

Fachverband für Strahlenschutz e.V.

Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA)
für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz



Leitfaden „Laserstrahlung“

Vorwort und Impressum

Eines der Hauptziele der Arbeit des Arbeitskreises „Nichtionisierende Strahlung“ (AKNIR) des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. (FS) ist es, Unterlagen in Form von Leitfäden für die in diesem Arbeitskreis fachlich abgedeckten Themengebiete zu erstellen. Darin werden die physikalischen Grundlagen und der derzeitige wissenschaftliche Erkenntnisstand über die biologischen Wirkungen der einzelnen Teilbereiche vermittelt. Darüber hinaus werden die zulässigen Expositionswerte und durchzuführende Schutzmaßnahmen aufgeführt.

Die Leitfäden sollen sowohl den im Arbeitsschutz tätigen Experten als auch jedermann die notwendigen Hilfestellungen geben, um sich über das jeweilige Thema sachlich zu informieren, eventuell die notwendigen Maßnahmen zu ergreifen, aber auch die mitunter von anderer Seite geschürten Ängste in der Öffentlichkeit vor nichtionisierender Strahlung durch sachliche Informationen zu relativieren, und zwar auf der Grundlage des Standes von Wissenschaft und Technik.

Der vorliegende Leitfaden „Laserstrahlung“ soll allen Interessierten die notwendigen Informationen an die Hand geben, um mit Lasern richtig umgehen zu können.

Der Leitfaden „Laserstrahlung“ wurde vom Arbeitskreis „Nichtionisierende Strahlung“ des Fachverbandes für Strahlenschutz e. V. (Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA) für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz) erarbeitet.

Dem AKNIR gehören Experten auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlung aus Österreich, der Schweiz und Deutschland an.

Der AKNIR hat außerdem Leitfäden zu folgenden Themen erstellt:

- Sonnenstrahlung
- Inkohärente ultraviolette Strahlung von künstlichen Quellen
- Inkohärente sichtbare und infrarote Strahlung von künstlichen Quellen
- Lichteinwirkungen auf die Nachbarschaft
- Elektromagnetische Felder

Stand: Oktober 2019

Verfasser: Martin Brose, Leiter der AG Leitfaden Laserstrahlung

Klaus Dickmann

Annette Frederiksen

Klaus R. Goebel

Werner Halbritter

Roland Krischek

Hans-Dieter Reidenbach

Bernhard Schmitz

Claudia Schneeweiss

Ljiljana Udovicic

Thomas Völker

Daniela Weiskopf

Redaktion und Bezug:

Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach, Sekretär des AKNIR

Technische Hochschule Köln – Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung

Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln

Telefon: +49 221 - 8275 2003, Telefax: +49 221 - 82752836

E-Mail: hans.reidenbach@th-koeln.de

Laserstrahlung

Inhaltsverzeichnis:

- 1 Beschreibung der Laserstrahlung
- 2 Laserarten und Anwendungen
- 3 Wirkungen auf den Menschen
- 4 Indirekte Wirkungen
- 5 Gesetzliche Regelung und Normen
- 6 Gefährdungsbeurteilung
- 7 Expositionsgrenzwerte
- 8 Klasseneinteilung
- 9 Messung und Berechnung
- 10 Schutzmaßnahmen
- 11 Besondere Aspekte beim Einsatz von Lasern in der Medizin
- 12 Besondere Aspekte beim Einsatz von Lasern als Verbraucherprodukte
- 13 Besondere Aspekte bei der Lasermaterialbearbeitung
- 14 Expositionsgrenzwerte in der Schweiz
- 15 Informationsquellen und Literatur
- 16 Adressen

1 Beschreibung der Laserstrahlung

Das Wort LASER ist eine Abkürzung für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ und beschreibt den Prozess der Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Ein Laser liefert kohärente, monochromatische Strahlung mit großer Energie- und Leistungsdichte sowie einer ausgeprägten Richtungscharakteristik, d. h. gebündelte, fast parallele Strahlung ist typisch für diese optische Strahlungsquelle.

Laserstrahlung kann technisch in den nachfolgenden Wellenlängenbereichen der optischen Strahlung zwischen 100 nm und 1 mm erzeugt werden:

Wellenlängenbereich	Wellenlänge in nm
Ultraviolett C (UV-C)	100 bis 280
Ultraviolett B (UV-B)	280 bis 315
Ultraviolett A (UV-A) ¹	315 bis 400
Sichtbare Laserstrahlung (VIS) ¹	400 bis 700
Infrarot A (IR-A)	700 bis 1 400
Infrarot B (IR-B)	1 400 bis 3 000
Infrarot C (IR-C)	3 000 bis 1 000 000

Soweit die Strahlung mit Wellenlängen unterhalb von 100 nm, d. h. im Röntgenbereich, erzeugt wird, fällt sie auf Grund der größeren Photonenenergie in den Regelungsbereich ionisierender Strahlung (siehe auch Abschnitt 4.4).

Die Einordnung der am häufigsten verwendeten Lasertypen wird in Abbildung 1 verdeutlicht.

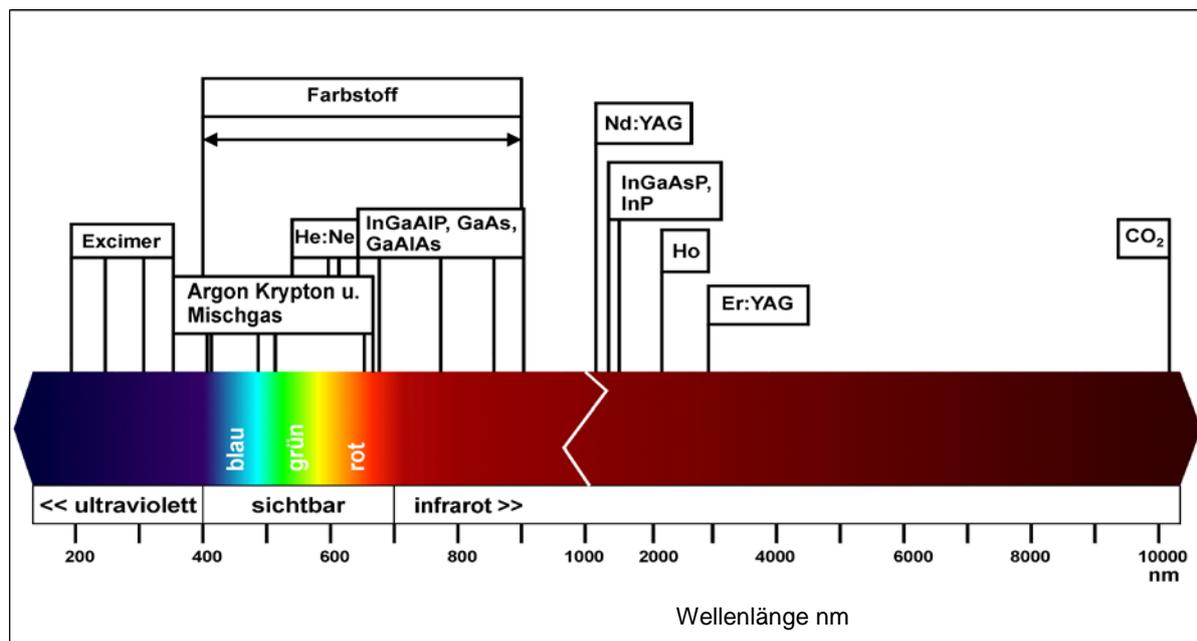


Abbildung 1: Laserarten und Wellenlängen der Laserstrahlung

¹ In diesem Leitfaden weicht die Definition des Wellenlängenbereichs der sichtbaren Strahlung von der Definition für inkohärente Strahlung ab, wo der sichtbare Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm definiert wird.

2 Laserarten und Anwendungen

1960 gelang es Th. Maiman erstmals, mit einem mit Blitzlicht angeregten (gepumpten) Rubinkristall, einen Festkörperlaser für den sichtbaren Bereich zu realisieren. Seitdem entstanden als Folge intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten eine Reihe weiterer Lasertypen. Heute ist eine große Anzahl von Lasern verfügbar, die Laserstrahlung vom Ultraviolett- bis zum Fernen-Infrarot-Bereich emittieren.

Lasere werden insbesondere in der Materialbearbeitung, in der Mess- und Prüftechnik, in der Analytik, im Bauwesen, in der Informations- und Kommunikationstechnik, in der medizinischen Diagnostik und Therapie sowie bei Shows und sonstigen Vorführungen eingesetzt. Die Zahl der an Laser-Einrichtungen Beschäftigten und mit dem Betrieb von Lasern befassten Personen hat in den vergangenen Jahren zugenommen.

In den Tabellen 1 und 2 sind die verschiedenen Laserarten mit ihren typischen Kennwerten und Anwendungsbereichen dargestellt.

Tabelle 1: Gaslaser (Beispiele)

Lasermedium	Wellenlänge in μm	typische Ausgangs- leistung in W	typische Ausgangs- energie in J	Anwendungsbereiche
		Dauerstrich- betrieb (CW)	Impuls- betrieb	
Stickstoff (N_2)	0,3371		$0,1 \cdot 10^{-3}$ - 0,1	Pumpen von Farbstofflasern, Photochemie
Excimer (Edelgas- halogenid- laser)	ArF KrF XeCl XeF 0,1931 0,2484 0,308 0,351		0,1 - 1	Materialbearbeitung, Spektroskopie, Photochemie, optisches Pumpen von Farbstofflasern, Medizin
Helium-Neon (He:Ne)	dominant bei: 0,6328 weitere Linie: 0,543	$0,5 \cdot 10^{-3}$ - 0,1		Messtechnik, Justieren, Holografie
Argon (Ar^+)	Linien von 0,3511 bis 0,5287	0,5 - 40		Holografie, Messtechnik, Spektroskopie, Medizin, Pumpen von Farbstofflasern
Krypton (Kr^+)	Linien von 0,324 bis 0,858	0,5 - 12		Spektroskopie, Photolithographie, Pumpen von Farbstofflasern, Medizin
Kohlendioxid (CO_2)	10,6	$1 \cdot 10^2$ - $50 \cdot 10^3$	$1 - 2 \cdot 10^3$	Materialbearbeitung, Lidar, Medizin, Spektroskopie

Tabelle 2: Festkörper-, Halbleiter- und Farbstofflaser (Beispiele)

Lasermedium	Wellenlänge in μm	typische Ausgangs- leistung in W	typische Ausgangs- energie in J	Anwendungsbereiche
		Dauerstrich- betrieb - (CW)	Impuls- betrieb	
Rubin ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)	0,694		0,1 - 300	Medizin, Lidar, Materialbearbeitung
Faserlaser/ Scheibenlaser	0,9 – 1,2	1 - 100 000 (1ps bis CW)		Materialbearbeitung
Neodym-Glas (Nd:Glas)	1,06		$7 \cdot 10^{-3}$ - 400	Materialbearbeitung, Plasmaforschung, Photochemie
Neodym-YAG (2. Harmonische)	1,064 (0,532)	1 - 3 000 (0,5 - 30)	0,05 - 10	Materialbearbeitung, Medizin
Alexandrit	0,755		0,1 - 1	Medizin
Ti:Saphir	0,37 – 3		bis 1	Spektroskopie; Forschung; UKP-Laser zur Materialbearbeitung
Diodenlaser (allgemein)	0,38 – 2,0	$1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^5$		nahezu alle Bereiche
ZnSSe / ZnSe / CdZnSe InGaN AlGaInP / GaN InGaN AlGaInP / GaAs, InGaAs / GaAs InGaAsP / InP GaInSn GaInSb / GaSb Pb-Chalkogenide	0,25 - 0,36 0,30 - 0,4 0,39 - 0,41 0,4 - 0,5 0,515 - 0,535 0,6 - 0,7 0,7 - 0,88 0,9 - 1,1 1,3 - 1,55 2,1 - 4,0 2,6 - 30	$3 \cdot 10^{-3}$ - 1		Optische Informations- übertragung, optische Plattenspeicher (Audio, Video), Laserdrucker, Messtechnik, Pumpen von Festkörper-Lasern, Medizin
Farbstoffe (allgemein)	0,3 - 1,28	0,1 - 3	$2,5 \cdot 10^{-3}$ - 5	Materialbearbeitung, Medizin, Spektroskopie

Laser, die mit einer Strahlungsdauer von mehr als 0,25 s strahlen, werden als Dauerstrichlaser (CW von „continuous wave“) bezeichnet.

