum Strahlenbündel meist relativ großen Detektoren bewirken, kann die Dosisleistung an solchen Stellen systematisch unterschätzt werden. Diese Problematik ist schon von der Prüfung von Röntgeneinrichtungen bekannt. Ob eine Teilausleuchtung vorliegt, kann ggf. durch eine Abstandsvariation und die Prüfung der Abweichung vom Abstandsquadratgesetz unter Beachtung des Massenschwächungskoeffizienten der Luft verifiziert werden. Für qualitative Messungen (u. a. zur Identifikation von Strahlungslecks) können auch Röntgenfilme oder Röntgenspeicherfolien (CR-Folien) verwendet werden. Dafür wird das zu untersuchende Gehäuse oder der zu untersuchende Umbau großflächig und überlappend mit Röntgenfilm oder CR-Folie abgedeckt. Die Anlagenparameter sollten im Hinblick auf die Einflussgrößen der LIS (siehe Tabelle 3) so gewählt werden, dass das Maximum an Dosisleistung im Inneren des Schutzgehäuses (Worst Case) während der Strahlungsdurchlassprüfung erzeugt und während der Prüfung konstant gehalten wird. Nach der Exposition erfolgt die Auswertung mit handelsüblichen Auslesegeräten, welche z. B. in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt werden. An den identifizierten Strahlungslecks ist abschließend die Ortsdosisleistung quantitativ zu bestimmen, ggf. unter Anwendung einer Korrektur zur Berücksichtigung einer möglichen Teilausleuchtung des Detektors.

Die Wirksamkeit aller Abschirmmaßnahmen muss stets messtechnisch verifiziert werden. Wenn das für die messtechnische Verifizierung notwendige Feld ionisierender Strahlung nicht mithilfe eines Laserbearbeitungsprozesses stabil erzeugt werden kann, so kann die durch die Laseranlage erzeugte LIS z. B. durch eine Röntgenröhre mit geringen Abmessungen (Schmitt Rahner et al. 2024) ersetzt werden. Dabei kann eine transportable Röntgenröhre mit einer 3D-Schwenkeinrichtung und einer Hochspannungsversorgung am Ort des Auftreffbereiches der

Laserstrahlung installiert werden. Die mit der Röntgenröhre erzeugten Werte für die Dosisleistung und die Energieverteilung müssen mindestens den Werten des durch die LIS erzeugten Strahlungsfeldes entsprechen.

Bei Laseranlagen mit Schutzgehäuse mit offenbaren Gehäuseteilen ist zu gewährleisten, dass eine Strahlenexposition einer Person verhindert wird. Dafür sind Sicherheitseinrichtungen (wie sie z. B. in DIN 54113-1 (DIN 54113-1:2018) für Röntgeneinrichtungen beschrieben sind) einzusetzen, die die Maschine bei Öffnung des Schutzgehäuses sicher abschalten. Die Verwendung von Strahlungslabyrinthsystemen für die LIS ist ebenfalls möglich. Die Anforderungen an solche Labyrinthsysteme, z. B. zur Materialzuführung, sollten dabei mit den bestehenden Anforderungen an herkömmliche Röntgeneinrichtungen harmonisiert sein.

Viele der aktuellen Laseranlagen verfügen zum Schutz vor der Laserstrahlung bereits über Sicherheitseinrichtungen, die aber auch den Anforderungen nach dem Strahlenschutzrecht für ionisierende Strahlung genügen müssen. Um diesen Anforderungen zu entsprechen, müssen ggf. bestehende Sicherheitseinrichtungen angepasst werden. Dabei sind u. a. folgende Anforderungen einzuhalten:

- Der Laserbetrieb ist erst nach einer Verriegelung des Schutzgehäuses oder nach Überwachung der ordnungsgemäßen Schließung derselben zu ermöglichen. Ausnahmen bilden der Einstellbetrieb und Servicearbeiten für die dann zeitweise die Regelungen für nicht vollständig umschlossene Laseranlagen gelten müssen.
- Die Verriegelung oder Schließung des Schutzgehäuses ist mit Sicherheitseinrichtungen zu überwachen.
- Ein möglicher Eingriff in den Innen- oder den Bearbeitungsraum der Laseranlage mittels ggf. weiterer vorhandener Türen oder Klappen ist durch deren Überwachung (d. h. deren Integration in den Sicherheitskreis) zu verhindern.
- Bei Auftreten eines Fehlers (insbesondere bei den Sicherheitseinrichtungen) ist durch Fehlererkennung eine sichere Abschaltung der Maschine zu erzwingen.
- Ein Wiedereinschalten der Maschine ist bis zur vollständigen Beseitigung des aufgetretenen Fehlers zu verhindern.

Wenn die Laseranlage als bauartzugelassene Vollschutzanlage⁹ nach § 17 Absatz 1 Nr. 4 StrlSchG (StrlSchG 2017) betrieben wird, sind unter anderem zwei voneinander unabhängige Sicherheitseinrichtungen gemäß § 23 Satz 1 Nr. 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) vorgeschrieben. Aufgrund der höheren Gesamtsicherheit wird eine redundante Auslegung der Sicherheitseinrichtungen grundsätzlich für alle Laseranlagen empfohlen.

Spezifische technische Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen für Laseranlagen zur Umsetzung der Regelung gemäß § 23 Satz 1 Nr. 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) liegen zurzeit noch nicht vor. Da die technischen Anforderungen an eine Vollschutzanlage nach § 23 StrlSchV (StrlSchV 2018) aber an die Anforderungen an ein Vollschutzgerät gemäß § 21 StrlSchV (StrlSchV 2018) angelehnt sind, kann bei der Auslegung der Sicherheitseinrichtungen der Bericht Dos-59 der PTB (Dombrowski et al. 2017) herangezogen und in analoger Weise angewendet werden. Gemäß Abschnitt 9 dieses PTB-Berichts ist bei der konstruktiven Gestaltung der Sicherheitseinrichtungen für Vollschutzanlagen der „performance level e“ nach DIN EN 13849-1 (DIN EN 13849-1:2023-12) vorzusehen. Dies ist bei der Konzeption der Sicherheitseinrichtungen sowie bei den Anforderungen an die eingesetzten Sicherheitsschalter,

⁹ Bauartzugelassene Anlagen können unter erleichterten rechtlichen Randbedingungen betrieben werden.

-taster, Microcontroller etc. zu berücksichtigen¹⁰. Auch für Laseranlagen, die keine Vollschutzanlagen nach § 17 Absatz 1 Nr. 4 StrlSchG (StrlSchG 2017) sind, können dem PTB-Bericht (Dombrowski et al. 2017) Hinweise und Empfehlungen für die Konzeption der Sicherheitseinrichtungen entnommen werden.

Für die Erteilung einer Bauartzulassung für eine Laseranlage zur Erzeugung von ionisierender Strahlung ist das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zuständig.

Empfehlung 1 beinhaltet die Möglichkeit, vollständig umschlossene Laseranlagen zukünftig anzeigen- und genehmigungsfrei betreiben zu können, wenn die Ortsdosiseleistung in 10 cm Abstand von der berührbaren Oberfläche kleiner ist als $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ¹¹ und die Bestrahlungsstärke $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ nicht überschreitet (siehe Abbildung 2). Bei Einhaltung dieser Parameter ist eine Exposition von Personen durch LIS praktisch ausgeschlossen und der Aufbau eines Strahlenschutzregimes durch den Betreiber der Anlage folglich nicht notwendig. Eine analoge Regelung findet sich in § 8 i.V.m. Anlage 3 Teil D StrlSchV (StrlSchV 2018), in der geregelt wird, dass Störstrahler anzeigen- und genehmigungsfrei betrieben werden können, wenn die Spannung zur Beschleunigung der Elektronen 30 kV und die Ortsdosiseleistung bei normalen Betriebsbedingungen im Abstand von 0,1 m von der berührbaren Oberfläche $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ nicht überschreiten. Diese Regelung hat sich seit Jahrzehnten in der Praxis bewährt.

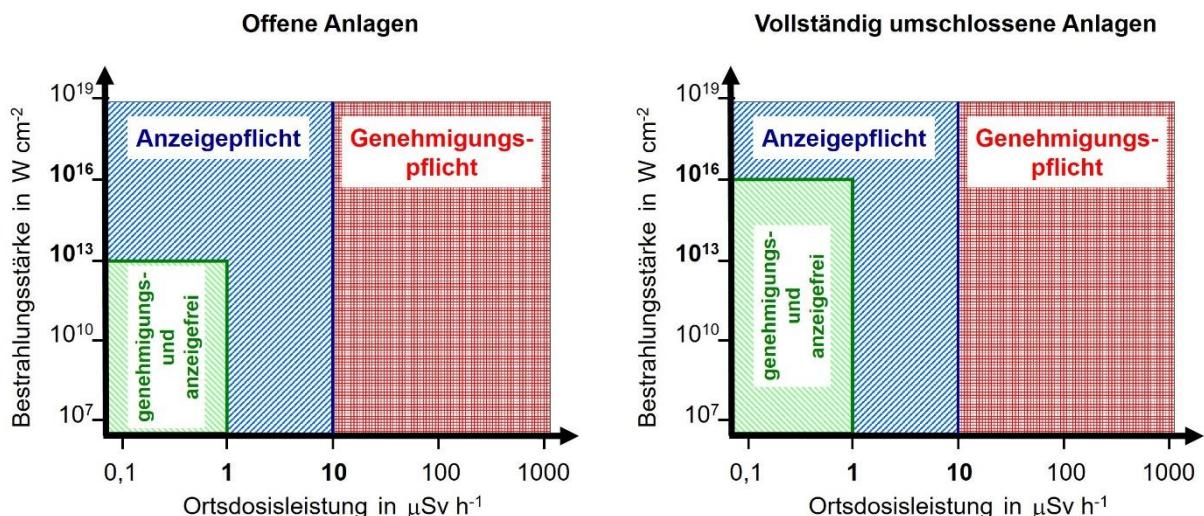


Abbildung 2: Empfohlene Bereiche für die Anzeige- und Genehmigungspflicht für nicht vollständig umschlossene Laseranlagen (links) und für vollständig umschlossene Laseranlagen (rechts) gemäß Empfehlung 1 in diesem Dokument. Hierbei bezieht sich die Ortsdosiseleistung auf einen Abstand von der berührbaren Oberfläche von 10 cm.

Ziel der Empfehlung 1 ist es deshalb, unnötigen behördlichen Aufwand beim Betreiben von sehr sicheren UKP-Laseranlagen zu vermeiden und die vorhandenen personellen und finanziellen Ressourcen für den notwendigen Strahlenschutz beim Betrieb von den UKP-Laseranlagen dort sicherzustellen, wo der Strahlenschutz nicht durch technische und bauliche Maßnahmen allein gewährleistet ist. So wird unnötiger Verwaltungsaufwand auf Seiten der Betrei-

¹⁰ Anmerkung: Viele Laseranlagen, insbesondere, wenn sie in der Materialbearbeitung eingesetzt werden, verfügen wegen des Schutzes vor Laserstrahlung und der Gefährdung durch bewegliche Teile im Bearbeitungsraum bereits über entsprechende Sicherheitseinrichtungen. Hier ist eine Harmonisierung der Anforderungen anzustreben.