Impulslaser erzeugen je nach Typ und Anwendung Impulse im Bereich von Femtosekunden bis 0,25 s.

Die Impulswiederholffrequenzen sind von Lasertyp zu Lasertyp bei den unterschiedlichen Betriebsweisen verschieden.

3 Wirkungen auf den Menschen

3.1 Grundlagen der Wirkmechanismen

Die Wirkungen der Laserstrahlung auf biologisches Gewebe werden einerseits durch die „optischen“ Eigenschaften des Gewebes, wie z. B. Reflexion, Streuung und Absorption und andererseits durch die physikalischen Eigenschaften der Laser, wie dessen Wellenlänge und Impulswiederholfrequenz, bestimmt. Die Wirkung hängt hauptsächlich von der Bestrahlungsstärke bzw. der Bestrahlung am Auftreffort und der Bestrahlungsdauer ab.

Grundsätzlich zeigt organisches (biologisches) Gewebe bei der Einstrahlung von Laserstrahlung die gleiche Wirkung wie anorganische Materie. Darüber hinaus resultieren aus der lebenden Materie ganz spezifische Prozesse bezüglich des zeitlichen Verlaufs und des Ausmaßes der Wirkung. Ein Teil der Strahlung wird an der Grenzfläche des biologischen Gewebes zur Umgebung hin reflektiert. Dabei kann die Reflexion zwischen vollständig gerichtet und vollständig diffus erfolgen. Insbesondere bestimmen die Laser-Wellenlänge, die Oberflächenbeschaffenheit und der Zustand des jeweiligen Gewebes die Reflexion. So wird z. B. die Reflexion von hellen Gewebereichen im Vergleich zu pigmentierten Bereichen im sichtbaren Spektralbereich größer sein. Im UV- und IR-Bereich können die Reflexionsverhältnisse anders sein als man dies aus der Kenntnis im sichtbaren Wellenlängenbereich erwarten würde. Ein Großteil der Laserstrahlung wird aus der Gewebeoberfläche rückgestreut (hauptsächlich zwischen 400 nm und 1400 nm). Dabei können Reflexionsgrade von über 40 % erreicht werden. Aber auch in tieferen Gewebeschichten kann an Strukturinhomogenitäten mit unterschiedlichen Brechzahlen Rückstreuung erfolgen. Im Gewebe tritt weder reine Absorption noch reine Streuung auf, sondern eine Kombination beider Prozesse. Bei alleiniger Absorption würde die Bestrahlungsstärke exponentiell nach dem Lambert-Beerschen Gesetz abnehmen. Bei zusätzlicher Streuung kann die Leistungsdichte in den oberen Gewebeschichten sogar größer als die der einfallenden Laserstrahlung unmittelbar unter der Oberfläche sein. Ursache dafür ist eine Überlagerung der einfallenden mit der aus tieferen Gewebeschichten rückgestreuten Laserstrahlung (Albedo-Effekt). Gewebereaktionen etwas unterhalb der Oberfläche können daher stärker sein als unmittelbar an der Oberfläche.

Streuung tritt im sichtbaren Bereich und im IR-A-Bereich entweder als Rayleigh-Streuung an Teilchen bzw. Strukturen auf, die klein gegen die Wellenlänge sind oder als Mie-Streuung, wenn die Streuteilchen bzw. -bereiche größere Abmessungen als die Wellenlänge besitzen. In biologischem Gewebe kann von sehr vielen elementaren Streuprozessen (typisch in der Größenordnung 100 bis 1000) ausgegangen werden bis die Energie des Photons der eindringenden Strahlung im Gewebe absorbiert wird.

Im Allgemeinen wird Laserstrahlung schon in den oberen Gewebeschichten, d. h. im Millimeter-Bereich, soweit abgeschwächt bzw. absorbiert, dass sie in den darunterliegenden Schichten keine Reaktionen hervorrufen kann. Dabei geht auch die Kohärenz der Laserstrahlung weitgehend verloren.

Die Wellenlängenabhängigkeit der Gewebeabsorption ist durch die unterschiedlichen „optischen“ Eigenschaften der Bestandteile des Gewebes gegeben. Absorption von Laserstrahlung in biologischem Gewebe bzw. in seinen Bestandteilen erfolgt im UV-Bereich überwiegend als Elektronenanregung und im IR-Bereich überwiegend als Anregung von Molekülschwingungen. Makroskopisch äußert sich ersteres in photochemischen Reaktionen und letzteres in einer Temperaturerhöhung des betreffenden Gewebes.

Die sehr große Absorption der Laserstrahlung im Gewebe bei Wellenlängen unterhalb von ca. 300 nm wird durch Wasser, Hämoglobin und Melanin verursacht, die Absorption der beiden Letztgenannten setzt sich auch bis in das Sichtbare fort. Ab etwa 700 nm nimmt die Wasserabsorption zum fernen Infrarot hin ständig zu, wobei Wasser bei ca. 3 μm und bei ca. 6 μm Absorptionsmaxima hat, bei denen die Eindringtiefe der Strahlung besonders klein ist. Daher kann durch CO_2 - (10,6 μm) und Er:YAG-Laser (2,94 μm), aber auch durch Excimer-Laser (≤ 355 nm), Gewebe bereits bei relativ kleinen Bestrahlungswerten von der Oberfläche abgetragen werden.

Im Wellenlängenbereich von 700 nm bis ca. 1200 nm ist die Absorption der Strahlung im Gewebe noch relativ klein, d. h. in diesem Bereich dringt Laserstrahlung (z. B. beim GaAs- und beim Nd:YAG-Laser) vergleichsweise tief in das Gewebe ein. Die zugeführte Energie verteilt sich auf ein größeres Volumen und bewirkt bei ausreichender Bestrahlung eine relativ ausgedehnte Gewebe-Koagulation.

Neben der im Gewebe absorbierten optischen Energie (abhängig von den optischen Eigenschaften des Gewebes in Verbindung mit der Wellenlänge und der Bestrahlungsstärke) bestimmt die Bestrahlungs- bzw. Einwirkungsdauer die sich anschließenden Gewebereaktionen. Infolge der thermischen Relaxationszeiten der Gewebe können mit kleinerer Impulsdauer im Gewebe sog. nichtlineare Prozesse (z. B. Photoablation, Photodisruption) hervorgerufen werden. Die thermischen Zeitkonstanten hängen von der Größe der bestrahlten Fläche, dem Durchblutungszustand und der Art des Gewebes ab.

Aus der jeweiligen Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) bzw. Energiedichte (Bestrahlung) und der Bestrahlungsdauer (Einwirkungsdauer) ergibt sich ein breites Spektrum von Wirkungen im biologischen Gewebe, das von den photochemischen über photothermische (lineare Effekte) Wirkungen bis zur Photoablation, plasma-induzierten Ablation und der Photodisruption (nichtlineare Effekte) reicht (siehe Abbildung 2).

Bei einer relativ langen Bestrahlungsdauer (größer als 1 s) sowie geringen Leistungsdichten im Bereich von etwa $30 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ bis $30 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2} = 10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) können im Gewebe photochemische Effekte ausgelöst werden. Diese Effekte werden z. B. medizinisch bei der photodynamischen Therapie und der Photostimulation eingesetzt.

Werden größere Leistungsdichten im Bereich von $10 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ bis $1 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Bestrahlungsdauer $10 \mu\text{s}$ bis 10 s) eingesetzt, sind thermische Effekte zu beobachten. Diese reichen von einer leichten Erwärmung des Gewebes über die Denaturierung (Koagulation) von Eiweiß und die Nekrose von Zellen, die Verdampfung (Vaporisation) des Wassers im Gewebe bis hin zur Verkohlung (Karbonisierung) des Gewebes. In der Medizin wird z. B. die Vaporisation zum Gewebeschneiden eingesetzt.

Bei noch größeren Leistungsdichten von $1 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$ bis $10 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ und Impulsdauern von 1 ns bis ca. $1 \mu\text{s}$ kommt es zum direkten Auflösen von Molekülbindungen und zur Abtragung von Gewebe mit nahezu keiner oder minimaler thermischer Belastung des umliegenden Gewebes (Photoablation). Die Nekrosezonen liegen dabei in der Größenordnung von Zellen (μm -Bereich). Die Photoablation wird z. B. in der refraktiven Chirurgie angewendet.

Bei noch weiterer Verkürzung der Impulsdauer auf Werte von 100 fs bis 100 ps und gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsdichte auf $0,1 \text{ TW}\cdot\text{cm}^{-2}$ bis $30 \text{ TW}\cdot\text{cm}^{-2}$ entsteht Plasma, d. h. die Atome werden ionisiert und es bildet sich eine sehr große Dichte freier Elektronen. Das Plasma bewirkt eine sehr saubere (glatte) Ablation, die sogenannte plasma-induzierte Ablation. Die im Einwirkungsbereich der Laserstrahlung vorliegenden elektrischen Feldstärken liegen mit $10^6 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ bis $10^8 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ in der Größenordnung der atomaren bzw. intramolekularen Coulomb-Felder und sind für das Auftreten eines Mikroplasmas im Gewebe verantwortlich.

Die Expansion des Mikroplasmas bewirkt auch eine akustische Stoßwelle, die harte Stoffe zerstören kann. In diesem Fall spricht man von Photodisruption. Die akustischen Wellen gewinnen an Bedeutung bei Leistungsdichten zwischen $0,1 \text{ TW}\cdot\text{cm}^{-2}$ und $10 \text{ PW}\cdot\text{cm}^{-2}$ und Impulsdauern zwischen etwa 200 fs bis 1000 ns . Dieser Prozess wird z. B. bei der Laserlithotripsie (Nierenstein-, Harnstein-, Speichelsteinzertrümmerung) ausgenutzt.

Plasma-induzierte Ablation und Photodisruption unterscheiden sich dabei insbesondere bezüglich der Energiedichten.

Auch bei einzelnen Laserimpulsen kleiner Impulsdauer kann bei großer Impuls-Wiederholfrequenz und entsprechend vergrößerter mittlerer Leistung ein thermischer Effekt entstehen, bei dem sich große Nekrosezonen ausbilden können (ca. $0,5 \text{ mm}$).

Trotz unterschiedlicher Gewebereaktionen kann man feststellen, dass zum Erreichen von Gewebeschäden jeweils ungefähr die gleiche Energiedichte (ca. $1 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ bis $100 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$) erforderlich ist. Je nach Einwirkungsdauer tritt aber ein anderer Gewebeschaden auf.

Außerdem zeigt sich in der Praxis, dass sich die verschiedenen Effekte teilweise überlappen. Weitere Darstellungen zur Abhängigkeit der verschiedenen Wirkungen von Laserstrahlung auf biologisches Gewebe finden sich z. B. in Niemz, 2007 [17] und Merkblatt M 080 [20].

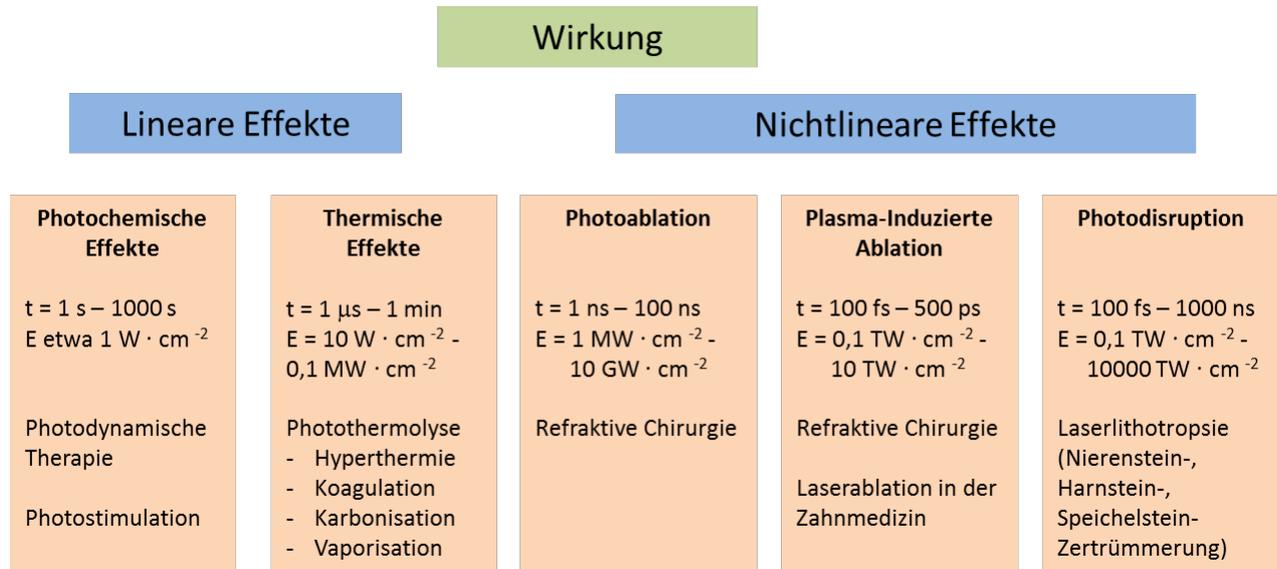


Abbildung 2: Wirkungen von Laserstrahlung auf biologisches Gewebe in der Medizin [17]

3.2 Gefährdungen des Auges

Das Auge ist in besonderem Maße der Aufgabe angepasst, optische Strahlung zwischen 400 nm und 700 nm zu empfangen und umzuwandeln in elektrische Signale und nachfolgend im Sehzentrum des Gehirns in Bildinformationen.

Laserstrahlung im Ultravioletten und im fernen Infrarot (IR-C) gefährdet insbesondere die Hornhaut, während Laserstrahlung im Sichtbaren und im nahen Infrarot (IR-A) bis zur Netzhaut gelangt. Mögliche Prozesse bei Einwirkung von Laserstrahlung auf das Auge sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Prozesse und Auswirkungen auf Auge und Haut

Spektralbereich	Auge	Haut
Ultraviolett C (UV-C)	Photokeratitis und Photokonjunktivitis Verbrennungen der Hornhaut	Verbrennungen Präkanzerose Erythem (Sonnenbrand) Karzinome
Ultraviolett B (UV-B)	Photokeratitis und Photokonjunktivitis Kataraktbildung Verbrennungen der Hornhaut	Verbrennungen Verstärkte Pigmentierung (Spätpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Erythem (Sonnenbrand) Präkanzerosen Karzinome
Ultraviolett A (UV-A)	Kataraktbildung Verbrennungen der Hornhaut	Verbrennungen Bräunung (Sofortpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Erythem (Sonnenbrand) Karzinome

Spektralbereich	Auge	Haut
sichtbare Strahlung (VIS)	Photochemische und Photothermische Schädigung der Netzhaut (Retina)	Verbrennungen Photosensitive Reaktionen
Infrarot A (IR-A, nahes Infrarot)	Katarakt, Verbrennung der Netzhaut (Retina) (Photothermische Schädigung) Verbrennungen der Hornhaut	Verbrennungen
Infrarot B (IR-B)	Katarakt, Verbrennungen der Hornhaut (Kornea)	Blasenbildung auf der Haut Verbrennungen
Infrarot C (IR-C, fernes Infrarot)	Verbrennungen der Hornhaut (Kornea), (Photothermische Schädigung)	Verbrennungen

Laserstrahlung im Sichtbaren und nahen Infrarot, d. h. zwischen 400 nm und 1400 nm, gefährdet das Auge besonders stark, da in der Netzhaut (Retina) und in der dünnen darunterliegenden, stark pigmentierten Gewebeschicht (Retinales Pigmentepithel, RPE), aufgrund der Fokussierung des Linsensystems Hornhaut und Linse sehr große Bestrahlungsstärken auftreten können. Die Zunahme der Bestrahlungsstärke von der Hornhaut bis zur Netzhaut ist etwa gleich dem Verhältnis der Pupillenfläche zur Fläche des Bildes auf der Netzhaut. Diese Zunahme entsteht dadurch, dass die Laserstrahlung, die durch die Pupille tritt, nahezu „punktförmig“ auf der Netzhaut abgebildet werden kann.

Die Pupille ist eine variable Öffnung, deren Durchmesser bis zu ca. 8 mm betragen kann, wenn sie in einem jungen Auge vollständig aufgeweitet ist. In der Laserschutzpraxis wird von einem maximalen Pupillendurchmesser von 7 mm ausgegangen. Wegen des aufgrund der Fokussierung sehr kleinen Fleckdurchmessers auf der Netzhaut steigt die Bestrahlungsstärke zwischen Hornhaut und Netzhaut um einen Faktor $1,2 \cdot 10^5$ bis $5 \cdot 10^5$. Bei einer Zunahme um den Faktor von $5 \cdot 10^5$ erhöht sich die Bestrahlungsstärke daher von z. B. $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ auf der Hornhaut auf einen Wert von $1,25 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ auf der Netzhaut. Bei den Festlegungen der Expositionsgrenzwerte wurde ein Durchmesser von $25 \mu\text{m}$ auf der Netzhaut zu Grunde gelegt. Das Bild auf der Netzhaut kann aber bei speziellen Anwendungsfällen einen Durchmesser in der Größenordnung von $10 \mu\text{m}$ besitzen.

Laserstrahlung aus dem Wellenlängenbereich unterhalb von 300 nm und oberhalb von 3000 nm wird vorwiegend in der Hornhaut absorbiert. Strahlung zwischen 300 nm und 3000 nm dringt mehr oder weniger tief in die Linse oder in den Glaskörper ein, d. h., je nach Wellenlängenbereich und Ort der Wechselwirkung, können verschiedene Arten der Augenschäden auftreten.

Bei den Schäden im UV-B- und UV-C-Bereich handelt es sich vorwiegend um Photokeratitis, also eine Hornhautentzündung. Anzeichen dafür sind Bindehautentzündung (Photokonjunktivitis) mit Tränen, Photophobie und einem Gefühl wie Sand in den Augen. Diese Effekte entwickeln sich in den nächsten 24 Stunden nach einer UV-Überexposition und sind meist mit unangenehmen bis hin zu großen Schmerzen verbunden, die bis zu 24 Stunden anhalten können. Im Allgemeinen verschwinden alle diese Effekte innerhalb von 48 Stunden. Bleibende Schäden sind aber nicht auszuschließen.

Das Aktionsspektrum (Wirkungsfunktion) von UV-Strahlung auf die Hornhaut hat ein Maximum im Bereich von 260 nm bis 280 nm entsprechend dem ersten Absorptionsband der aromatischen Aminosäuren der Proteine und der Basen der Nukleinsäuren. Dies ist daher der empfindlichste Wellenlängenbereich für eine Schädigung der Hornhaut.

Bei Bestrahlung des Auges im UV-A Bereich ist die Augenhornhaut und vor allem die Augenlinse betroffen. Dies kann zu einer irreversiblen Eintrübung der Augenlinse führen (Grauer Star (Katarakt)).

Im sichtbaren Spektralbereich verursachen insbesondere zwei Wirkmechanismen eine Schä-

digung. So besitzt die Wirkfunktion photochemischer Prozesse im kurzwelligeren Teil, und zwar im Bereich von 435 nm bis 440 nm ein Maximum, während im langwelligeren Teil die thermische Wirkung für einen Schaden auf der Netzhaut maßgeblich ist.

Wird Laserstrahlung auf die Netzhaut fokussiert, dann wird nur ein Bruchteil (bis zu 5 %) durch die Sehpigmente in den Stäbchen und Zapfen aufgenommen. Der Großteil wird in der darunterliegenden Pigmentschicht vom Melanin absorbiert. Eine Laserbestrahlung kann dabei örtliche Aufheizungen und Verbrennungen von Pigmentepithel und Sehzellen erzeugen.

Läsionen, wie z. B. Verbrennungen, können zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Sehvermögens führen. Abhängig von der Exposition kann ein Ausfall an Sehvermögen bestehen bleiben. Eine Abnahme des Sehvermögens wird üblicherweise vom Betroffenen selbst subjektiv nur dann wahrgenommen, wenn die zentrale Region (Macula lutea, „Gelber Fleck“) betroffen ist, welche als der wichtigste Teil der Netzhaut für das schärfste Sehen und für das Farbsehen verantwortlich ist. Dieser Teil der Netzhaut wird benutzt, wenn man „direkt auf etwas blickt“. Ein Schaden in diesem Bereich erscheint anfänglich als trüber weißer Fleck, der den zentralen Sehbereich verdeckt und in zwei oder mehr Wochen zu einem dunklen Fleck werden kann.

Größere Schäden im Gesichtsfeld führen zu ernsten bleibenden Beeinträchtigungen (Visus- bzw. Sehschärfeverlust). Trifft die fokussierte Laserstrahlung das Nervengewebe im blinden Fleck, so kann die Beeinträchtigung des Sehvermögens bis zur Blindheit reichen. Kleine periphere Läsionen bleiben dagegen meist unbemerkt und können sogar bei einer systematischen Augenuntersuchung kaum gefunden werden.

Die Stufen der Retinaschädigungen reichen von kaum identifizierbaren Schäden über sichtbare Ödeme (Wassereinschwemmungen), Koagulationen und Verbrennungen, Kraterbildung und Ausstoß von Retinamaterial in den Glaskörper bis zu massiven, ausgedehnten Blutungen in den Augapfel.

Infrarotstrahlung wirkt, außer bei Impulsen kleiner Bestrahlungsdauer, rein thermisch, wobei aber für den Ort maximaler Wirkung noch die wellenlängenabhängige Absorption berücksichtigt werden muss. Da Strahlung mit Wellenlängen oberhalb von ca. 1200 nm zunehmend vom Wasser in den vorderen Augenmedien absorbiert wird, erreicht nur noch wenig Strahlung die Netzhaut, d. h. außer Netzhautläsionen treten vermehrt Schäden in der Iris und in der Linse auf in Form von Katarakten (Grauer Star).

Bei Wellenlängen oberhalb von ca. 1,8 μm erfolgt die Absorption überwiegend in einer relativ dünnen Schicht der Hornhaut. Bei sehr kleiner Einwirkungsdauer bei gleichzeitig großer Leistungsdichte kann Ablation an der Oberfläche auftreten.

3.2.1 Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Lidschlussreflex und zu Abwendungsreaktionen

In Vorschriften, Normen und Regeln wurden die Laserklassifizierung und das Sicherheitskonzept für Laser der Klasse 2 und der früheren Laserklasse 3A (für sichtbare Laserstrahlung, d. h. im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm) jahrelang im Wesentlichen auf der Basis von Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes oder gar nur auf dem Lidschlussreflex begründet. Auch nach Einführung der Laserklasse 2M und für diejenigen Laser der Klasse 3R, die im sichtbaren Spektralbereich emittieren, wurde davon ausgegangen, dass eine kurzzeitige Exposition von maximal 0,25 s durch physiologische Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes sichergestellt sei und das bisherige Sicherheitskonzept beibehalten.