¹¹ Die Bestimmung der Ortsdosiseleistung, insbesondere zur Überprüfung einer Anzeige- und Genehmigungsfreiheit, kann hierbei durch Messung, Berechnung oder Plausibilitätsbetrachtung erfolgen.

ber und Behörden vermieden und die Akzeptanz des Strahlenschutzes bei UKP-Laseranlagen, bei denen eine Exposition durch LIS möglich ist, erhöht.

3.4.2.4 Offene Laseranlagen

Laseranlagen, bei denen ein vollständig umschlossenes Schutzgehäuse nicht realisiert werden kann, werden als offene Laseranlagen bezeichnet. Offene Laseranlagen werden in der Regel zu Forschungs- und Entwicklungszwecken betrieben. Bei den meisten Anwendungen mit Ausnahme der Laser-Materialbearbeitung und der laserinduzierten Plasma-Spektroskopie (LIPS) wird dabei die Erzeugung eines Plasmas vermieden, da diese mit der Zerstörung des Untersuchungsgegenstandes und optischer Bauelemente einhergeht. Zu Forschungszwecken werden die optischen Aufbauten in der Regel von den Anwendern gestaltet und bei Bedarf verändert. Rechtlich unterliegen diese Aufbauten dem Arbeits- bzw. dem Laser- und Strahlenschutz. Sowohl bei vollständig umschlossenen als auch bei offenen Laseranlagen kann durch Fehlverhalten oder Unkenntnis über die Entstehung und die Gefahren von LIS eine unbeabsichtigte Exposition durch LIS wegen unzureichender oder fehlender Abschirmung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Gefahr einer solchen Exposition ist jedoch stark abhängig von den Betriebsparametern (insbesondere der Pulsfolgefrequenz und somit der Fähigkeit der Laseranlage, für den Strahlenschutz relevante LIS zu erzeugen) und der speziellen Anwendung. Aufgrund der fehlenden Abschirmung bei offenen Anlagen ist die Gefahr im Allgemeinen aber erhöht.

Als offene Laseranlagen gelten in diesem Sinne auch vollständig umschlossene Laseranlagen, deren Schutzgehäuse geöffnet oder dessen Sicherungssystem überbrückt ist. Dies beinhaltet neben einer vorgesehenen Überbrückung auch eine vorsätzliche Manipulation mit einfachen Mitteln, z. B. Büroklammer, Schraubendreher. Eine Reduzierung der Dosisleistung nur nach dem Abstandsquadratgesetz für Abstände im Meterbereich gewährleistet bei offenen, LIS erzeugenden Laseranlagen nicht notwendigerweise einen ausreichenden Strahlenschutz. Vorsorgliche Serviceregelungen in der Laser-Materialbearbeitung empfehlen beispielsweise den Einsatz von reduzierten Laserleistungen von nur 5 %, die aber nicht technisch überwacht werden. Eine Übertragung dieser Regelung auch auf alle LIS-erzeugende Laseranlagen wäre sinnvoll und sollte geprüft werden.

Bei offenen Laseranlagen existiert keine berührbare Oberfläche. Bei vollständig umschlossenen Laseranlagen ist die berührbare Oberfläche zur Bestimmung der Ortsdosisleistung in 10 cm Abstand das Schutzgehäuse. Bei offenen Laseranlagen ist in Analogie der Messpunkt zur Bestimmung der Ortsdosisleistung in 10 cm Abstand von dem Ort, an dem der Laserstrahl auf das Werkstück oder das im Fokuspunkt des Laserstrahles liegende Material trifft, zu sehen. Damit sind die Regelungen des Strahlenschutzrechtes formal anwendbar.

3.4.2.5 Nachweis des Strahlenschutzes bei Laseranlagen

Zur Zeit existiert ein Prüfkonzept (BMUV 2022, Schmitt Rahner et al. 2024) für den Betrieb von Laseranlagen mit einer Bestrahlungsstärke von bis zu $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$. Das Prüfkonzept (BMUV 2022) ist sowohl für vollständig umschlossene als auch offene Laseranlagen anwendbar. Laseranlagen zur Anwendung ionisierender Strahlung am Menschen fallen nicht in den Anwendungsbereich dieses Prüfkonzeptes. Laseranlagen zur Anwendung nicht ionisierender Strahlung am Menschen fallen hinsichtlich der Beurteilung des Strahlenschutzes in den Anwendungsbereich dieses Prüfkonzeptes. Gegenwärtig werden einige hundert UKP-Laseranlagen in der Augenheilkunde in Deutschland betrieben, die bisher nicht in Bezug auf den Schutz vor ionisierender Strahlung für den Patienten und für das Personal bewertet wurden. Die in der Ophthalmologie verwendeten UKP-Laseranlagen arbeiten mit Bestrahlungsstärken $> 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$,

teilweise mit mehr als $10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ (Pepose und Lubatschowski 2008, Tabelle 1) und sind somit zumindest anzeigepflichtig.¹²

Die als Stellungnahme formulierte (vgl. Kapitel 2) erforderliche Weiterentwicklung des Prüfkonzeptes für den Betrieb von Laseranlagen, die nicht am Menschen eingesetzt werden, ergibt sich aus folgenden Gründen:

- Die Anwendungsbereiche und die technische Ausführung der UKP-Laser entwickeln sich stetig weiter und insbesondere schneller als bei anderen Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung.
- Das 2022 veröffentlichte Prüfkonzept wurde in der Praxis nun schon von vielen Sachverständigen an vielen unterschiedlichen Anlagen erprobt, so dass der Erfahrungsrückfluss daraus genutzt werden sollte.
- Das BfS-Forschungsvorhaben mit der Forschungskennzahl 3620S22373 (Schmitt Rahner et al. 2024) hat Bedarf an einer Überarbeitung des Prüfberichtsmusters aufgezeigt.
- Die Umsetzung der Empfehlung 1 bedingt (hinsichtlich der Differenzierung zwischen vollständig umschlossenen und offenen Anlagen) auch eine Anpassung des Prüfkonzepts.

Zudem müssen die unterschiedlichen Gefährdungspotenziale der Anlagen berücksichtigt werden.

3.4.2.6 Das Ortsdosisleistungskriterium bei der Risikoklassifizierung

Für eine vereinfachte rechtliche Regelung sollte ein eindeutiger Satz an möglichst wenigen Laserparametern festgelegt werden, der die Einhaltung der Expositionsgrenzwerte garantiert.

In der Laser-Materialbearbeitung wurden 20 Einflussgrößen identifiziert (Schille et al. 2021a), die die Röntgenphotonenemission beeinflussen (siehe Tabelle 3). Dazu wurden neben den physikalischen Einflussgrößen (Pulsdauer, Pulsennergie, Wellenlänge, Einfallsinkel, resultierende Bestrahlungsstärke und Pulsfolgefrequenz) auch die in der Laser-Materialbearbeitung prozessabhängigen Einflussgrößen berücksichtigt, die im Wesentlichen die Einstrahlbedingungen des Laserstrahls auf die Materialoberfläche definieren. Diese vielen, zum Teil schwer messbaren Einflussgrößen, kombiniert mit der stetigen Weiterentwicklung der Lasertechnik machen es plausibel, dass das Einhalten der Expositionsgrenzwerte für LIS nicht durch das Einhalten einzelner Laserparameter nachgewiesen werden kann, da die entstehende Ortsdosisleistung aus dem Zusammenspiel der verschiedenen Parameter resultiert.

Die SSK stellt fest, dass das alleinige Kriterium einer Grenzbestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ für die Genehmigungs- und Anzeigefreiheit von offenen Laseranlagen gemäß Anlage 3 Teil C Satz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) für einen Großteil der Laser-Materialbearbeitungsanlagen nicht anwendbar ist. Die Grenzbestrahlungsstärke wurde auf Basis der Erkenntnisse im Jahr 2018 konservativ auf der Grundlage experimenteller Worst-Case-Untersuchungen (alle Geometrien und eine repräsentative Auswahl an Materialien) bei Pulsfolgefrequenzen von 400 kHz, einer Pulsdauer von 1 ps und Einzelpulsenergien von $10 \mu\text{J}$ bis $100 \mu\text{J}$ festgelegt (Legall et al. 2018). Aus diesen Untersuchungen wurde für eine Bestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ und eine Pulsfolgefrequenz von 400 kHz eine Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ von $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ (bei 1,5 W mittlerer Laserleistung) in einem Abstand von 42 cm in Luft zur Quelle abgeschätzt, was einer Einzeldosis pro Laserpuls von $7 \cdot 10^{-10} \mu\text{Sv}$ entspricht. Da die Dosisleistung im kHz-Bereich linear von der Pulsfolgefrequenz abhängt, ist für Laser mit einer Bestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ und ansonsten vergleichbaren Laserparametern

¹² Bei vier Herstellern wird bei der refraktiven Chirurgie mit einer Bestrahlungsstärke von $> 8 \cdot 10^{14} \text{ W cm}^{-2}$ am Auge gearbeitet (berechnet von G. Dittmar mit den Daten aus Tabelle 1 von (Pepose und Lubatschowski 2008)).

aber weniger als 400 kHz Pulsfolgefrequenz folglich keine Überschreitung der Grenzwertdosisleistung von $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in Bezug auf die Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ zu erwarten. Trotzdem unterliegen diese Anlagen der Anzeigepflicht. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass bei gleicher Bestrahlungsstärke aber ansonsten abweichenden Laserparametern (z. B. bei höheren Pulsfolgefrequenzen, Pulsdauern oder Pulsennergien) eine solche Grenzwertüberschreitung auszuschließen ist.

Für vollständig umschlossene Laseranlagen mit einem Schutzgehäuse von mindestens 1 mm Stahl kann aus Sicht der SSK hingegen das alleinige Kriterium einer Grenzbestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ für eine Genehmigungs- und Anzeigefreiheit verwendet werden. Diese Erkenntnis folgt aus neueren, nach 2018 bei einer Bestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ durchgeführten Dosisleistungsmessungen an UKP-Laseranlagen im Burst-Modus und bei Pulsdauern bis in den ps-Bereich (Holland et al. 2022, Schille et al. 2021a, Schille et al. 2021b).

Bei den im Burst-Modus durchgeführten Messungen zeigte sich bei einer aus der Energie des zeitlich unmodulierten Laserpulses (keine Aufteilung des Pulses in Einzelpulse des Burst-Modus) berechneten Bestrahlungsstärke von $1,6 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ und $3,8 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ im Vergleich zum ungeteilten Laserpuls sowohl im ns-Burst-Modus (Zeitabstand der Einzelpulse im ns-Bereich) als auch im ps-Burst keine Erhöhung der gemessenen Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ (Schille et al. 2021a, Schille et al. 2021b). Die für den ungeteilten Laserpuls gemessene Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ folgt dem Verlauf in (Legall et al. 2018). Diese Ergebnisse zeigen, dass bei den niedrigen Einzelpulsenergien im Burst aufgrund des nichtlinearen Anstiegs der LIS in Abhängigkeit von den Laserpulsenergien bei Bestrahlungsstärken unter $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ keine Erhöhung der Dosisleistung zu erwarten ist. Steigt die Bestrahlungsstärke hingegen auf Werte im Bereich von $10^{14} \text{ W cm}^{-2}$, so zeigen die an der PTB durchgeführten Messungen im ps-Burst aufgrund des nichtlinearen Verhaltens der LIS einen deutlichen Anstieg der erzeugten Photonenenergien und der Dosisleistung (Böttcher et al. 2022).