Dabei war allerdings bereits in Untersuchungen an mehr als 1 400 Probanden unter Labor- und Feldbedingungen gezeigt worden, dass nur in etwa 16 % bis 20 % der Fälle ein Lidschlussreflex auftritt, wenn Menschen mit einem typischen Laser der Klasse 2 bestrahlt wurden. Die Untersuchungen waren mit Laserstrahlung (Wellenlängen 670 nm, 635 nm und 532 nm) sowie mit hellen LEDs im roten und blauen Spektralbereich durchgeführt worden, da zu diesem Zeitpunkt LEDs noch unter die Laserklassifizierungsregeln fielen.

Außer einer gewissen Wellenlängenabhängigkeit, die zeigte, dass bei 532 nm öfter ein Lidschlussreflex ausgelöst wurde als bei längerwelliger roter Laserstrahlung, konnte eine Abhängigkeit als Funktion der Bildgröße auf der Netzhaut, nicht aber bezüglich des Alters oder des Tragens von Sehhilfen (z. B. Brillen) gefunden werden.

Dass auch andere Abwendungsreaktionen, wie Kopf- und Augenbewegungen sowie das Schließen der Augen, nicht zu einer wesentlichen Erhöhung der physiologischen Schutzreaktionen beitragen, konnte anschließend an fast 1 200 Personen nachgewiesen werden, da diese Reaktionen mit weniger als 10 % noch seltener als der Lidschlussreflex auftraten. Auch bei diesen Untersuchungen wurden die Versuchsteilnehmer in Labor- und Feldversuchen mit höchstens 80 % des maximal zulässigen Bestrahlungswertes exponiert. Dabei war deren Kopf frei beweglich, damit Abwendungsreaktionen ungehindert erfolgen konnten. Im Einzelnen kamen Laser in einem Scannersystem, auf einer optischen Bank mit Zieleinrichtung oder zusammen mit einem speziellen Eye-Tracker zum Einsatz. Außerdem wurden auch Leistungs-LED und ein LED-Array als Lichtquellen eingesetzt.

Bei allen bislang vorliegenden Untersuchungen an insgesamt 2 650 Personen zeigten lediglich 19 % einen Lidschlussreflex und nur 6 % eine andere Abwendungsreaktion. Somit können keine gesicherten Aussagen zum Schutz der Augen durch den Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen im Sinne der Prävention gemacht werden.

Andererseits muss aber auch berücksichtigt werden, dass trotz fehlender oder nicht ausreichender Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes bei unbewusster kurzzeitiger Exposition keine eindeutigen Beweise für Augenschäden vorliegen.

Beim bewussten Blick in den Strahl eines Lasers der Klassen 2 oder 2M (oder alt 3A) steigt aber mit zunehmender Expositionsdauer das Risiko eines Augenschadens. Selbst eine mit einer Exposition verbundene starke Blendung führt nicht unbedingt zu Abwendungsreaktionen und somit nicht zur Verkürzung der Expositionsdauer.

Um dennoch Laser der Klasse 2 und 2M nicht als gefährlich einstufen zu müssen, wurde ein aktives Schutzkonzept evaluiert. Hierzu wurde in Feldversuchen an mehr als 200 Personen gezeigt, dass durch eine Handlungsanweisung zur Ausführung aktiver Schutzreaktionen, nämlich durch sofortiges Schließen der Augen und durch eine bewusste Bewegung des Kopfes, immerhin bis zu 80 % der exponierten Personen einen Schutz gegenüber Laserstrahlung innerhalb von etwa 2 Sekunden erzielen konnten, also eine deutliche Steigerung des Schutzes möglich ist.

Diese wissenschaftlichen Erkenntnisse und die Aufforderung zu aktiven Schutzreaktionen sollten sich daher auch in den Benutzerinformationen der entsprechenden Laserstrahlquellen finden.

Ab der 2. Ausgabe der Norm DIN EN 60825-1:2008 wird auf die vorstehenden Zusammenhänge im informativen Anhang zur Beschreibung der Laserklassen hingewiesen. Dort steht:

- Benutzer werden durch die Kennzeichnung angewiesen, nicht in den Strahl zu blicken, d. h. aktive Schutzreaktionen auszuführen durch Bewegen des Kopfes oder Schließen der Augen und durch Vermeiden längeren absichtlichen Blickens in den Strahl.

Daher sollte man, falls Laserstrahlung der Klasse 2 ins Auge trifft, bewusst die Augen schließen und sich sofort abwenden. Darüber hinaus wird in der DGUV Information 203-042 „Auswahl und Benutzung von Laser-Schutzbrillen, Laser-Justierbrillen und Laser-Schutzabschirmungen“ darauf verwiesen, dass bei der Auslegung von Laser-Justierbrillen eine Zeitdauer (Beobachtungszeit bzw. Reaktionszeit) von 2 s auf der Basis der vorliegenden Erkenntnisse empfohlen wird [33].

3.2.2 Auswirkung einer Blendung

Bereits Laser der Klasse 1 können durch ihre Blendwirkung ein hohes indirektes Gefahrenpotenzial besitzen. Wie nach dem Blick in andere helle Lichtquellen, z. B. die Sonne oder Scheinwerfer, können temporär eingeschränktes Sehvermögen und Nachbilder, je nach Situation, zu Irritationen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und sogar zu Unfällen führen.

Grad und Abklingzeit sind nicht einfach quantifizierbar. Sie hängen jedoch maßgeblich vom Helligkeitsunterschied zwischen Blendlichtquelle und Umgebung und von den Expositionsparametern wie Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) und Expositionsdauer ab.

Es wurden z. B. Nachbilddauern bis 300 Sekunden ermittelt, wenn das Auge im Fleck des schärfsten Sehens (Fovea) mit einem Laserstrahl eines He-Ne-Lasers bei einer Wellenlänge von 632,8 nm und mit einer Leistung von weniger als 30 μW während 10 Sekunden bestrahlt wurde.

In den hierbei durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass der Blendwinkel und damit der Ort des Auftreffens des Laserstrahls auf der Netzhaut einen bedeutenden Einfluss auf die Blendung, deren Bewertung und auf die Nachbilddauer haben. Darüber hinaus wurde ermittelt, dass die Nachbilddauer logarithmisch mit der Laserstrahlenergie ansteigt und damit auch die entsprechende Auswirkung auf die Sehfunktionen. Als Faustregel lässt sich festhalten, dass die effektive Sehfunktionsbeeinträchtigung etwa 3 % bis 5 % der Nachbilddauer beträgt, was bei Klasse 1 Lasern bei einer Expositionsdauer von 1 s und bei einem Klasse 2 Laser bei 0,25 s für etwa 10 s bis 30 s eine vorübergehende, aber während dieser Zeitdauer bedeutsame Sehfunktionsstörung bedeuten könnte. Die in dieser Phase vorliegenden Sehstörungen könnten bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, wie z. B. beim Arbeiten mit Maschinen oder in großer Höhe, mit Hochspannung oder beim Fahren bzw. Fliegen, zu Unfällen führen und müssen in eine Risikobewertung mit einbezogen werden, und zwar auch dann, wenn lediglich Laser der Klasse 1 zum Einsatz kommen.

Zum Vergleich hinsichtlich des Effektes und der Auswirkung einer Blendung durch Laserstrahlung kann auch folgende Erkenntnis dienen: Eine Exposition durch einen grünen Laserstrahl (532 nm) bei einer Leistung von ca. 40 μW , (10% des Expositionsgrenzwertes für einen Laser der Klasse 1) für eine Zeitdauer von nur 0,5 s ist hinsichtlich der Sehbeeinträchtigung beim Lesen eines Textes vergleichbar mit einem Blick in die Sonne für eine Zeitdauer von 1 s und eine kurzzeitige Exposition von einer Viertelsekunde mit einem grünen Laserstrahl bei einer Leistung von 0,6 mW (60% des Expositionsgrenzwertes der Klasse 2) entspricht dem Blick in die Sonne für immerhin ca. 3 s. Die gleiche Sehbeeinträchtigung würde sich auch beim Blick in einen roten Laserstrahl eines Klasse-1-Lasers mit maximal erlaubter Leistung bei einer Zeitdauer von nur 1 s ergeben. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein 1 s bis 3 s dauernder Blick in die Sonne zu einer Sehbeeinträchtigung beim Lesen von 3 s bis 11 s, also von etwa dreifacher Dauer, führt.

3.3 Gefährdungen der Haut

Die Haut kann im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 1 400 nm wesentlich größeren Expositionen „Stand halten“ als das Auge, da erstens deren Reflexion größer ist und zweitens - im Vergleich zum Auge - die Haut keine fokussierende Eigenschaft besitzt. Die biologische Wirkung der Bestrahlung der Haut mit Laserstrahlung im UV-, VIS- und im IR-Spektralbereich kann entsprechend der Leistungsdichte und der Einwirkungsdauer variieren zwischen einem schwachen Sonnenbrand (Verbrennung 1. Grades, Erythem) und schwerer Blasenbildung (Verbrennung 2. Grades). Ascheartige Verkohlungen (Verbrennung 3. Grades) sieht man vorwiegend in Geweben mit großer Absorption nach sehr kurzer Bestrahlungsdauer mit Laserstrahlung großer Impulsleistung. Mögliche Prozesse und Auswirkungen bei Einwirkung von Laserstrahlung auf die Haut sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Im Allgemeinen kann man sagen, dass rechtzeitig behandelte Schäden durch Laserstrahlung an der Haut oft gut ausheilen, soweit sie nicht aus dem UV-Bereich stammen.

Die Wirkung im ultravioletten Spektralbereich von Laserstrahlung entspricht weitgehend der bekannten Wirkung inkohärenter UV-Strahlung, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass abgesehen von Streustrahlung die Einwirkung von Laserstrahlung auf die Haut meist ein lokales Ereignis darstellt, während bei sonstiger UV-Strahlung die Haut dagegen großflächig bestrahlt wird.

Die Wirkung von inkohärenter UV-Strahlung auf die Haut wird ausführlich im Leitfaden „Inkohärente ultraviolette Strahlung von künstlichen Quellen“ behandelt.

4 Indirekte Gefährdungen

Die Laserstrahlung ist hinsichtlich ihrer Wirkungen auf Augen und Haut bei den meisten Laseranwendungen das wesentliche Gefahrenpotenzial, aber daneben existieren in einigen Fällen weitere Gefährdungen. Bezüglich der Einwirkung auf den Menschen können diese Gefährdungen direkter oder indirekter Natur sein. Direkt bedeutet hierbei, dass der Laserstrahl selbst den Schaden an Auge oder Haut verursacht. Indirekt bedeutet, dass z. B. die Strahlung erst auf ein brennbares Material oder auf eine explosible Atmosphäre einwirkt und diese dann das Gefahrenpotenzial darstellt. Weiterhin kann das Gefahrenpotenzial direkt aus dem Laser selbst kommen, z. B. wenn er gefährliche Stoffe enthält, oder Rauch und Sekundärstrahlung entstehen aus der Art der Anwendung, z. B. beim Schneiden und Schweißen entsprechender Materialien.

Als Gefährdungspotenziale sind zu berücksichtigen:

- Elektrische Ströme und Spannungen,
- elektromagnetische Strahlung im Hochfrequenzbereich, einschließlich Mikrowellen,
- inkohärente optische Strahlung, Pumpstrahlung, Sekundärstrahlung beim Schneiden und Schweißen, einschließlich UV-Strahlung,
- Röntgenstrahlung,
- explosible Atmosphären und brennbare Stoffe,
- verwendete, freiwerdende oder entstehende infektiöse, gefährliche oder krebserzeugende Stoffe.

4.1 Elektrische Ströme und Spannungen

Überwiegend wird die Laserstrahlung aus elektrischer Energie erzeugt. Der großen Vielfalt der Laserprozesse und Anregungsmechanismen steht eine entsprechende Vielgestaltigkeit der elektrischen Ausführungen gegenüber. Die Anforderungen an die Ausrüstung sind, soweit für die Lasereinrichtung keine spezifische Geräte-Sicherheitsnorm vorliegt, der DIN EN 61010-1 "Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte, Teil 1: Allgemeine Anforderungen" zu entnehmen; sonst den speziellen zutreffenden Gerätenormen. Insbesondere sind die Maschinenrichtlinie [21] und die Betriebssicherheitsverordnung [22] zu beachten.

4.2 Inkohärente optische Strahlung

Neben der Laserstrahlung können im optischen Bereich auch inkohärente Pumpstrahlung sowie Sekundärstrahlung beim Schneiden und Schweißen auftreten.

Der blaue Anteil und das Ultraviolett des Wellenlängenspektrums sind besonders zu beachten, da sie - unabhängig davon, ob sie kohärent oder inkohärent sind - zu besonderen biologischen, aber auch chemischen Zersetzungsprozessen führen können.

Die Gefährdung durch infrarote und sichtbare Strahlung wird im Leitfaden „Inkohärente sichtbare und infrarote Strahlung von künstlichen Quellen“ dargestellt.

Bei einer möglichen Überschreitung der Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung müssen die Angebots- und Pflichtvorsorge gemäß ArbMedVV [19] beachtet werden.

4.3 Blendung

Sichtbare Laserstrahlung besitzt außer dem Potenzial zur dauerhaften Schädigung der Netzhaut auch die Fähigkeit der vorübergehenden Blendung. Bei Bestrahlung des Auges mit Laserstrahlung deutlich unterhalb des Klassengrenzwertes der Laserklasse 1 kann es bereits zum Erschrecken und zu Irritationen, zum Auftreten von länger anhaltenden Nachbildern und gegebenenfalls auch zur Blitzblindheit kommen und zwar besonders bei niedriger Umgebungshelligkeit. Hieraus können sich indirekte Folgen für die Sicherheit ergeben, die von vorübergehender Störung des Sehvermögens und von Blendungsreaktionen herrühren. Siehe hierzu auch unter Abschnitt 3.2.2.

4.4 Röntgenstrahlung

Röntgenstörstrahlung kann bei der Anwendung von Lasereinrichtungen, die ultrakurzgepulste Laserstrahlung emittieren, durch die Wechselwirkung mit der Materie als Sekundärstrahlung entstehen. Dies spielt vor allem für die Gefährdungsbeurteilung beim Betrieb von Ultrakurzpuls (UKP)-Lasereinrichtungen, wie sie in der Materialbearbeitung eingesetzt werden, eine wichtige Rolle. Untersuchungen, wie z. B. von Legall et al. [24] zeigen, dass die Grenzwerte für eine nicht strahlenschutzexponierte Person im Nahbereich solcher UKP-Lasereinrichtungen überschritten werden können.

Ob bei der Nutzung von UKP-Lasern gefährdende Röntgenstörstrahlung entsteht oder nicht hängt von mehreren Parametern, wie z. B. der Impulslänge, der Energiedichte, vom Targetmaterial und natürlich von der Fokussierung ab und ist im Einzelfall zu prüfen.

Das Inkrafttreten des neuen StrlSchG [23] bietet die Möglichkeit diese Anlagen bewusst im Strahlenschutz für ionisierende Strahlung zu erfassen und den Strahlenschutz angemessen zu regeln. In § 5 Absatz 2 werden die Anlagen im Sinne des StrlSchG definiert. Das StrlSchG umfasst Anlagen zur Erzeugung gewollter und ungewollter ionisierender Strahlung mit einer Teilchen- oder Photonenenergie von mindestens 5 keV. Hierunter fallen auch die UKP-Lasereinrichtungen zur Materialbearbeitung. Wie sich im Detail die rechtlichen Regelungen hinsichtlich UKP-Lasereinrichtungen gestalten lag bei Redaktionsschluss dieses Leitfadens noch nicht abschließend vor. Allerdings gilt bereits jetzt, wenn eine Gefährdung durch Röntgenstörstrahlung vorliegt, müssen entsprechende Schutzmaßnahmen im Sinne des Strahlenschutzes in Absprache mit dem Strahlenschutzbeauftragten getroffen werden [32]. (Siehe auch TROS Laserstrahlung Teil 3 Abschnitt 4.7.5 [25]).

4.5 Explosionsfähige Atmosphären und brennbare Stoffe

Mit dem Einsatz leistungsfähiger Laser ist auch immer eine latente Brand- und Explosionsgefahr verbunden. Besondere Vorsicht ist beim Einsatz von Lasern in sauerstoffangereicherter Luft geboten. Unter diesen Bedingungen besitzen Stoffe eine wesentlich höhere Zündfähigkeit.

Befinden sich in einem Raum zündfähige Gemische, so muss beim Lasereinsatz der Explosionsschutz beachtet werden. Näheres dazu findet sich in den Explosionsschutz-Richtlinien (siehe auch TROS Laserstrahlung Teil 3 Abschnitt 4.7.3).

4.6 Toxische oder infektiöse Stoffe

Laser können toxische oder gesundheitsschädliche Gase und Flüssigkeiten als Laser-Medium enthalten.

Bei Anwendungen von Laserstrahlung können außerdem toxische und möglicherweise karzinogene Stoffe entstehen oder freierwerden, insbesondere dann, wenn Stoffe bearbeitet werden, die vorher nie solchen extremen und sehr schnell ablaufenden thermischen Belastungen und chemischen Reaktionen ausgesetzt waren. Ähnliche Schadstoffe können auch bei Fehlfunktionen oder Störungen entstehen, z. B. toxische Stoffe bei der Zerstörung von optischen Komponenten.

Für die Arbeitssicherheit sind überwiegend die Schadstoffe von Bedeutung, die in die Umgebungsluft am Arbeitsplatz entweichen. Beim Laserschneiden und -schweißen müssen neben CO₂ und CO auch nitrose Gase, Fluorwasserstoff, Ozon, Phosgen und Chlorwasserstoff als Pyrolyseprodukte betrachtet werden.

Gegebenenfalls ist die Einhaltung bestimmter Grenzwerte gemäß der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) erforderlich, z. B.:

- Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz „Luftgrenzwerte“, siehe „Technische Regeln für Gefahrstoffe“ (TRGS 900)
- Biologische Grenzwerte (TRGS 903)
- Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe (TRGS 905)
- Luftrückführung beim Umgang mit krebserzeugenden Gefahrstoffen (TRGS 560).

Sofern diese Grenzwerte nicht sicher eingehalten werden können, müssen die Maßnahmen der Gefahrstoffverordnung ergriffen werden, wozu auch die Installation einer Absaugvorrichtung gehört. Die Möglichkeit der Freisetzung von infektiösem Material im Rahmen der Laserchirurgie hängt vom Gewebe ab und sollte durch geeignete Bauelemente, Absaugungs- und Filtertechnik erfasst werden.

Für die Schweiz gilt:

In der Publikation der SUVA Nr. 1903 „Grenzwerte am Arbeitsplatz“ finden sich:

- Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen gesundheitsgefährdender Stoffe (MAK- Werte)
- Biologische Arbeitsplatzkonzentrationswerte (BAT-Werte) und
- Arbeitsplatzhygienische Grenzwerte für physikalische Einwirkungen.

Für Österreich gilt:

- Die Grenzwerte am Arbeitsplatz sind in der GKV 2007 (Grenzwerteverordnung 2007 [Langtitel: Verordnung über Grenzwerte für Arbeitsstoffe und über krebserzeugende Arbeitsstoffe]) zu finden.
- Die biologischen Grenzwerte sind in Anlage 2 der VGÜ 2008 (Verordnung über die Gesundheitsüberwachung am Arbeitsplatz) enthalten.

4.7 Elektromagnetische Felder

Elektromagnetische Felder müssen nach den Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz an Arbeitsplätzen mit Exposition durch elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder betrachtet werden. Maßgebend hierfür ist derzeit die Unfallverhütungsvorschrift DGUV Vorschrift 15 (bisher die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11) „Elektromagnetische Felder“. Auf europäischer Ebene wurde 2013 die Richtlinie 2013/35/EU über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) erlassen. Die Umsetzung dieser Richtlinie in nationales Recht erfolgte am 15.11.2017 durch die EMF-Verordnung. Zu deren Konkretisierung werden noch Technische Regeln ermittelt. Die Wirkungen elektromagnetischer Felder werden ausführlich im Leitfaden „Elektromagnetische Felder“ beschrieben.

5 Gesetzliche Regelungen und Normen

Im nachstehenden Abschnitt wird auf einige wichtige gesetzliche Regelungen und Normen für den Umgang mit optischer Strahlung aus künstlichen Quellen, zu denen selbstverständlich Laserstrahlungsquellen gehören, eingegangen. Einen wichtigen Punkt bildet hier die seit 2010 in Deutschland in Kraft getretene Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch künstliche optische Strahlung (OStrV) und die zugehörigen Technischen Regeln.

5.1 Europäische Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“

Die europäische Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ ist am 5. April 2006 in Kraft getreten. Diese Richtlinie legt Mindestanforderungen für den Schutz der Arbeitnehmer vor einer Schädigung von Augen und Haut durch die Exposition gegenüber optischer Strahlung fest. Die Richtlinie ist für optische Strahlung aus künstlichen Quellen im Spektralbereich von 100 nm bis 1 mm anzuwenden und gilt für kohärente (Laserstrahlung) und inkohärente optische Strahlung. In dieser Richtlinie werden verbindliche Expositionsgrenzwerte festgelegt, bei deren Einhaltung für Beschäftigte ein Schutz vor allen gesundheitlichen Auswirkungen durch optische Strahlung aus künstlichen Quellen gegeben ist. Die Expositionsgrenzwerte sind für inkohärente Strahlung aus künstlichen Quellen im Anhang I und für Laserstrahlung im Anhang II der Richtlinie festgelegt. Die in der Richtlinie für Laserstrahlung angegebenen Expositionsgrenzwerte beziehen sich auf die Empfehlungen der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) von 1996 und

2000 [10, 11] und sind dabei für verschiedene Wellenlängenbereiche in Abhängigkeit der gefährdeten Organe Auge und Haut festgelegt. Neben umfangreichen Tabellen mit Grenzwerten enthalten die Anhänge hierzu Berechnungsgrundlagen und weitere Begriffserläuterungen. Ein wichtiger Bestandteil der Richtlinie ist die Verpflichtung des Arbeitgebers bei der Exposition gegenüber Laserstrahlung das Ausmaß der Exposition zu bewerten und ggf. Messungen oder Berechnungen durchzuführen, um sicher zu stellen, dass die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden. Die Gefährdungsbeurteilung ist von fachkundigen Personen durchzuführen und in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. Unter Berücksichtigung des technischen Fortschritts und der Verfügbarkeit von Mitteln hat der Arbeitgeber die Pflicht, eine Gefährdung durch Laserstrahlung auszuschließen oder zu minimieren. Dazu hat er bei einer Exposition gegenüber Laserstrahlung, die möglicherweise zu einer Überschreitung der Expositionsgrenzwerte führen könnte, ein Aktionsprogramm mit technischen und/oder organisatorischen Schutzmaßnahmen zu erstellen und zur Anwendung zu bringen.