Eine Steigerung der Ortsdosisleistung mit dem Anheben der Pulsdauer bei konstanter Bestrahlungsstärke und konstanter Pulswiederholfrequenz wurde durch (Holland et al. 2022) bestätigt. Hier wurde bei einer konstanten Bestrahlungsstärke von $1,6 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ und einer Pulsdauer von 0,9 ps eine Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ von $20 \mu\text{Sv h}^{-1}$ (bei 1 W mittlerer Laserleistung) in 20 cm Abstand vom Laserplasma gemessen. Die Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ stieg auf $100 \mu\text{Sv h}^{-1}$ (bei 1 W mittlerer Laserleistung), wenn bei gleicher Bestrahlungsstärke die Pulsdauer von 0,9 ps auf 3 ps verlängert wurde. Diese Steigerung der Dosisleistung entspricht ungefähr einem Faktor 5. Da der bei diesen Pulsdauern wirkende physikalische Mechanismus der Röntgenerzeugung die sogenannte „Resonanzabsorption“ ist und somit die spektrale Verteilung des Emissionsspektrums mit der Bestrahlungsstärke skaliert, unterscheidet sich das Emissionsspektrum bei den betrachteten Pulsdauern bei gleicher Bestrahlungsstärke nur durch seine Amplitude aber nicht durch seinen spektralen Verlauf (Legall et al. 2022). Damit ist für eine Bestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ – unabhängig von der Pulsdauer – die LIS nahezu vollständig auf den Photonenenergiebereich unter 15 keV beschränkt (Behrens et al. 2019) und die exemplarisch für eine Pulsdauer von 1 ps und für höhere Bestrahlungsstärken konservativ ermittelte Abschirmdicke des Schutzgehäuses (Legall et al. 2018) auch für die UKP-Laseranlagen im ps-Bereich ausreichend. Für nähere Informationen zur Abhängigkeit des spektralen Verlaufs der LIS von der Bestrahlungsstärke beim Erzeugungsmechanismus der Resonanzabsorption wird auf Legall et al. 2022 verwiesen.

Bei offenen Laseranlagen müssen neben der Ortdosisleistung auch die Richtungs-Äquivalentdosisleistungen $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ und $\dot{H}'(3, \Omega)$ für den anzeige- und genehmigungsfreien Betrieb der Laseranlage berücksichtigt werden. Eine Abschätzung, bei welchen Pulsdauern und Pulsfolgefrequenzen für eine bestimmte Bestrahlungsstärke eine Überschreitung des Grenzwertes

der Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ zu erwarten ist, kann, wie im Weiteren beschrieben, erfolgen. Für die Bestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ kann bei gegebener Pulsdauer und gegebenem Fokusdurchmesser die zum Erreichen dieser Bestrahlungsstärke erforderliche Pulsennergie berechnet werden. Mit der Pulsennergie kann auf der Grundlage der in (Holland et al. 2022, Schille et al. 2022) publizierten Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ pro Watt die für eine gegebene Pulsfolgefrequenz zu erwartende Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ in einem Abstand von 0,1 m vom Entstehungsort abgeschätzt werden. Dabei ergibt sich bei einer Bestrahlungsstärke von $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ und einem typischen Fokusdurchmesser von $20 \mu\text{m}$ für eine Pulsdauer von 1 ps eine maximale zulässige Pulsfolgefrequenz von ca. 5 kHz um eine Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \Omega) = 25 \mu\text{Sv}$ in einer Stunde zu akkumulieren. Entsprechend ergibt sich für 100 fs eine Pulsfolgefrequenz von ca. 1 MHz, bei 300 fs eine Pulsfolgefrequenz von ca. 100 kHz und für 10 ps eine Pulsfolgefrequenz von ca. 1 kHz.

Wird für die betrachteten Pulsdauern die Bestrahlungsstärke jedoch um einen Faktor 10 niedriger gewählt, also $10^{12} \text{ W cm}^{-2}$, können aufgrund des nichtlinearen Abfalls der erzeugten LIS um mehrere Größenordnungen selbst bei sehr hohen Pulsfolgefrequenzen im MHz-Bereich keine Dosisleistungen mehr nachgewiesen werden. Wird die Entfernung des Messpunktes der Dosisleistung zum Entstehungsort der LIS mit einem realitätsnahen Aufenthaltsort (d. h. ein Abstand von 30 cm bis 1 m) angenommen, so erhöhen sich die maximal erlaubten Pulsfolgefrequenzen um eine bis zwei Größenordnungen. Weiterhin ist bei Bestrahlungsstärken unterhalb $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ mit Photonenergien kleiner 10 keV der Einsatz von Abschirmungen (z. B. Stellscheiben aus Glas oder PMMA) denkbar, um die durch die LIS hervorgerufene Hautdosis um mehrere Größenordnungen zu reduzieren. Bei einer angenommenen jährlichen Betriebsdauer der Laseranlage von 2 000 h, entspricht der Jahresgrenzwert der Hautdosis von 50 mSv einer Dosisleistung von $25 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Wird die jährliche Betriebsdauer reduziert, erhöht sich entsprechend die maximal zulässige Pulsfolgefrequenz. Die akkumulierten Einzelpulsdosen liegen dabei im aSv- bis pSv-Bereich, die Einzelpulsenergien im nJ- bis μJ -Bereich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die aktuelle Regelung zum genehmigungs- und anzeigenfreien Betrieb von UKP-Laseranlagen nach Anlage 3 Teil C Satz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) auch für offene Laseranlagen angewendet werden kann und einen sicheren Betrieb dieser Anlagen gewährleistet (vgl. Empfehlung 1). Die für offene Laseranlagen durchgeföhrten Berechnungen zeigen, dass ein Großteil der bei einer Bestrahlungsstärke von kleiner $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ betriebenen UKP-Laseranlagen keine LIS mit einer Photonenergie oberhalb 5 keV und einer Dosisleistung von größer als $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in 0,1 m Abstand vom Entstehungsort (vgl. Tabelle 2) erzeugt. Allerdings können UKP-Laseranlagen mit Bestrahlungsstärken unter $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ und einer langen Pulsdauer im ps-Bereich bei hohen Pulsfolgefrequenzen im kHz-Bereich und darüber LIS erzeugen. Deshalb ist für einen sicheren Betrieb das alleinige Bestrahlungsstärkekriterium nicht ausreichend und dort eine Prüfung der Laseranlagen durch Messung der Ortsdosisleistung in 10 cm Abstand vom Entstehungsort erforderlich. Wegen der fehlenden Abschirmung sollten hier neben der Ortdosisleistung auch die Richtungs-Äquivalentdosisleistungen $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ und $\dot{H}'(3, \Omega)$ für die Feststellung der Anzeige- und Genehmigungsfreiheit ermittelt werden. Aufgrund der niedrigen Photonenergien (unterhalb 10 keV) führt bei offenen Laseranlagen der Einsatz von geringen Abschirmdicken (z. B. Handschuhe, Kittel) bereits zur Reduzierung der LIS um mehrere Größenordnungen.

Bei vollständig umschlossenen Anlagen mit einem Schutzgehäuse von mindestens 1 mm dickem Stahl ist bei einer Bestrahlungsstärke bis maximal $10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ in jedem Fall von einer ausreichend starken Abschwächung der LIS durch die vollständige Umschließung (Schutzgehäuse) aufgrund der geringen Photonenergien im keV-Bereich (vgl. Abbildung 1) auszugehen.

Auch bei größeren Bestrahlungsstärken lässt sich die erzeugte niederenergetische LIS effektiv und ausreichend durch die vollständige Umschließung abschwächen, was durch eine entsprechende qualifizierte Dosisleistungsmessung zu verifizieren ist.

Erst bei einer Bestrahlungsstärke von $10^{16} \text{ W cm}^{-2}$ oder darüber, sind andere Erzeugungsmechanismen der LIS möglich, die dann auch zu deutlich höheren Energien bis in den MeV-Bereich führen können. Deshalb ist für den Betrieb dieser Anlagen eine Anzeigepflicht zu fordern.

Die LIS-Erzeugung hängt von einer größeren Anzahl an Einflussgrößen ab (vgl. Tabelle 3). Um nach einem durch eine Dosismessung festgestellten anzeige- und genehmigungsfreien Betrieb einen sicheren Betrieb der UKP-Laseranlage über die gesamte Betriebsdauer zu gewährleisten, ist vor einer wesentlichen Abweichung des Betriebes der Laseranlage eine erneute Überprüfung mit Messung der Dosisleistung zu fordern. Darüber hinaus ist durch eine verpflichtende Kennzeichnung der Anlage und des Betriebsraumes, z. B. durch ein Warnschild mit einem Hinweis auf eine potenzielle LIS-Erzeugung, der Anwender der Anlage auf mögliche Gefahren hinzuweisen.

3.4.2.7 Risikoklassifizierung ohne Ortsdosisleistungskriterium

Die sicherste Nachweismöglichkeit der Einhaltung der Grenzwerte des Strahlenschutzes ist das Messen der Ortsdosisleistungen unter Beachtung des Worst Case (BMUV 2022). Die Durchführung von Ortsdosisleistungsmessungen an Laseranlagen ist allerdings technisch aufwändig. Daher sollte die Anzahl der Ortsdosisleistungsmessungen auf die Laseranlagen eingegrenzt werden, bei denen nach aktuellem Stand des Wissens Messungen notwendig sind. Es ist daher wünschenswert, zukünftig den genehmigungs- und anzeigefreien Betrieb von Laseranlagen allein auf der Basis von Betriebsparametern zu erlauben. Nach dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik ist aber noch kein sinnvoller Satz von Betriebsparametern bekannt.

Ein möglicher Ansatz wäre eine strukturierte Zusammenführung von Daten zu den Prozessen und Materialien, den Betriebsparametern der Laseranlagen und den Messergebnissen der Ortsdosisleistung. Damit könnte die Prüfung der Anzeige- bzw. Genehmigungsfreiheit von UKP-Laseranlagen vereinfacht werden (vgl. Empfehlung 2). Diese Angaben könnten durch Hersteller bereitgestellt und ggf. durch die Prüfergebnisse der Sachverständigen ergänzt und in einer Datenbank als anonymisierte Datensätze gespeichert werden. Hierbei können wissenschaftliche Erkenntnisse über das Zusammenwirken der Einflussgrößen auf die Dosisleistung einfließen und quantifiziert werden. Gerade im Hinblick auf die sich ständig weiterentwickelnden Laser-technik erscheint dieser Ansatz sinnvoll.

3.4.2.8 Internationale Normung

Harmonisierte Regelungen, insbesondere in Form von Normen, für den Strahlenschutz bei LIS-erzeugenden Laseranlagen würden die Hersteller und Betreiber verlässlicher vor unsicheren Produkten schützen.

Der Bedarf für eine internationale Norm wurde auch schon von der Internationalen Organisation für Normung (ISO) im Jahr 2020 explizit benannt und im Jahr 2023 weiterhin bestätigt. Die Roadmap von ISO/TC85/SC2 wurde von der Advisory Group in der Sitzung am 02. Dezember 2020 um den Normungsbedarf (i.) bei UKP-Lasern ergänzt: „*Identify the needs in all sectors of activity, in particular regarding emerging issues like: i. Use of ultra-short pulse lasers in material processing and research*“.

Die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) im Deutschen Institut für Normung (DIN) und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) hat eine Unterarbeitsgruppe des DIN GK 852.0.1 „Röntgenstrahlung bei

der Ultrakurzpuls-laser-Materialbearbeitung“ gegründet. Für die anstehende Normungsarbeit sind über passende Projektförderung unterstützende finanzielle Mittel bereitzustellen.

Die Marktführer zur Herstellung von UKP-Laseranlagen in der Materialbearbeitung haben ihren Sitz in Deutschland, die Anlagen werden jedoch europa- und weltweit eingesetzt. Daher sollte eine Initiative zur Harmonisierung der Strahlenschutzanforderungen für die UKP-Laseranlagen, für deren Betrieb eine Anzeige oder Genehmigung notwendig ist, (von Deutschland gefördert) gestartet werden. Hiermit kann sowohl der Marktvorteil als auch das vorrangig in Deutschland vorhandene Wissen und die Erfahrung zielführend eingebracht werden.

Deutschland verfügt als erstes Land weltweit über konkrete Regelungen zum Strahlenschutz an UKP-Laseranlagen, die auf intensiven wissenschaftlichen Untersuchungen und Beratungen basieren. Dieser hohe und fundierte Stand sollte als Ausgangsbasis für eine weltweite Harmonisierung durch eine ISO- oder IEC-Norm (Internationale Elektrotechnische Kommission) genutzt werden. So kann nicht nur Doppelarbeit vermieden, sondern auch eine harmonisierte Absicherung der deutschen Strahlenschutzregelungen erreicht werden.

Des Weiteren werden die für Strahlenschutzmessungen an UKP-Laseranlagen notwendigen anspruchsvollen Dosimeter nur bei einem ausreichenden Marktbedarf entwickelt werden, was ebenfalls eine Harmonisierung der Messanforderungen erfordert.

3.4.3 Messung von LIS

Anzuwendende Messgrößen

Das StrlSchG (StrlSchG 2017) ist für ionisierende Strahlung mit Energien $\geq 5 \text{ keV}$ anzuwenden. Um nachzuweisen, dass die im StrlSchG (StrlSchG 2017) festgelegten Grenzwerte eingehalten sind, sollten im Allgemeinen Messungen durchgeführt werden. Die dabei relevante Messgröße (Anlage 18 Teil A zu § 171 StrlSchV (StrlSchV 2018)) ergibt sich aus den Eigenschaften des Strahlungsfeldes. Bei einer Ganzkörperexposition durch äußere Photonенstrahlung ist die Messgröße zu überwachen, die zur Abschätzung desjenigen Grenzwertes dient, der zuerst überschritten werden kann:

- Unterhalb einer mittleren Energie von 12 keV ist dies der Grenzwert der Organ-Äquivalentdosis für die Haut gemäß § 78 Absatz 2 Nr. 2 StrlSchG (lokale Hautdosis). Als Mess-Äquivalentdosis dient hier die Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \Omega)$ oder die Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$.
- Oberhalb einer mittleren Energie von 12 keV ist dies der Grenzwert für die effektive Dosis. Als Mess-Äquivalentdosis dient hier die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ oder die Tiefen-Personendosis $H_p(10)$.

Grundsätzlich ist immer zu prüfen, ob eine Teilkörperexposition durch äußere Photonенstrahlung, z. B. durch Strahlenaustritt durch Spalten oder Fenster, vorliegen kann. Hier sind dann die zur Abschätzung der Teilkörperexposition geeigneten Mess-Äquivalentgrößen $H'(0,07, \Omega)$, $H'(3, \Omega)$, $H_p(0,07)$ sowie die Augenlinsen-Personendosis $H_p(3)$ zu verwenden.

Bei offenen Laseranlagen oder bei Messungen innerhalb des Schutzgehäuses kann in unmittelbarer Nähe der Strahlungsquelle neben der Photonenstrahlung auch Elektronenstrahlung auftreten (vgl. Kapitel 3.2.4).

Anforderungen an konformitätsbewertete Messgeräte

Für Messungen, die sich aus den Forderungen des StrlSchG (StrlSchG 2017) ergeben, ist nach Mess- und Eichverordnung (§ 1 Absatz 1 Nr. 13 MessEV (MessEV 2014)) das MessEG (MessEG 2013) anzuwenden und die sich daraus ergebenden Anforderungen sind in den Anforderungen der PTB an Ortdosimetern zusammengefasst (PTB 2018).

Sofern für die geforderten Messzwecke keine dem MessEG (MessEG 2013) entsprechenden Messgeräte zur Verfügung stehen, kann die zuständige Behörde im Einzelfall dem Strahlenschutzverantwortlichen (SSV) die Verwendung anderer geeigneter Strahlungsmessgeräte gemäß § 90 Absatz 2 Satz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) gestatten (siehe Anhang A-2). Aufgrund der Komplexität der Anforderungen bezieht sich diese Gestattung grundsätzlich auf eine Kombination aus spezifiziertem Messgerät (mit Angabe der Seriennummer) und klar abgegrenzter Messaufgabe.

Kriterien zur Auswahl der Messgeräte

Bei der Auswahl des Messgerätes sind insbesondere der Energiebereich der Photonen und die zeitlich gepulste Charakteristik der LIS zu berücksichtigen. Die Energieverteilung des am Messort auftreffenden Photonenstrahlungsfeldes hängt dabei nicht nur von der Erzeugung, sondern auch von der Schwächung der Strahlung zwischen Entstehungsort und Messort ab. In Abbildung 3 ist dies graphisch für verschiedene Messsituationen zusammengefasst. Bei einer mittleren Photonenenergie unterhalb 12 keV ist die Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ zu messen. Oberhalb einer mittleren Photonenenergie von 12 keV ist $\dot{H}^*(10)$ zu messen. Eine Ausnahme bildet eine mögliche Teilkörperexposition, die dann über die Messung der Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ und im Falle einer Augenlinsenexposition die Richtungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}'(3, \Omega)$ zusätzlich erfasst werden muss. Die Mindestanforderungen an Dosisleistungsmessgeräte für Messungen an UKP-Laseranlagen sind auch in Anhang A-1 benannt.

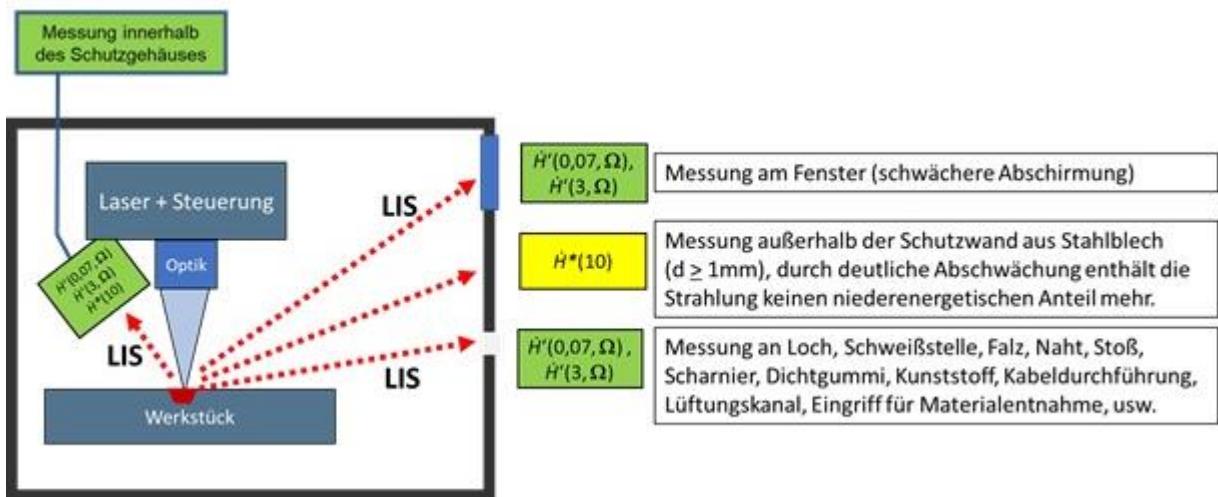


Abbildung 3: Notwendige Messgrößen bei der Bewertung des Schutzgehäuses einer UKP-Laseranlage

3.4.4 LIS bei der Anwendung am Menschen

Bestehende Erkenntnisse aus den Untersuchungen von LIS an UKP-Laseranlagen in der Materialbearbeitung (Freitag und Giedl-Wagner 2020, Holland et al. 2022, Legall et al. 2021, Metzner et al. 2021, Mosel et al. 2021, Pepose und Lubatschowski 2008, Schille et al. 2021b, Weber und Graf 2022) und das zugrundeliegende physikalische Wirkprinzip lassen es als wahr-

scheinlich erscheinen, dass LIS auch bei UKP-Laseranlagen in der medizinischen Anwendung entsteht. Eine Literaturstudie ergab, dass zu diesem Thema jedoch zurzeit noch nicht genügend wissenschaftliche Untersuchungen vorliegen.

Aus diesem Grund wurde das vom BMUV geförderte Forschungsvorhaben „Untersuchung möglicher Expositionen durch ionisierende Strahlung bei der Anwendung von UKP-Lasern in der Medizin, insbesondere in der Zahn- und Augenheilkunde“ (Kraft et al. 2023) durchgeführt. Darin wurde in einem ersten Schritt die Möglichkeit der Entstehung von Röntgenstrahlung bei der Laserbestrahlung von biologischen Materialien (Wasser, isotonische Kochsalzlösung, Zahnmaterial und Schweineaugen) untersucht.

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens (Kraft et al. 2023) wurde für Wasser, isotonische Kochsalzlösung und Schweineaugen die Erzeugung von LIS ab Laser-Bestrahlungsstärken von ca. $5 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ nachgewiesen, wobei Richtungs-Äquivalentdosisleistungen von maximal $0,8 \mu\text{Sv h}^{-1}$ in 15 cm Abstand auftraten. An menschlichen Zähnen konnte LIS sogar bei deutlich niedrigeren Bestrahlungsstärken ab ca. $2 \cdot 10^{13} \text{ W cm}^{-2}$ mit Richtungs-Äquivalentdosisleistungen von maximal $20 \mu\text{Sv h}^{-1}$ gemessen werden. Wenn man für das umliegende menschliche Gewebe (Wange bzw. Zahnfleisch) einen Abstand von 1 cm vom Erzeugungsort der Röntgenstrahlung annimmt, würde sich die o. g. Dosisleistung rechnerisch auf einige mSv h^{-1} erhöhen, so dass für einen Patienten oder eine Patientin bei einer Zahnbehandlung mittels UKP-Laserstrahlung (typische Behandlungsdauer ca. eine Minute pro Zahn) eine strahlenschutzrechtlich durchaus relevante Strahlenexposition entstehen könnte.