5.2 Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG

In Artikel 13 der EU-Richtlinie 2006/25/EG wird die Kommission zur Erstellung eines unverbindlichen Leitfadens verpflichtet. Der unverbindliche Leitfaden soll eine Hilfestellung geben, um die Richtlinie besser zu verstehen. Dies betrifft insbesondere die Bestimmungen zu Artikel 4 „Ermittlung der Exposition und Bewertung der Risiken“ und Artikel 5 „Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Risiken“ sowie zu den Expositionsgrenzwerten nach Anhang I „Inkohärente optische Strahlung“ und Anhang II „Laserstrahlung“. In den Anhängen des Leitfadens werden die Eigenschaften der optischen Strahlung, ihre biologischen Wirkungen auf das Auge und die Haut sowie der Gebrauch von Substanzen, die die Lichtempfindlichkeit von Menschen verstärken, erläutert. Weiterhin sind umfangreiche ausgearbeitete Beispiele für einige künstliche Quellen optischer Strahlung enthalten und Tätigkeitsbereiche beschrieben, wie z. B. in der Glas- und Stahlverarbeitung.

Der Leitfaden bietet für Arbeitgeber und Fachkundige, insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen, eine gute Hilfestellung zur Anwendung der EU-Richtlinie 2006/25/EG. Von wesentlicher Bedeutung sind die Auslegungen zu den sogenannten trivialen Quellen. Für die Praxis von großem Nutzen sind die im Anhang aufgeführten beispielhaften Gefährdungsbeurteilungen für verschiedene Anwendungen von optischen Strahlungsquellen. Der Leitfaden liegt in den Amtssprachen der Europäischen Union vor und wurde in der deutschen Fassung 2011 veröffentlicht [18].

Der unverbindliche Leitfaden interpretiert nicht die OStrV und auch nicht die deutschen oder anderen nationalstaatlichen Regelungen.

5.3 Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdung durch künstliche optische Strahlung (OStrV)

Mit der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) ist die EU-Richtlinie 2006/25/EG in nationales Recht umgesetzt worden. Sie ist am 27. Juli 2010 in Kraft getreten [13] und zuletzt am 18.10.2017 geändert worden.

Die OStrV ist für jegliche Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung an Arbeitsplätzen verbindlich. Eine zentrale Forderung der OStrV ist die Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung am Arbeitsplatz. Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes [14] hat der Arbeitgeber zunächst festzustellen, ob Beschäftigte am Arbeitsplatz optischer Strahlung aus künstlichen Quellen ausgesetzt sind bzw. sein können. Ist dies der Fall, hat er alle hiervon ausgehenden Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu beurteilen und gegebenenfalls Maßnahmen zu ergreifen [14].

In Österreich wurde die Richtlinie 2006/25/EG durch die 221. Verordnung des Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz, veröffentlicht am 8. Juli 2010 im Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor der Einwirkung durch optische Strahlung (Verordnung optische Strahlung – VOPST) umgesetzt [15].

In der Schweiz ist die Richtlinie 2006/25/EG rechtlich nicht anwendbar. Dagegen bilden das Arbeitsgesetz und das Unfallversicherungsgesetz mit ihren Verordnungen die rechtliche Basis für den Schutz vor optischer Strahlung an Arbeitsplätzen. Grenzwerte und weitere Vorschriften sind in der Publikation „Grenzwerte am Arbeitsplatz“ der Suva verbindlich festgelegt [16].

5.4 TROS Laserstrahlung zur OStrV

Da eine Arbeitsschutzverordnung aus prinzipiellen Erwägungen nicht zu sämtlichen in ihr enthaltenen Rechts- und Fachbegriffen Definitionen bzw. Erläuterungen enthalten kann, deren Erschließung und Verständnis für die Umsetzung einer Rechtsverordnung aber notwendig sind, hatte das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) den Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) beauftragt, unter Beteiligung des Ausschusses für Arbeitsmedizin (AfAMed) Technische Regeln zur OStrV zu erarbeiten. Die Technischen Regeln für Laserstrahlung sind erstmals im Mai 2015 und zuletzt im November 2018 im Gemeinsamen Ministerialblatt veröffentlicht worden [25]. Die Technischen Regeln sollen insbesondere die Anforderungen aus der OStrV zur Gefährdungsbeurteilung und Messung von Laserstrahlung, sowie die Schutzmaßnahmen konkretisieren.

Teil „Allgemeines“

Im Teil „Allgemeines“ werden wesentliche Begriffe hinsichtlich der Laserstrahlung konkretisiert, die bei der Durchführung der Gefährdungsbeurteilung, Messungen, Berechnungen und der Festlegung von Schutzmaßnahmen relevant sind. Hier werden z. B. die radiometrischen Größen und die Größen zur Laserstrahlcharakterisierung definiert sowie die Betriebszustände einer Laser-Einrichtung erläutert, die bei der Durchführung der Gefährdungsbeurteilung zu unterscheiden sind.

In diesem Teil werden auch die Aufgaben und Anforderungen an die Kenntnisse der Laserschutzbeauftragten beschrieben.

Die Anhänge zum Teil „Allgemeines“ erläutern das Laserprinzip und die Eigenschaften der Laserstrahlung, geben einen Überblick über Lasertypen und Laseranwendungen und stellen die biologischen Wirkungen optischer Strahlung mit möglichen Schädigungen der Augen und der Haut dar. Des Weiteren werden die Laserklassen beschrieben, die Kennzeichnung der Laser-Einrichtungen erläutert und Beispiele für die Kennzeichnung der Laserklassen angegeben.

Teil 1 „Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung“

Im Teil 1 wird das Vorgehen bei der Durchführung der Gefährdungsbeurteilung detailliert beschrieben. Eine Gefährdungsbeurteilung umfasst u. a. die Festlegung der zu beurteilenden Tätigkeiten und Arbeitsbereiche, die Ermittlung und Bewertung möglicher Gefährdungen, die Festlegung und Durchführung der Schutzmaßnahmen, die Überprüfung ihrer Wirksamkeit und die Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung sowie ihre Aktualisierung. Bei der Gefährdungsbeurteilung können die Herstellerdaten, wie z. B. die Einteilung in die Laserklassen 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4 nach DIN EN 60825-1:2008-05, den Arbeitgeber unterstützen. Lässt sich anhand dieser Informationen nicht sicher feststellen, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden, hat der Arbeitgeber das Ausmaß der Exposition durch Messungen und/oder Berechnungen festzustellen. Bei einer möglichen Überschreitung der Expositionsgrenzwerte sind die entsprechenden Schutzmaßnahmen festzulegen und deren Wirksamkeit zu prüfen.

Der Arbeitgeber trägt die Gesamtverantwortung für die Gefährdungsbeurteilung. Falls er nicht über die erforderliche Fachkunde verfügt, hat er sich durch eine fachkundige Person fachkundig beraten zu lassen. Dabei handelt es sich um Personen, die aufgrund ihrer fachlichen Ausbildung oder Erfahrungen ausreichende Kenntnisse über die Gefährdungen durch Laserstrahlung besitzen, um eine Gefährdungsbeurteilung durchführen zu können. Auch Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung dürfen nur von Personen vorgenommen werden, die über die dafür notwendige Fachkunde und die erforderlichen Messeinrichtungen verfügen.

Eine Unterweisung der Beschäftigten hat stattzufinden, wenn Gefährdungen für die Sicherheit und die Gesundheit möglich sind, d. h. wenn die Expositionsgrenzwerte überschritten werden können oder indirekte Gefährdungen (z. B. Blendung) ermittelt wurden. Dies kann auch schon bei Lasern der Klasse 1 der Fall sein. Während die Mindestinhalte der Unterweisung in der OStrV beschrieben werden, finden sich in Teil 1 weitere Inhalte der Unterweisung, die darüber hinaus erforderlich sein können. Kann eine Exposition durch Laserstrahlung oberhalb der Expositionsgrenzwerte auftreten, ist auch eine allgemeine arbeitsmedizinische Beratung der Beschäftigten erforderlich, deren Inhalte in diesem Teil ausführlich beschrieben sind.

Die TROS Laserstrahlung konkretisieren auch die Anforderungen der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) [19] in Bezug auf die Einwirkung von Laserstrahlung an Arbeitsplätzen. Die ArbMedVV sieht für Beschäftigte, die in Bereichen mit Laserstrahlung tätig sind, weder eine Pflicht- noch eine Angebotsvorsorge vor. Der Arbeitgeber hat Beschäftigten eine arbeitsmedizinische Vorsorge zu ermöglichen, sofern ein Gesundheitsschaden im Zusammenhang mit ihrer Tätigkeit nicht ausgeschlossen werden kann (Wunschvorsorge).

Ausführliche Anhänge des Teils 1 geben weitere Hinweise zur Gefährdungsbeurteilung bei Lichtwellenleiter-Kommunikations-Systemen, Laserbearbeitungsmaschinen, Show- und Projektionslasern (Anmerkung: Hierzu gehören auch Laserpointer), Lasern in medizinischen Anwendungen oder nicht klassifizierten Laser-Einrichtungen.

Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung“

Im Teil 2 wird die Vorgehensweise bei Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung und dem Vergleich der Messergebnisse mit den Expositionsgrenzwerten beschrieben. Die Expositionsgrenzwerte, die in der Anlage des Teils 2 angegeben werden, entsprechen weitestgehend den bisher maximal zulässigen Bestrahlungswerten für Laserstrahlung (MZB-Werten) der DGUV Vorschrift 11 bzw. 12 (Unfallverhütungsvorschrift BGV B2 bzw. GUUV-V B2) „Laserstrahlung“. Dieser Teil wendet sich u. a. an die fachkundigen Personen, die in Einzelfällen eine Bewertung anhand der Expositionsgrenzwerte durchführen müssen. Die komplexen Rechnungen und Bewertungen können jetzt anhand der umfangreichen Beispiele in diesem Teil nachvollzogen werden.

Falls eine Vorprüfung keine eindeutige Entscheidung darüber zulässt, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden, sind Messungen erforderlich. In der Anlage dieses Teils werden die Messgrößen und Parameter zur Charakterisierung, Messung und Berechnung von Laserstrahlung aufgeführt und es wird ein Überblick über Messgeräte zur Charakterisierung von Laserstrahlung gegeben. Bei der Dokumentation der Messergebnisse ist unbedingt darauf zu achten, dass diese jederzeit und in allen Details technisch nachvollziehbar sind (u. a. Typ und ggf. Seriennummer der Messgeräte, Kalibriernachweise).

Ebenfalls wird dort erläutert, wie das Ausmaß der Exposition durch Laserstrahlung zu berechnen ist und wie der Vergleich mit den Expositionsgrenzwerten erfolgen muss, um festzustellen, ob diese eingehalten werden. Ist dies nicht der Fall, sind Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Gefährdung durch Laserstrahlung festzulegen und durchzuführen.

Teil 3 „Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch Laserstrahlung“

Im Teil 3 wird auf die wichtigsten Schutzmaßnahmen in der **STOP-Reihenfolge** eingegangen: An erster Stelle steht der Einsatz alternativer Arbeitsverfahren oder Geräte, die zu einer geringeren Gefährdung der Beschäftigten führen (Substitution). Darauf folgen technische Maßnahmen, die immer Vorrang vor organisatorischen Maßnahmen haben. Wenn technische Maßnahmen (wie z. B. Laser-Einhausung, Verwendung von Abschirmungen, Strahlfallen, optische Filter, Schutzvorhänge sowie Schutzwände) oder organisatorische Maßnahmen (z. B. die Kennzeichnung und Festlegung von Zugangsregelungen zu Laserbereichen) nicht ausreichen oder nicht anwendbar sind, ist persönliche Schutzausrüstung (PSA) anzuwenden. Dazu gehören Laser-Schutzbrillen, Laser-Justierbrillen, Laserschutz-Filter, Schutzkleidung oder Schutzhandschuhe.