Das Forschungsvorhaben hat nicht den für eine umfassende Einschätzung der Problematik erforderlichen detaillierten Erkenntnisstand erzielen können. Andere Forschungsaktivitäten zur Untersuchung der Entstehung von LIS in medizinischen Anwendungen sind nicht bekannt.

Somit besteht weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf zur Untersuchung der Entstehung von LIS bei der medizinischen Anwendung. Die resultierende potenzielle biologische Wirkung hängt von der Art der entstehenden LIS und den Expositionssbedingungen ab.

3.4.5 Strahlenbiologische Wirkung von Elektronen und Photonen mit einer Energie unterhalb von 5 keV

In Bezug auf die Entstehung von LIS mit Energien unterhalb von 5 keV wurde in sich gegenseitig bestätigenden Berichten (Behrens et al. 2019, Schille et al. 2021a) über die LIS bei der Materialbearbeitung unter Anwendung unterschiedlicher Messverfahren gezeigt, dass ein relevanter Anteil des Photonenspektrums unterhalb der in der Strahlenschutzgesetzgebung festgelegten o. g. unteren Energiegrenze liegt (siehe Abbildung 1).

Aus dem insbesondere bei offenen Laseranlagen beobachteten hohen Anteil der Photonenflussdichte im Energiebereich unter 5 keV könnte sich die Notwendigkeit ergeben, LIS zukünftig auch unterhalb von 5 keV hinsichtlich der möglichen biologischen Wirkung zu berücksichtigen. Um diese Notwendigkeit zu beurteilen, sind Abschätzungen oder Messungen zu Expositionsszenarien für strahlensensitive Bereiche des menschlichen Körpers aufgrund der LIS im Vergleich zu anderen Expositionen durchzuführen. Dabei können Ergebnisse aus früheren Studien zu Strahlungen bei niedrigen Energien, die zum Beispiel mit Röntgenröhren oder am Synchrotron erzeugt wurden oder aus radioaktiven Zerfällen stammen (siehe z. B. Schmid 2005 sowie die darin verwendete Literatur wie Kellerer 2002, Kellerer und Chen 2003, Krumrey et al. 2004, Regulla et al. 2002, Roos und Schmid 1998, Schmid und Bauchinger 1998, Schmid et al. 2003, Straume 1995, Virsik und Harder 1980), vergleichend herangezogen werden.

Sollten die Ergebnisse der Studien nahelegen, dass Expositionen gegenüber Strahlung mit Energien unter 5 keV berücksichtigt werden müssten, sollte evaluiert werden, ob und wie diese Ergebnisse ggf. in strahlenschutzrechtliche Regelungen einzuarbeiten wären. Dabei wäre auch die

nicht auf LIS zurückzuführende Strahlung zu berücksichtigen, da alle Quellen mit Emissionen unterhalb 5 keV im derzeitigen Strahlenschutz nicht enthalten sind.

3.4.6 Laser im Mikrowellenbereich (Maser)

Außer mit Lasern, die kohärente optische Strahlung erzeugen, kann auch mit Hilfe von Masern kohärente Strahlung im Mikrowellenbereich zwischen 100 kHz und 100 GHz erzeugt werden. Maser spielen bei der Erzeugung von LIS aus zwei Gründen keine Rolle. Zum einen ist die maximale Leistung der Geräte momentan im μ W-Bereich und damit viel schwächer als bei LIS erzeugenden Lasern. Zum anderen ist es aktuell technisch nicht möglich, die Strahlung auf eine hinreichend kleine Fläche zu fokussieren und somit die zur Erzeugung von LIS erforderliche Bestrahlungsstärke zu erreichen.

Literatur

- | | |
|-----------------------|---|
| Alberts et al. 1994 | Alberts WG, Ambrosi P, Böhm J, Dietze G, Hohlfeld K, Will W. Neue Dosis-Messgrößen im Strahlenschutz. Bericht PTB-Dos-23. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 1994, ISBN 3-89429-507-4 |
| Ambrosi et al. 2010 | Ambrosi P, Borowski M, Iwatschenko M. Considerations concerning the use of counting active personal dosimeters in pulsed fields of ionising radiation. <i>Radiat Prot Dosimetry</i> . 2010 Jun;139(4):483-93, doi: 10.1093/rpd/ncp286, Epub 20100118 |
| Attwood et al. 2017 | Attwood D, Sakdinawat A, Geniesse L. X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications. Cambridge University Press, 2017, ISBN 9781107062894 |
| Bastiani et al. 1997 | Bastiani S, Rousse A, Geindre JP, Audebert P, Quoix C, Hamoniaux G, Antonetti A, Gauthier JC. Experimental study of the interaction of subpicosecond laser pulses with solid targets of varying initial scale lengths. <i>Physical Review E</i> . 1997;56(6):7179-85, doi: 10.1103/PhysRevE.56.7179 |
| Behrens et al. 2019 | Behrens R, Pullner B, Reginatto M. X-Ray Emission from Materials Processing Lasers. <i>Radiat Prot Dosimetry</i> . 2019 May 1;183(3):361-74, doi: 10.1093/rpd/ncy126 |
| 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 |
| Böttcher et al. 2022 | Böttcher K, Schmitt Rahner M, Stolzenberg U, Kraft S, Bonse J, Feist C, Albrecht D, Pullner B, Kruger J. Worst-Case X-ray Photon Energies in Ultrashort Pulse Laser Processing. <i>Materials</i> (Basel). 2022 Dec 16;15(24), doi: 10.3390/ma15248996, Epub 20221216 |
| Chen 1974 | Chen FF. Introduction to Plasma Physics. Plenum Press, New York, 1974 |
| Chichkov et al. 1996 | Chichkov BN, Momma C, Tünnermann A, Meyer S, Menzel T, Wellegehausen B. Hard-x-ray radiation from short-pulse laser-produced plasmas. <i>Applied Physics Letters</i> . 1996;68(20):2804-6, doi: 10.1063/1.116330 |
| Condamine et al. 2022 | Condamine FP, Jourdain N, Kramer D, Trojek P, Gintrand A, Fauvel G, Pandikian P, Bartoníček J, Friedman G, Havlík M, Hernandez JC, Hubáček J, Laštovička T, Orna V, Renner O, Rubovič P, Rus B, Singh RL, Vyhlídka Š, Weber S. Commissioning results from the high-repetition rate nanosecond-kilojoule laser beamline at the extreme light infrastructure. <i>Plasma Physics and Controlled Fusion</i> . 2022;65(1), doi: 10.1088/1361-6587/aca35d |
| DIN 54113-1:2018 | Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 54113-1:2018-01. Zerstörungsfreie Prüfung - Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 1 MV - Teil 1: Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen für Herstellung, Errichtung und Betrieb. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-54113-1/280951911 , zuletzt aufgerufen am 06.11.2024. |
| DIN 6818-1:2004-08 | Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 6818-1:2004-08. Strahlenschutzdosimeter - Teil 1: Allgemeine Regeln. https://www.dinmedia.de/de/norm/din-6818-1/70492200 , zuletzt aufgerufen am 06.11.2024, Norm zurückgezogen. |

- DIN EN 13849-1:2023-12 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN ISO 13849-1:2023-12. Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2023); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2023, <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-13849-1/367893072>, zuletzt aufgerufen am 06.11.2024
- DIN EN ISO 11553-1:2021-01 Deutsches Institut für Normung. DIN EN ISO 11553-1:2021-01. Sicherheit von Maschinen - Laserbearbeitungsmaschinen - Teil 1: Anforderungen an die Lasersicherheit (ISO 11553-1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 11553-1:2020 + A11:2020. <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-iso-11553-1/314659616>, zuletzt aufgerufen am 06.11.2024
- DIN ISO 11554:2017-12 Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 11554:2017-12. Optik und Photonik - Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren für Leistung, Energie und Kenngrößen des Zeitverhaltens von Laserstrahlen (ISO 11554:2017); Deutsche Fassung EN ISO 11554:2017, zuletzt aufgerufen am 06.11.2024
- DIN EN ISO 4037-1:2021-07 Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 4037-1. VDE 0412-4037-1:2021-07. Strahlenschutz - Röntgen- und Gamma-Referenzstrahlungsfelder zur Kalibrierung von Dosimetern und Dosisleistungsmessgeräten und zur Bestimmung ihres Ansprechvermögens als Funktion der Photonenenergie - Teil 1: Strahlungseigenschaften und Erzeugungsmethoden (ISO 4037-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 4037-1:2021, zuletzt aufgerufen am 06.11.2024
- Dombrowski et al. 2017 (Dombrowski H, Grottke U, Pullner B, Röttger A, Zwiener R). Sicherheitsvorrichtungen von Basisschutzgeräten, Hochschutzgeräten, Vollschatzgeräten und Schulröntgeneinrichtungen, Anforderungen für die Bauartprüfung nach der Röntgenverordnung, Leitfaden für Hersteller und Gutachter, Rev. 1.0. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). <https://doi.org/10.7795/110.20171023>, zuletzt aufgerufen am 28.08.2023
- Freitag und Giedl-Wagner 2020 Freitag C, Giedl-Wagner R. X-Ray Protection in an Industrial Production Environment. *PhotonicsViews*. 2020;17(3):37-41, doi: <https://doi.org/10.1002/phvs.202000020>
- Gonsalves et al. 2019 Gonsalves AJ, Nakamura K, Daniels J, Benedetti C, Pieronek C, de Raadt TCH, Steinke S, Bin JH, Bulanov SS, van Tilborg J, Geddes CGR, Schroeder CB, Toth C, Esarey E, Swanson K, Fan-Chiang L, Bagdasarov G, Bobrova N, Gasilov V, Korn G, Sasorov P, Leemans WP. Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide. *Phys Rev Lett*. 2019 Mar 1;122(8):084801, doi: [10.1103/PhysRevLett.122.084801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.084801)
- Holland et al. 2022 Holland J, Weber R, Sailer M, Graf T. Influence of Pulse Duration on X-ray Emission during Industrial Ultrafast Laser Processing. *Materials (Basel)*. 2022 Mar 18;15(6), doi: [10.3390/ma15062257](https://doi.org/10.3390/ma15062257), Epub 20220318
- Houard et al. 2023 Houard A, Walch P, Produit T, Moreno V, Mahieu B, Sunjerga A, Herkommer C, Mostajabi A, Andral U, Andre YB, Lozano M, Bizet L, Schroeder MC, Schimmel G, Moret M, Stanley M, Rison WA, Maurice O, Esmiller B, Michel K, Haas W, Metzger T, Rubinstein M, Rachidi F, Cooray V, Mysyrowicz A, Kasparian J, Wolf JP. Laser-guided lightning. *Nat Photonics*. 2023;17(3):231-5, doi: [10.1038/s41566-022-01139-z](https://doi.org/10.1038/s41566-022-01139-z), Epub 20230116