Einen idealen Schutz vor Laserstrahlung bietet z. B. eine Anlage, bei der die Laserstrahlung allseitig und lückenlos von einer Abschirmung umschlossen wird. In allen anderen Fällen sind weitergehende Schutzmaßnahmen erforderlich. So müssen die Laserbereiche der Klassen 2 und 2M während des Laserbetriebs mit dem Warnzeichen „Warnung vor Laserstrahl“ gekennzeichnet sein, falls der Laserstrahl in einem festen Aufbau im Arbeits- oder Verkehrsbereich verläuft und nicht handgehalten ist, wie z. B. bei Laserpointern zur Präsentation. Laserbereiche der Klassen 3R, 3B und 4 müssen immer gekennzeichnet und außerdem abgegrenzt sein. Der Einschaltzustand der Lasereinrichtung ist an den Zugängen zu Laserbereichen in geschlossenen Räumen in der Regel durch Warnleuchten anzuzeigen. Einsätze im Freien werden z. B. durch Blinkleuchten angezeigt. Alle Beschäftigten im Laserbereich der Klassen 3R, 3B und 4 haben Augenschutz zu tragen. Bevor sie eine Laser-Schutzbrille benutzen, müssen sie sich vergewissern, dass die Brille geeignet ist und keine offensichtlichen Mängel aufweist. Die Laser-Schutzbrillen müssen dicht am Gesicht anliegen und genormte Laserschutzfilter haben, geprüft und in der EU zertifiziert sein.

Die Anhänge des Teils 3 beinhalten Informationen zu Schutzmaßnahmen bei bestimmten Tätigkeiten, Verfahren und beim Betrieb spezieller Laser sowie beim Umgang mit Lichtwellenleiter-Kommunikations-Systemen mit Beispielen zur Kennzeichnung und Abgrenzung von Laserbereichen und Erläuterungen zur Erstellung einer Betriebsanweisung.

5.5 Ausbildung von Laserschutzbeauftragten gemäß DGUV Grundsatz 303-005

In dem DGUV Grundsatz „Ausbildung und Fortbildung von Laserschutzbeauftragten sowie Fortbildung von fachkundigen Personen zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung nach OStrV bei Laseranwendungen“ [31] werden die Anforderungen an die Ausbildung von Laserschutzbeauftragten und fachkundigen Personen unter Berücksichtigung der geänderten rechtlichen Rahmenbedingungen (OStrV, TROS Laserstrahlung) beschrieben.

Die Laserschutzbeauftragten müssen die für den jeweiligen Anwendungsbereich erforderlichen Fachkenntnisse besitzen und haben dies durch die erfolgreiche Teilnahme an einem Lehrgang nachzuweisen. Die Laserschutzbeauftragten müssen ihre fachliche Qualifikation darüber hinaus durch Teilnahme an spezifischen Fortbildungen auf aktuellem Stand halten (vgl. Abschnitt 6 des DGUV Grundsatzes).

Des Weiteren werden wichtige Anforderungen an die Ausbildungsstelle gestellt:

Die Lehrgangsveranstalter

1. stellen sicher, dass hinsichtlich der Lehrgangsinhalte die Anforderungen der TROS Laserstrahlung, Teil „Allgemeines“, Abschnitt 5.2.2 erfüllt sind,
2. stellen sicher, dass die Prüfung am Ende des Lehrgangs gemäß den Anforderungen der TROS Laserstrahlung, Teil „Allgemeines“, Abschnitt 5.2.3 erfolgt,
3. setzen nur fachlich qualifizierte Dozenten ein,
4. stellen geeignetes Lehrmaterial zur Verfügung, in dem die zu vermittelnden Lehrinhalte zusammengefasst sind. Sie stellen sicher, dass das Lehrmaterial auf dem aktuellen Stand ist. Geeignetes Lehrmaterial können z. B. Vortragsskripte, staatliches Regelwerk und Regelwerk der DGUV zum Arbeits- und Laserstrahlenschutz, Formelsammlungen sowie alle weiteren Unterlagen sein, die für die künftige Tätigkeit der Teilnehmer und Teilnehmerinnen als Laserschutzbeauftragte von Bedeutung sind,
5. stellen sicher, dass die Zahl der Teilnehmer je Lehrgang auf eine pädagogisch sinnvolle Zahl begrenzt wird. Es wird empfohlen, die Teilnehmerzahl 20 nicht zu überschreiten,
6. benennen einen verantwortlichen Lehrgangsleiter bzw. eine verantwortliche Lehrgangsleiterin, der bzw. die den Teilnehmern während des Lehrgangs als Ansprechpartner bzw. Ansprechpartnerin zur Verfügung steht und dafür zu sorgen hat, dass offene Fragen fachlich kompetent beantwortet werden.

Ferner wird im DGUV Grundsatz beschrieben welche wichtigen Anforderungen an eine Prüfung zu stellen sind. Die Prüfung dient dem Nachweis des erfolgreichen Erwerbs der erforderlichen Fachkenntnisse eines LSB nach § 5 Abs. 2 OStrV.

Die TROS Laserstrahlung, Teil „Allgemeines“, benennt in Pkt. 5.2.3 „Prüfungen“ die Anforderungen an die Durchführung der Prüfungen.

Folgende Punkte sind bei der Prüfungsdurchführung insbesondere zu beachten:

1. Die Prüfung am Ende des Lehrgangs in Form eines Multiple-Choice-Tests enthält mindestens 15 Fragen.
2. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn mindestens 70 % der Punktzahl erreicht wurden. Wurden mindestens 50 % der Fragen aus der schriftlichen Prüfung richtig beantwortet, kann durch eine erfolgreiche mündliche Prüfung das Lehrgangziel erreicht werden.
3. Gemäß Abschnitt 5.2.1 Abs. 2 der TROS Laserstrahlung, Teil „Allgemeines“, müssen die Prüfungsunterlagen von den Lehrgangsveranstaltern mindestens fünf Jahre zur Einsicht aufbewahrt werden.
4. Die Mindestdauer der Prüfung beträgt bei allgemeinen Lehrgängen 1 LE und bei anwendungsbezogenen Lehrgängen 0,5 LE (vgl. Tab. 1 und 2 in der TROS Laserstrahlung, Teil „Allgemeines“). Es wird empfohlen, auch bei anwendungsbezogenen Lehrgängen 45 Minuten Dauer einzuplanen.

Die Fortbildung soll sicherstellen, dass die Laserschutzbeauftragten über aktuelle Neuerungen im Vorschriften- und Regelwerk sowie neue Entwicklungen im Laserstrahlenschutz informiert werden. Ausgehend von einer kurzen Wiederholung wichtiger Aspekte des Laserstrahlenschutzes sollen die konkreten Inhalte der Fortbildung flexibel gestaltet werden.

Folgende Themen können beispielsweise behandelt werden:

1. Laserklassen und Schutzmaßnahmen
2. Praxisbeispiel(e) zur Gefährdungsbeurteilung
3. Aktuelles aus dem Vorschriften- und Regelwerk
4. Neuerungen im Laserstrahlenschutz (z. B. technische Entwicklungen)
5. Erfahrungsaustausch: Praxis des Laserschutzbeauftragten

Der Umfang der Fortbildung soll mindestens 8 Lehreinheiten betragen.

Außerdem werden im DGUV Grundsatz 303-005 die didaktischen und inhaltlichen Anforderungen und Empfehlungen erläutert und im Anhang wird der Kursaufbau sowie der Ablauf anhand von Beispielen ausführlich dargestellt.

5.6 Normung zu den Laserklassen

Die Zuordnung von Lasereinrichtungen zu verschiedenen Laserklassen soll für den Benutzer die mögliche Gefährdung sofort ersichtlich machen, damit er vereinfacht abschätzen kann, welche Schutzmaßnahmen zu ergreifen sind. Daher ist die Zuordnung so gewählt, dass in der Regel mit zunehmender Klassennummer auch die Gefährdung, die von einer Laserstrahlquelle ausgeht, größer wird und deshalb auch die Schutzmaßnahmen umfangreicher werden. Die Grenzwerte für die einzelnen Klassen nennt man „Grenzwerte zugänglicher Strahlung“ (GZS).

Die GZS sind hierbei so gewählt, dass die maximal zulässigen Bestrahlungswerte (MZW-Werte) bezogen auf die jeweilige Zeitbasis (30 000 s, wenn absichtliche und langzeitige oder 100 s, wenn nur zufällige und kurzzeitige Beobachtung der Laserstrahlung vorausgesetzt wird) bei der Laser-Klasse 1 nicht überschritten werden können.

Die Klassifizierung nach DIN EN 60825-1 übernimmt der Hersteller.

Seit Mai 2015 gibt es eine neue Ausgabe der DIN EN 60825-1; an dieser Stelle wird auf die Einzelheiten der Klassifizierung nach dieser Normausgabe aber nicht eingegangen. Diese Ausgabe muss für Produkte, die ab 19.6.2019 entwickelt und hergestellt werden, beachtet werden.

In der Schweiz wird in den gesetzlich verankerten Grenzwerten direkt auf die SN EN 60825-1 und -2 verwiesen und damit werden diese Normen direkt übernommen. Die Umsetzung dieser beiden Normen insbesondere die Klassifizierung von Lasern wird damit zur Pflicht.

Lasereinrichtungen werden in Europa ihrer Zuordnung gemäß u. a. in der Maschinen- oder Niederspannungs-Richtlinie gelistet (Tab. 4), d. h. es sind die entsprechenden harmonisierten Normen mit Bezug zur Laserstrahlung aufgeführt.

Tabelle 4: Produktgruppen und ihre harmonisierten und gelisteten Normen zur Laserstrahlung (vereinfacht)

Produktgruppen die optische Strahlung emittieren	Harmonisierte Normen zur Produktsicherheit bzgl. optischer Strahlung – gelistet unter:	
	Maschinen- RL	Niederspannungs- RL
Laser-Materialbearbeitungs-Maschinen	EN ISO 11553-1	EN 60825-4 Anm.: Antrag auf Listung in der Maschinenrichtlinie wurde gestellt.
Laser zur Handmaterialbearbeitung	EN ISO 11553-2	
Laserklassifizierung		EN 60825-1
Laser und LED in der Lichtwellenleitertechnik		EN 60825-2
Strahlungsemissionen von Maschinen (auch optisch)	EN 12198	

5.6.1 ANSI Z136

- Seit der Änderung der ANSI Z136.1–2007 gibt es eine Annäherung des amerikanischen Standards für den sicheren Umgang mit Lasern bzgl. der Laserklassifizierung zur IEC 60825 bzw. DIN EN 60825. Dennoch finden sich z. B. immer noch in Betrieben Laser, die mit den Klassen IIIa bzw. 3a und IIIb bzw. 3b gekennzeichnet sind. Laser der Klasse 3a werden seit der Fassung der ANSI Z136.1 aus dem Jahr 2007 je nach Wellenlänge in die Klassen 2M und 3R eingestuft. Die Laserklasse 3b entspricht in der Regel der Klasse 3B. Diese sind der Klassifizierung nach DIN EN 60825-1 gleichzusetzen. Dennoch wird hier noch einmal beschrieben, wie die Klasse 3a definiert war.

Klasse 3a: Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge gefährlich, wenn der Strahldurchmesser durch optische Instrumente verkleinert werden kann. Wenn keine Gefährdung durch die Verwendung von optischen Instrumenten vorliegt, ist die zugängliche Laserstrahlung im sichtbaren Bereich (400 nm bis 700 nm) bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer ($\leq 0,25$ s) und bei anderen Wellenlängen auch bei längerer Bestrahlungsdauer, ungefährlich.