- Kellerer 2002 Kellerer AM. Electron Spectra and the RBE of X Rays. *Radiation Research.* 2002;158(1):13-22, doi: 10.1667/0033-7587(2002)158[0013:Esat]2.0.Co;2
- Kellerer und Chen 2003 Kellerer AM, Chen J. Comparative Microdosimetry of Photoelectrons and Compton Electrons: An Analysis in Terms of Generalized Proximity Functions. *Radiation Research.* 2003;160(3):324-33, doi: 10.1667/rr3036
- Kraft et al. 2023 Kraft S, Schille J, Bonse J, Löschner U, Krüger J. X-ray emission during the ablative processing of biological materials by ultrashort laser pulses. *Applied Physics A.* 2023;129(3), doi: 10.1007/s00339-023-06440-4
- Kruer 1988 Kruer WL. *The Physics of Laser Plasma Interactions.* Addison-Wesley, 1988
- Krumrey et al. 2004 Krumrey M, Ulm G, Schmid E. Dicentric chromosomes in monolayers of human lymphocytes produced by monochromatized synchrotron radiation with photon energies from 1.83 keV to 17.4 keV. *Radiat Environ Biophys.* 2004 May;43(1):1-6, doi: 10.1007/s00411-004-0232-0, Epub 20040403
- Legall et al. 2018 Legall H, Schwanke C, Pentzien S, Dittmar G, Bonse J, Krüger J. X-ray emission as a potential hazard during ultrashort pulse laser material processing. *Applied Physics A.* 2018;124(6), doi: 10.1007/s00339-018-1828-6
- Legall et al. 2020 Legall H, Schwanke C, Bonse J, Krüger J. X-ray radiation protection aspects during ultrashort laser processing. *Journal of Laser Applications.* 2020;32(2), doi: 10.2351/1.5134778
- Legall et al. 2021 Legall H, Bonse J, Krüger J. Review of x-ray exposure and safety issues arising from ultra-short pulse laser material processing. *J Radiol Prot.* 2021 Feb 26;41(1), doi: 10.1088/1361-6498/abcb16, Epub 20210226
- Legall et al. 2022 Legall H, Bonse J, Krüger J, Pullner B, Stolzenberg U, Krasniqi F. Bestimmung von Strahlenschutzzszenarien als Voraussetzung für eine nachhaltige Gewährleistung des Strahlenschutzes beim Umgang mit Ultrakurzpuls-Lasern (UKP Laser) u.a. zur Unterstützung eines einheitlichen Vollzugs - Vorhaben 3619S22370“, Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 16-Jun-2022, Reihe: Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz; 197/22, Reportnummer: BfS-RESFOR-197/22. urn:nbn:de:0221-2022060833027. 2022
- Malka et al. 2008 Malka V, Faure J, Gauduel YA, Lefebvre E, Rousse A, Phuoc KT. Principles and applications of compact laser-plasma accelerators. *Nature Physics.* 2008 Jun;4(6):447-53, doi: 10.1038/nphys966
- Mead et al. 1983 Mead WC, Campbell EM, Estabrook K, Turner RE, Kruer WL, Lee PHY, Pruett B, Rupert VC, Tirsell KG, Stradling GL, Ze F, Max CE, Rosen MD, Lasinski BF. Laser irradiation of disk targets at 0.53 μ m wavelength. *The Physics of Fluids.* 1983;26(8):2316-31, doi: 10.1063/1.864390
- MessEG 2013 Gesetz über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen (Mess- und Eichgesetz - MessEG) vom vom 25. Juli 2013 (BGBl. I S. 2722, 2723), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 9. Juni 2021 (BGBl. I S. 1663) geändert worden ist

- MessEV 2014 Mess und Eichverordnung. Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung (Mess- und Eichverordnung - MessEV) vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010, 2011), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2016 (BGBl. I S. 2034) geändert worden ist
- Metzner et al. 2021 Metzner D, Olbrich M, Lickschat P, Horn A, Weißmantel S. X-ray generation by laser ablation using MHz to GHz pulse bursts. *Journal of Laser Applications*. 2021;33(3), doi: 10.2351/7.0000403
- Mosel et al. 2021 Mosel P, Sankar P, Dusing JF, Dittmar G, Puster T, Jaschke P, Vahlbruch JW, Morgner U, Kovacev M. X-ray Dose Rate and Spectral Measurements during Ultrafast Laser Machining Using a Calibrated (High-Sensitivity) Novel X-ray Detector. *Materials* (Basel). 2021 Aug 5;14(16), doi: 10.3390/ma14164397, Epub 20210805
- Mourou 2019 Mourou G. Nobel Lecture: Extreme light physics and application. *Reviews of Modern Physics*. 2019 Jul 2;91(3), doi: 10.1103/RevModPhys.91.030501
- Pepose und Lubatschowski 2008 Pepose JS, Lubatschowski H. Comparing Femtosecond Lasers. *CRST Cataract & Refractive Surgery Today*. 2008(Oct.)
- PTB 2018 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). PTB-Anforderungen PTB-A 23.3 "Strahlenschutzmessgeräte; Ortsdosimeter zur Messung der Umgebungs- und Richtungs-Äquivalentdosis und der Umgebungs- und Richtungs-Äquivalentdosisleistung". Ausgabe November 2013. <https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/510.20151109P>, zuletzt aufgerufen am 17.11.2023 und die zugehörige Ergänzung der PTB-Anforderungen PTB-A 23.3: Strahlenschutzmessgeräte; Ortsdosimeter zur Messung der Umgebungs- und Richtungs-Äquivalentdosis und der Umgebungs- und Richtungs-Äquivalentdosisleistung. (11/2018), <https://doi.org/10.7795/510.20181129B>, zuletzt aufgerufen am 17.11.2023
- Regulla et al. 2002 Regulla D, Schmid E, Friedland W, Panzer W, Heinzmann U, Harder D. Enhanced Values of the RBE and H Ratio for Cytogenetic Effects Induced by Secondary Electrons from an X-Irradiated Gold Surface. *Radiation Research*. 2002;158(4):505-15, doi: 10.1667/0033-7587(2002)158[0505:Evotra]2.0.Co;2
- Reidenbach et al. 2019 Reidenbach H-D, Brose M, Dickmann K, Frederiksen A, Goebel KR, Halbritter W, Krischek R, Schmitz B, Schneeweiss C, Udovicic L, Völker T, Weiskopf D. Leitfaden „Laserstrahlung“, FS-2019-181-AKNIR. https://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/90_Archiv/FS-Pub-Archiv-final/FS-2019-181-AKNIR_Leitfaden_Laserstrahlung.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.08.2023
- Roos und Schmid 1998 Roos H, Schmid E. Analysis of chromosome aberrations in human peripheral lymphocytes induced by 5.4 keV x-rays. *Radiat Environ Biophys*. 1998 Feb;36(4):251-4, doi: 10.1007/s004110050079
- Schaeffer et al. 2023 Schaeffer DB, Bott AFA, Borghesi M, Flippo KA, Fox W, Fuchs J, Li CK, Séguin FH, Park HS, Tzeferacos P, Willingale L. Proton imaging of high-energy-density laboratory plasmas. *Reviews of Modern Physics*. 2023 Dec 28;95(4), doi: 10.1103/RevModPhys.95.045007

- Schille et al. 2021a Schille J, Kattan D, Kraft S, Pflug T, Horn A, Löschner U. Entstehung unerwünschter Röntgenstrahlung bei der Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung. *Journal of the University of Applied Sciences Mittweida*. 2021;Nr. 3:91-9
- Schille et al. 2021b Schille J, Kraft S, Pflug T, Scholz C, Clair M, Horn A, Loeschner U. Study on X-ray Emission Using Ultrashort Pulsed Lasers in Materials Processing. *Materials*. 2021;14(16):4537
- Schille et al. 2022 Schille J, Kraft S, Kattan D, Loschner U. Enhanced X-ray Emissions Arising from High Pulse Repetition Frequency Ultrashort Pulse Laser Materials Processing. *Materials (Basel)*. 2022 Apr 8;15(8), doi: 10.3390/ma15082748, Epub 20220408
- Schmid und Bauchinger 1998 Schmid E, Bauchinger M. LET dependence of dicentric yields in human lymphocytes induced by low doses of sparsely ionizing radiations and its implication for risk assessments. *Health Phys.* 1998 Jun;74(6):719-21, doi: 10.1097/00004032-199806000-00010
- Schmid et al. 2003 Schmid E, Krumrey M, Ulm G, Roos H, Regulla D. The maximum low-dose RBE of 17.4 and 40 keV monochromatic X rays for the induction of dicentric chromosomes in human peripheral lymphocytes. *Radiat Res.* 2003 Nov;160(5):499-504, doi: 10.1667/rr3070
- Schmid 2005 Schmid E. Verifizierung der unterschiedlichen biologischen Wirksamkeit von Photonen im Energiebereich von 10 keV - 6 MeV mittels onkologischer Transformationsraten an Maus-Embryofibroblasten und in der menschlichen CGL 1 - Hybridzelllinie. *Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz*. 2005;BMU-2005-657, doi: <http://dx.doi.org/10.4126/FRL01-002413219>
- Schmitt Rahner et al. 2024 Schmitt Rahner M, Stolzenberg U, Pullner B, Böttcher K, Bonse J, Krüger J. Entwicklung eines Prüfkonzepts für die Gewährleistung des Strahlenschutzes beim Betrieb von Ultrakurzpuls-Lasern - Vorhaben 3620S22373, Herausgeber: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Reihe: Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz. September 2024, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2024092746842>
- Schwoerer et al. 2001 Schwoerer H, Gibbon P, Dusterer S, Behrens R, Ziener C, Reich C, Sauerbrey R. MeV X rays and photoneutrons from femtosecond laser-produced plasmas. *Phys Rev Lett.* 2001 Mar 12;86(11):2317-20, doi: 10.1103/PhysRevLett.86.2317
- Straume 1995 Straume T. High-energy gamma rays in Hiroshima and Nagasaki: implications for risk and WR. *Health Phys.* 1995 Dec;69(6):954-6, doi: 10.1097/00004032-199512000-00010
- 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; 2021 I S. 5261), die durch Artikel 10 des Gesetzes vom 23. Oktober 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 324) geändert worden ist

- TROS IOS 2013 TROS IOS. Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Inkohärente Optische Strahlung (TROS IOS). GMBl. 2013 S. 1302 ff. [Nr. 65-67]. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TROS/TROS.html>, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024
- TROS Laserstrahlung 2013 TROS Laserstrahlung. Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Laserstrahlung. GGMBl. 2018 S. 962 [Nr. 50-53] (21.11.2018). Änderung: GMBl 2021, S. 1002 [Nr. 46] (23.08.2021). <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TROS/TROS.html>, zuletzt aufgerufen am 28.08.2023
- Umstadter 2003 Umstadter D. Relativistic laser-plasma interactions. *J Phys D Appl Phys.* 2003 Apr 21;36(8):R151-R65, doi: 10.1088/0022-3727/36/8/202
- Virsik und Harder 1980 Virsik RP, Harder D. Recovery kinetics of radiation-induced chromosome aberrations in human G0 lymphocytes. *Radiat Environ Biophys.* 1980;18(3):221-38, doi: 10.1007/BF01323599
- Weber et al. 2019 Weber R, Giedl-Wagner R, Förster DJ, Pauli A, Graf T, Balmer JE. Expected X-ray dose rates resulting from industrial ultrafast laser applications. *Applied Physics A.* 2019 2019/08/19;125(9):635, doi: 10.1007/s00339-019-2885-1
- Weber und Graf 2022 Weber R, Graf T. X-ray emission during materials processing with ultrashort laser pulses - A serious problem? *Procedia CIRP.* 2022 09/06;111:844-9, doi: 10.1016/j.procir.2022.08.095
- Weisshaupt et al. 2014 Weisshaupt J, Juvé V, Holtz M, Ku SA, Woerner M, Elsaesser T, Alisuskas S, Pugzlys A, Baltuska A. High-brightness table-top hard X-ray source driven by sub-100-femtosecond mid-infrared pulses. *Nature Photonics.* 2014 Dec;8(12):927-30, doi: 10.1038/Nphoton.2014.256
- Zimmer et al. 2021 Zimmer M, Scheuren S, Ebert T, Schaumann G, Schmitz B, Hornung J, Bagnoud V, Rodel C, Roth M. Analysis of laser-proton acceleration experiments for development of empirical scaling laws. *Phys Rev E.* 2021 Oct;104(4-2):045210, doi: 10.1103/PhysRevE.104.045210

Anhang

A-1 Mindestanforderungen an Dosisleistungs-Messgeräte für Messungen an UKP-Laseranlagen und Laseranordnungen

Für Messungen nach § 90 Absatz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) sind Messgeräte, die dem Mess- und Eichrecht entsprechen (konformitätsbewertete Messgeräte), zu verwenden. Die sich aus dem Mess- und Eichrecht ergebenden Anforderungen sind in den PTB-Anforderungen an Ortsdosimeter (PTB 2018) zusammengefasst.

Nach § 90 Absatz 2 StrlSchV (StrlSchV 2018) gilt weiter: „Sind für bestimmte Messzwecke keine dem MessEG entsprechenden Messgeräte für Photonenstrahlung nach Satz 1 erhältlich, kann die zuständige Behörde im Einzelfall die Verwendung anderer Strahlungsmessgeräte gestatten, wenn diese für den Messzweck geeignet sind.“ Die dafür notwendigen Anforderungen müssen im Einzelfall von der zuständigen Behörde ermittelt bzw. festgelegt werden und können z. B. auch eine Einschränkung des Mindest-Nenngebrauchsbereichs der Photonenenergie beinhalten.

In der Tabelle 4 sind einige sich aus dem jeweiligen Messzweck ergebende dosimetrische Anforderungen aufgelistet. Sie umfassen nicht die vom Mess- und Eichrecht festgelegten grundlegenden Anforderungen.

Tabelle 4: Anforderungen an konformitätsbewertete Dosisleistungs-Messgeräte für Messungen nach StrlSchG/StrlSchV an UKP-Laseranlagen und Laseranordnungen

Messzweck:	Messung an einer vollständig umschlossenen Laseranlage vor dem Schutzgehäuse Anmerkung: Für Messungen außerhalb des Schutzgehäuses aus Metall, jedoch nicht für Messungen außerhalb von Schutzgehäusen sehr geringer Abschirmwirkung (z. B. Kunststoff), vor Laserschutzfenstern oder an Löchern, Spalten, Schweißstellen, Scharnieren, Kabeldurchführungen, Schläuchen, Eingriffen für den Materialtransport	Messung an einer Laseranordnung ohne Schutzgehäuse oder Messungen an Spalten und Löchern im Schutzgehäuse einer vollständig umschlossenen Laseranlage
Mindest-Nenngebrauchsbereich der mittleren Photonenenergie und Strahleneinfallsrichtung (aus PTB-A 23.3 (PTB 2018))	für $\dot{H}^*(10)$: 20 keV bis 150 keV ⁽¹⁾ $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$ für $\dot{H}'(3, \Omega)$ 20 keV bis 250 keV ⁽¹⁾ $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$ für $\dot{H}'(0,07, \Omega)$: 20 keV bis 250 keV ⁽¹⁾ $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$	für $\dot{H}^*(10)$: 12 keV bis 150 keV ⁽¹⁾ $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$ für $\dot{H}'(3, \Omega)$ 8 keV bis 250 keV ⁽¹⁾ $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$ für $\dot{H}'(0,07, \Omega)$: 5 keV bis 250 keV ⁽¹⁾ $-45^\circ \leq \alpha \leq +45^\circ$

Messzweck:	Messung an einer vollständig umschlossenen Laseranlage vor dem Schutzgehäuse Anmerkung: Für Messungen außerhalb des Schutzgehäuses aus Metall, jedoch nicht für Messungen außerhalb von Schutzgehäusen sehr geringer Abschirmwirkung (z. B. Kunststoff), vor Laserschutzfenstern oder an Löchern, Spalten, Schweißstellen, Scharnieren, Kabeldurchführungen, Schläuchen, Eingriffen für den Materialtransport	Messung an einer Laseranordnung ohne Schutzgehäuse oder Messungen an Spalten und Löchern im Schutzgehäuse einer vollständig umschlossenen Laseranlage
Mindest-Nenngebrauchsbereich der Dosisleistung	für $\dot{H}^*(10)$: 0,5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ bis 10 mSv h^{-1} für $\dot{H}'(3, \Omega)$: 5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ bis 1 Sv h^{-1} für $\dot{H}'(0,07, \Omega)$: 10 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ bis 1 Sv h^{-1}	für $\dot{H}^*(10)$: 0,5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ bis 10 mSv h^{-1} für $\dot{H}'(3, \Omega)$: 5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ bis 1 Sv h^{-1} für $\dot{H}'(0,07, \Omega)$: 10 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ bis 1 Sv h^{-1}
Mindest-Nenngebrauchsbereich der Dosis	für $H^*(10)$: 0,1 μSv bis 100 μSv für $H^*(3)$ 0,1 μSv bis 100 μSv für $H'(0,07, \Omega)$: 2 μSv bis 200 μSv	für $H^*(10)$: 0,1 μSv bis 100 μSv für $H^*(3)$ 0,1 μSv bis 100 μSv für $H'(0,07, \Omega)$: 2 μSv bis 200 μSv
Ansprech- und Einstellzeit bei Dosisleistungsmessungen (aus PTB-A 23.3, Tab. 3 (PTB 2018))	$\dot{H}_{\text{end}} < 60 \mu\text{Sv h}^{-1}$, maximal 60 s $60 \mu\text{Sv h}^{-1} \leq \dot{H}_{\text{end}} < 1 \text{ mSv h}^{-1}$, maximal $60 \text{ s} - \frac{\dot{H}_{\text{end}} - 60 \mu\text{Sv h}^{-1}}{940 \mu\text{Sv h}^{-1}} \cdot 50 \text{ s}$ $\dot{H}_{\text{end}} \geq 1 \text{ mSv h}^{-1}$, maximal 10 s	$\dot{H}_{\text{end}} < 60 \mu\text{Sv h}^{-1}$, maximal 60 s $60 \mu\text{Sv h}^{-1} \leq \dot{H}_{\text{end}} < 1 \text{ mSv h}^{-1}$, maximal $60 \text{ s} - \frac{\dot{H}_{\text{end}} - 60 \mu\text{Sv h}^{-1}}{940 \mu\text{Sv h}^{-1}} \cdot 50 \text{ s}$ $\dot{H}_{\text{end}} \geq 1 \text{ mSv h}^{-1}$, maximal 10 s
Pulseignung	Nachweis der Eignung für die Pulsparameter der LIS muss gegeben sein.	Nachweis der Eignung für die Pulsparameter der LIS muss gegeben sein.

Anmerkung:

Für zusätzliche Messungen innerhalb des Schutzgehäuses, z. B. zur Prozessüberwachung, gelten die Anforderungen wie für Spalte und Fenster mit Ausnahme der Forderung nach Erfüllung des MessEG (MessEG 2013) / der MessEV (MessEV 2014), da es sich nicht um nach StrlSchV (StrlSchV 2018) geforderte Messungen handelt und folglich die Anforderungen des MessEG, insbesondere der grundlegenden Eigenschaften, nicht erfüllt werden müssen.

A-2 Eigenschaften und Verwendung von Messgeräten außerhalb des Anwendungsbereiches des MessEG/der MessEV

Da der wesentliche Teil des Emissionsspektrums der LIS bei sehr niedrigen Energien von wenigen keV liegen kann, ist eine Kenntnis oder Abschätzung des am Messort auftretenden Photonenstrahlungsspektrums bei der Auswahl des Messgerätes hilfreich.

Bei einer Untergrenze von 5 keV kommen im Prinzip für die Gewährleistung eines Schutzzieles von $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ für $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ auch herkömmliche Kontaminationsmessgeräte zur Erfassung niederenergetischer Photonenstrahlung in Frage, da diese auch für den Nachweis der Photonenstrahlung von Fe-55 (5,9 keV) geeignet sind. Insbesondere dünne Szintillationsdetektoren mit geeignetem Eintrittsfenster weisen ein sehr gutes Signal-zu-Nulleffekt-Verhältnis auf wegen des hohen Ansprechvermögens im Bereich von 5 keV bis 20 keV und des geringen Ansprechvermögens auf hochenergetische Hintergrundstrahlung (NORM¹³ und ionisierende kosmische Höhenstrahlung). Mit geeigneten Aufsteckfiltern wäre neben $\dot{H}'(0,07, \Omega)$ auch die Abschätzung von $\dot{H}'(3, \Omega)$ und $\dot{H}^*(10)$ im für LIS relevanten Energiebereich möglich.

Bei Verwendung von großflächigen Detektoren (z. B. 100 cm^2) kann innerhalb von wenigen Sekunden eine LIS-basierte gemittelte Dosisleistung von ca. 10 nSv h^{-1} erkannt werden. Eine große Messfläche des eingesetzten Kontaminationsmonitors ist vorteilhaft, da so eine sehr schnelle qualitative Detektion eventueller Gehäuseleckagen im Nahbereich erfolgen kann. Eine quantitative Dosisleistungsmessung kann dann in größerem Abstand, z. B. 1 m, erfolgen, wo ein gleichmäßiges Ausleuchten der Detektorfläche gewährleistet ist. Bei Messungen im größeren Abstand ist eine Luftschwächungskorrektur unbedingt erforderlich. Dazu muss das Photonenpektrum näherungsweise bekannt sein.

Bei der Gerätekalibrierung ist darauf zu achten, dass das Messgerät bei einer der LIS entsprechenden Photonenenergie rückführbar kalibriert wird. Außerdem muss zur Abschätzung der Messunsicherheit auch z. B. das energieabhängige Ansprechvermögen in dem relevanten Energiebereich für die jeweilige Messgröße bestimmt werden. Um eine konservative Abschätzung der Ortsdosisleistung zu gewährleisten, wird für LIS die Verwendung des Kalibrierfaktors für 6,6 keV (A-7,5 Referenzstrahlung¹⁴) empfohlen.

Im Folgenden sind weitere Anforderungen an Messgeräte, die sich aus der speziellen Anwendung, jedoch noch nicht aus den allgemeingültigen PTB-Anforderungen, ergeben und deshalb offene Punkte darstellen, aufgelistet.

A-2.1 Eignung für die Messung gepulster Strahlung

Die kleinsten auftretenden Pulsdauern sind mit wenigen Femtosekunden deutlich kürzer als bei der bisherigen Baumusterprüfung (minimal ca. 100 ns). Allerdings sind bei diesen sehr kurzen Pulsdauern die Dosis pro Puls und nicht die Dosisleistung im Puls von Bedeutung. Diese mittlere Dosis pro Puls kann bei der Baumusterprüfung auch durch Pulse mit längeren Dauern geprüft werden, solange die bei der Prüfung verwendeten Pulsdauern viel kürzer als die internen Integrations- und Verarbeitungszeiten im Dosimeter sind. Allerdings kann damit nicht

¹³ Naturally occurring radioactive material (NORM)

¹⁴ Die Bestimmung des Ansprechvermögens bezüglich Photonenenergie und Einfallswinkel soll möglichst mit N-Strahlungsqualitäten nach DIN EN ISO 4037-1 (DIN EN ISO 4037-1:2021-07) erfolgen, z. B. mit N-10 mit einer mittleren Photonenenergie bezüglich Fluenz von ca. 8,5 keV oder mit A-7,5 mit 6,6 keV nach DIN 6818-1 (DIN 6818-1:2004-08).

überprüft werden, ob sehr kurze Strahlungspulse als Störimpulse statt als Messsignal interpretiert werden.

Der Nettoanzeigebereich von zählenden Kontaminationsmessgeräten an gepulsten Laseranlagen ist maximal auf die Pulsfrequenz der Anlage beschränkt. Eine Korrektur der Zählrate muss ab einem Anzeigewert von ca. 20 % der Pulsfrequenz der Laseranlage erfolgen (Ambrosi et al. 2010). Insbesondere bei Anlagen mit einer Pulsfrequenz unter 100 Hz ist damit die Obergrenze des Messbereichs sehr niedrig. Durch Vergrößerung des Abstandes kann die Dosis pro Puls reduziert werden. Bei Laseranlagen mit Pulsfolgefrequenzen im Hz-Bereich müssen Detektoren mit kleiner Messfläche (und damit niedrigem Nulleffekt in Zählereignissen pro Sekunde) eingesetzt werden, wobei sich die notwendige Messzeit entsprechend erhöht.

A-2.2 Einfluss starker elektromagnetischer Felder bei Messungen an UKP-Laseranlagen

In unmittelbarer Nähe des Entstehungsortes der LIS können elektromagnetische Felder mit sehr hohen Feldstärken auftreten, die deutlich über den in den PTB-Anforderungen genannten Feldstärken (z. B. Magnetfelder, siehe PTB-A 23.3 Tabelle 4 (PTB 2018) liegen und daher eventuell zu fehlerhaften Messergebnissen führen können.

Bei Messungen außerhalb des vollständig umschlossenen Schutzgehäuses stellt dies vermutlich kein Problem dar, da die Feldstärken durch Abstand und Abschirmwirkung des zumeist metallischen Schutzgehäuses entsprechend geringer sind.

Um den Einfluss elektromagnetischer Felder zu minimieren, sollten Messungen auch im größeren Abstand durchgeführt werden.

Begriffserklärungen

Aktivierung

Aktivierung ist ein Vorgang, bei dem ein stabiles Nuklid durch Bestrahlung des dieses Nuklid enthaltenden Materials mit Partikeln oder hochenergetischen Photonen in ein Radionuklid umgewandelt wird.

Burst-Modus

Betriebsweise von UKP-Lasern in der Laser-Materialbearbeitung bei der ein einzelner Laserpuls und dessen Gesamtenergie zeitlich in mehrere Bursts unterteilt wird. Im Burst-Modus können auf Kosten der Energie der Einzelpulse im Burst Pulsfolgefrequenzen im MHz- bis GHz-Bereich realisiert werden. Aufgrund der hohen Pulsfolgefrequenz (kurzem Pulsabstand) des Lasers kann der einfallende Laserpuls mit dem bereits existierenden und durch den Vorgängerpuls erzeugten Plasma wechselwirken.

Anmerkung:

Der Burst-Modus erhöht den Materialabtrag und ermöglicht eine effizientere Materialbearbeitung, begünstigt aber auch den Erzeugungsprozess von LIS mit Erhöhung der Dosisleistung bei gleichzeitiger Aufhärtung des Spektrums.

Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Gerät mit einem verstärkenden Medium innerhalb eines optischen Resonators, das unter Ausnutzung des Effektes der stimulierten Emission kohärente elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen bis zu 1 mm emittiert.

Anmerkung:

Im Bereich des Schutzes gegenüber optischer Strahlung ist als wesentliche technische Norm die Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) von Bedeutung. In ihr wird der Begriff Laserstrahlung definiert als jede elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im Bereich zwischen 100 nm und 1 mm, die als Ergebnis kontrollierter stimulierter Emission entsteht. Der in diesem Dokument genutzte Begriff des Lasers umfasst diesen Bereich der elektromagnetischen Strahlung vollständig.

Laseranlage

Eine oder mehrere Laseranordnungen in Verbindung mit Handhabungs-, Mess- und Regelsystemen. Die Laseranlage umfasst danach den oder die Laser und alle optischen, mechanischen und elektrischen Komponenten zur Strahlführung, Strahlformung und Betriebsmittelversorgung sowie, soweit vorhanden, das Schutzgehäuse.

Eine Laseranlage ist im Sinne dieses Dokumentes eine Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung, wenn die Strahlparameter für die Erzeugung ionisierender Strahlung mit einer Energie von mindestens 5 keV durch Wechselwirkung von künstlicher optischer Strahlung (Laserstrahlung) mit Materie ausreichen.

Anmerkung 1:

Im Bereich des Schutzes gegenüber optischer Strahlung ist als wesentliche technische Norm die Technische Regel zur Arbeitsschutzver-

ordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) von Bedeutung. In ihr wird der Begriff der Laser-Einrichtung genutzt. Dazu zählen Geräte, Anlagen oder Versuchsaufbauten, mit denen Laserstrahlung erzeugt, übertragen oder angewendet wird. Diese Nomenklatur basiert auf den Regelungen der IEC. Für die Anwendung dieses Dokumentes gilt jede Laser-Einrichtung gleichzeitig als eine Laseranlage. Es ist hierfür unerheblich, ob seitens des Herstellers oder Inverkehrbringers diese auf der ISO-Nomenklatur basierende Bezeichnung verwendet oder angegeben wird.

Anmerkung 2:

Der Begriff der Laserbearbeitungsmaschine ist in DIN EN ISO 11553-1 (DIN EN ISO 11553-1:2021-01 2021) definiert. Sie ist eine Maschine im Sinne der Neunten Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), die zuletzt durch Artikel 23 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert worden ist, in Verbindung mit DIN ISO 11554 (DIN ISO 11554:2017-12) und dient der Bearbeitung von Materialien durch die Einwirkung von Laserstrahlung. Sie ist eine Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung im Sinne der strahlenschutzrechtlichen Regelungen, wenn in ihr durch das Auftreffen von Laserstrahlung auf Material ionisierende Strahlung mit einer Energie $\geq 5 \text{ keV}$ erzeugt werden kann. Eine Laserbearbeitungsmaschine ist eine Laseranlage.

Laseranlage, vollständig umschlossen	Laseranlage, die ein Schutzgehäuse für eine ausreichende Abschirmung der ionisierenden Strahlung besitzt. Dieses Schutzgehäuse muss den Ort, an dem die ionisierende Strahlung entsteht, und den zu behandelnden oder zu untersuchenden Gegenstand vollständig umschließen. Außerdem muss durch zwei voneinander unabhängige Sicherheitseinrichtungen sichergestellt sein, dass <ul style="list-style-type: none">- das Vorhandensein von Personen oder Körperteilen im Inneren des Schutzgehäuses während des Betriebes sicher verhindert wird und dass- das Schutzgehäuse nur geöffnet werden kann, wenn im Inneren des Schutzgehäuses keine ionisierende Strahlung mit einer Energie von mehr als 5 keV vorhanden ist.
Laseranordnung	Lasergerät in Verbindung mit speziellen optischen, mechanischen und/oder elektrischen Komponenten für die Strahlführung und die Strahlformung
Lasergerät	Einrichtung, welche einen Laser, zusammen mit wesentlichen zusätzlichen Einrichtungen (z. B. Kühlsystem, Netz- und Gasversorgung usw.) enthält
Maser	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation: Quelle kohärenter elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenlängenbereich

Normal/Primär-normal	Normale (z. B. Freiluft-Parallelplattenkammern) dienen der absoluten Darstellung einer Einheit (z. B. Luftkerma für Röntgenstrahlung) – Primärnormale werden zur Kalibration von Sekundärstandards (Arbeitsnormalen des eigenen Labors) und Normalgeräten von Kalibrier- und Eichstellen eingesetzt.
Rückführbare Messungen	Auf ein nationales Primärnormal rückführbare Messungen. Metrologische Rückführungskette: Folge von Normalen und Kalibrierungen, die verwendet wird, um ein Messergebnis auf eine Referenz zu beziehen (JCGM 2012)
Schutzgehäuse	Ein, die Quelle ionisierender Strahlung die Laseranlage vollständig umschließendes Gehäuse zur Verhinderung des Austretens von Laser- und ionisierender Strahlung in die Umgebung.
Strahlungslabyrinthsystem	Ein Strahlungslabyrinthsystem ist eine bautechnische Konstruktion zur Erzeugung einer stark strahlungsschwächen Barriere für die LIS mit der Absicht, die Durchleitung z.B. von Kabeln zu ermöglichen.

Abkürzungsverzeichnis

Begriffe

BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CO ₂	Kohlendioxid
CR-Folien	Röntgenspeicherfolien
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
ISO	Internationale Organisation für Normung
LIPS	Laserinduzierten Plasma-Spektroskopie
LIS	Laserinduzierte Ionisierende Strahlung
MessEG	Mess- und Eichgesetz
MessEV	Mess- und Eichverordnung
PMMA	Polymethylmethacrylat (Acryl-/Plexiglas)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SSK	Strahlenschutzkommission
SSV	Strahlenschutzverantwortlicher
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
UKP-Laser	Ultrakurzpuls-Laser

Einheiten

aSv	Attosievert
eV	Elektronenvolt
fs	Femtosekunde
GeV	Gigaelektronenvolt
GW	Gigawatt
$H_p(0,07)$	Oberflächen-Personendosis

$H_p(10)$	Tiefen-Personendosis
$\dot{H}'(0,07, \Omega)$	Richtungs-Äquivalentdosisleistung
$\dot{H}'(3, \Omega)$	Richtungs-Äquivalentdosisleistung
$\dot{H}^*(10)$	Umgebungs-Äquivalentdosisleistung
keV	Kiloelektronenvolt
kHz	Kilohertz
kJ	Kilojoule
MeV	Megaelektronenvolt
mJ	Millijoule
mSv h^{-1}	Millisievert pro Stunde
μJ	Mikrojoule
μm	Mikrometer
μSv	Mikrosievert
$\mu\text{Sv h}^{-1}$	Mikrosievert pro Stunde
μW	Mikrowatt
nm	Nanometer
nJ	Nanojoule
ns	Nanosekunde
ps	Pikosekunden
pSv	Pikosievert
PW	Petawatt
Sv	Sievert
Sv h^{-1}	Sievert pro Stunde
THz	Terahertz
TW	Terawatt
W cm^{-2}	Watt pro Quadratzentimeter