- Ebenfalls wurden in der ANSI Z136 die Laserklassen 1M und 2M eingeführt, deren Definition der IEC 60825-1 bzw. DIN EN 60825-1 entspricht.

6 Gefährdungsbeurteilung

6.1 Allgemeines

Nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes ist eine Beurteilung der für die Beschäftigten mit ihrer Arbeit verbundenen Gefährdungen in der Verantwortung des Unternehmers durchzuführen. In der Gefährdungsbeurteilung sind alle Gefährdungen zu betrachten, die durch physikalische, chemische oder sonstige Einwirkungen am Arbeitsplatz vorliegen können. Nach der OStrV sind die Gefährdungen durch Expositionen optischer Strahlung aus künstlichen Quellen zu berücksichtigen. Eine Gefährdungsbeurteilung ist vor der Aufnahme einer Tätigkeit durchzuführen und Schutzmaßnahmen sind nach dem Stand der Technik zu treffen.

Die Gefährdungsbeurteilung ist regelmäßig zu überprüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren. Die Gefährdungsbeurteilung ist zu dokumentieren. Hierzu sind in der OStrV

Anforderungen an Inhalt und Form der Dokumentation sowie für ihre Aufbewahrungsfrist festgelegt. Bei Lasern, die Laserstrahlung im UV-Bereich oder inkohärente UV-Strahlung beinhalten (z. B. als Pumpstrahlung bzw. durch einen Materialbearbeitungsprozess), von denen Personen unter Berücksichtigung aller Betriebszustände exponiert werden können, sind die Dokumente der Gefährdungsbeurteilung 30 Jahre aufzubewahren.

Anmerkung:

Vereinfacht kann in der Regel eine Gefährdungsbeurteilung anhand der ausgewiesenen Laserklassen entsprechend einschlägiger Lasersicherheitsnormen erfolgen.

Der Ablauf der Gefährdungsbeurteilung wird in folgenden Prozessschritten durchgeführt:

1. Festlegen der zu beurteilenden Arbeitsbereiche und Tätigkeiten,
2. Ermitteln der Exposition; Ermitteln der mit der Laserstrahlung verbundenen möglichen indirekten Gefährdungen,
3. Bewerten der möglichen Gefährdungen durch Exposition oder indirekte Gefährdungen,
4. Festlegen konkreter Arbeitsschutzmaßnahmen (bei diesem Schritt ist die Rangfolge der Maßnahmen nach § 4 ArbSchG und §§ 4, 5 und 7 OStrV zu beachten),
5. Durchführen der Maßnahmen,
6. Überprüfen der Wirksamkeit der Maßnahmen und Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung,
7. Fortschreiben der Gefährdungsbeurteilung.

6.2 Fachkundige für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung

Eine Gefährdungsbeurteilung im Sinne des § 5 Absatz 1 OStrV darf nur von fachkundigen Personen durchgeführt werden. Die Fachkunde liegt vor, wenn ausreichende Kenntnisse über die Gefährdungen durch Laserstrahlung vorhanden sind (z. B. entsprechende fachliche Ausbildung). Umfang und Tiefe der notwendigen Kenntnisse sind in Abhängigkeit von der zu beurteilenden Tätigkeit unterschiedlich. Fachkundige Personen für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung können zum Beispiel die Fachkraft für Arbeitssicherheit und ggf. der Laserschutzbeauftragter (LSB) sein, wenn dieser über die nachstehenden Kenntnisse zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung verfügt.

Die Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung verlangt Kenntnisse:

- Der anzuwendenden Rechtsgrundlagen,
- zu den physikalischen Grundlagen der Laserstrahlung,
- der für die Beurteilung geeigneten Informationsquellen,
- zu dem für die Beurteilung notwendigen Stand der Technik,
- der Wirkungen von Laserstrahlung (auf die Augen, Haut und Materialien),
- des Vorgehens bei der Beurteilung von Wechsel- oder Kombinationswirkungen von verschiedenen Laserquellen,
- zu den Tätigkeiten im Betrieb, bei denen Personen Laserstrahlung ausgesetzt sein können,
- der technischen, organisatorischen und personenbezogenen Schutzmaßnahmen (insbesondere Berechnung und Auswahl der Laser-Schutzbrillen, Laser-Justierbrillen und Schutzeinhausungen),
- der alternativen Arbeitsverfahren,
- der Überprüfung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen und
- der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung.

6.3 Fachkundige für die Durchführung von Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung

Messungen und Berechnungen dürfen nur von fachkundigen Personen durchgeführt werden, die auch über die dafür notwendigen Einrichtungen verfügen. Die fachkundige Person muss ihre Kenntnisse auf dem aktuellen Stand halten.

Die Kenntnisse für die Durchführung von Expositionsmessungen und -berechnungen am

Arbeitsplatz können u. a. durch Teilnahme an einer geeigneten Fortbildungsveranstaltung von z. B. Technischen Akademien, Unfallversicherungsträgern oder ähnlichen Institutionen, sowie Hersteller von Lasermesstechnik, erworben und „aufgefrischt“ werden.

6.4 Aufgaben, Rechte und Pflichten des Laserschutzbeauftragten (LSB)

Werden im Unternehmen Lasereinrichtungen der Klassen 3R, 3B oder 4 betrieben, so ist schon seit den 80er Jahren in Deutschland ein Laserschutzbeauftragter (LSB) gemäß DGUV Vorschrift 11 bzw. 12 (bzw. früher BGV B2 und VBG 93 bzw. GUV-VB 2 und GUV 2.20) schriftlich zu bestellen. Die Aufgaben waren schon immer die Unterstützung des Unternehmers bei der Auswahl der Schutzmaßnahmen und die Überwachung des sicheren Laserbetriebs. Eine Pflichtenübertragung war bisher empfohlen, sowie die Teilnahme an einem Lehrgang gemäß Anhang 3 DGUV Vorschrift 11 bzw. 12.

Nach Inkrafttreten der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) im Jahre 2010 und deren zuletzt erfolgter Änderung vom 18.10.2017, ist Folgendes festzustellen:

Aufgaben der Laserschutzbeauftragten

Der Laserschutzbeauftragte unterstützt den Arbeitgeber bei der Durchführung der Gefährdungsbeurteilung und der notwendigen Schutzmaßnahmen. Außerdem unterstützt er den Arbeitgeber bei der Überwachung des sicheren Betriebs von Lasern der Klassen 3R, 3B und 4.

Durch die aktuelle Fassung von § 5 Absatz 2 der OStrV wird bezüglich der Aufgaben des Laserschutzbeauftragten klar zum Ausdruck gebracht, dass es sich bei der Überwachung des sicheren Betriebs von Lasern der Klassen 3R, 3B und 4 um eine Unterstützung des Arbeitgebers bei dieser Aufgabe handelt. Gleichwohl kann der Arbeitgeber im Rahmen der Bestellung dem Laserschutzbeauftragten zur Erfüllung seiner Aufgaben Befugnisse übertragen, die dann wiederum mit einer Verantwortung verbunden sein können.

Diese innerbetriebliche Befugnisübertragung muss insbesondere unter Berücksichtigung des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) [14] erfolgen, wobei neben den Aufgaben insbesondere der Zuständigkeitsbereich – eventuell auch der innerbetriebliche Entscheidungsbereich – und die Rahmenbedingungen sowohl zu definieren als auch festzulegen sind. Dies sollte in einem entsprechenden Bestellungsschreiben erfolgen.

Nach § 13 ArbSchG „kann der Arbeitgeber zuverlässige und fachkundige Personen schriftlich damit beauftragen, ihm obliegende Aufgaben in eigener Verantwortung wahrzunehmen“ [14]. Eine Pflichtenübertragung kann auch nach § 13 der DGUV Vorschrift 1 [30] erfolgen.

Bei der „Übertragung von Aufgaben auf Beschäftigte hat der Arbeitgeber nach § 7 ArbSchG je nach Art der Tätigkeiten zu berücksichtigen, ob die Beschäftigten befähigt sind, die für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz bei der Aufgabenerfüllung zu beachtenden Bestimmungen und Maßnahmen einzuhalten“ [14].

Zu den wichtigen Elementen der betrieblichen Überwachung gehören insbesondere Anweisungen, Kontrollen, Instandhaltung, Freigabeverfahren und Kommunikation. Regelmäßige Begehungen des Arbeitsbereiches durch den Arbeitgeber oder seine verantwortlichen Personen (gegebenenfalls auch durch den Laserschutzbeauftragten) sind ein wichtiger Bestandteil der Überwachung des sicheren Betriebs.

Anzahl der Laserschutzbeauftragten

Die erforderliche Anzahl der Laserschutzbeauftragten ist in der OStrV und TROS Laserstrahlung nicht näher definiert.

Folgende Punkte sollten bei der Ermittlung der erforderlichen Anzahl der LSBen berücksichtigt werden:

- Aufgabenstellung (z. B. wechselnde Aufbauten; häufige Justierung; Einsatz von Fremdfirmen; unterschiedliche Fachbereiche in Krankenhäusern)

- Schichtarbeit
- Gefährdung durch die Lasereinrichtung (z. B. hohe Leistung (kW), Strahlengang nicht sichtbar)
- Mehrere Standorte
- Anzahl der Lasereinrichtungen.

Es kann sinnvoll sein, mehrere Laserschutzbeauftragte zu bestellen, um beispielsweise im Falle einer längeren Abwesenheit den sicheren Betrieb der Lasereinrichtungen zu gewährleisten.

Stellung der Laserschutzbeauftragten

Es wird empfohlen, dass die Stellung des Laserschutzbeauftragten arbeitsvertraglich geregelt wird. Dabei sollten die Rechte und Pflichten bestimmt und Befugnisse (ggf. das Recht zum Erteilen von Anweisungen an Bedienpersonal und Dritte) schriftlich festgelegt werden. Dem Laserschutzbeauftragten muss die für die Erfüllung seiner Aufgaben erforderliche Zeit eingeräumt werden.

Qualifikation der Laserschutzbeauftragten

Der LSB muss die für den jeweiligen Anwendungsbereich erforderlichen Fachkenntnisse besitzen.

Die Weiterbildung ist zu gewährleisten. Es wird empfohlen spätestens nach fünf Jahren die Fachkenntnisse durch die Teilnahme an entsprechenden Kursen und Veranstaltungen (mind. 6 Lehreinheiten) zu aktualisieren. Laserschutzbeauftragte, die nach DGUV Vorschrift 11 (BGV B2) bzw. 12 (GUV-V B2) ausgebildet wurden, sind ebenfalls durch entsprechende Weiterbildungskurse zu qualifizieren.

Näheres zu den Anforderungen und Aufgaben des LSB steht in der TROS Laserstrahlung Teil „Allgemeines“ Abschnitt 5.1.

Kurse für Laserschutzbeauftragte nach der TROS Laserstrahlung

Zulassung der Kursveranstalter

Gemäß OStrV (Stand 18.10.2017) ist eine individuelle Zulassung der Kursveranstalter für die Durchführung von Kursen zum LSB durch die zuständige Stelle (z. B. zuständige Behörde bzw. Unfallversicherungsträger) nicht vorgesehen.

Grundlage für die zu vermittelnden Kenntnisse und die Durchführung von Prüfungen am Lehrgangsende sind die in der TROS Laserstrahlung beschriebenen Inhalte. Der Arbeitgeber hat über die Auswahl des Kursanbieters sicherzustellen, dass die für seine Lasereinrichtungen notwendigen Kenntnisse dem LSB vermittelt werden.

Es wird empfohlen Kurse (bezogen auf Deutschland) zu belegen, die auch die Anforderungen des DGUV Grundsatzes 303-005 erfüllen.

6.5 Erläuterung zum Begriff: Stand der Technik

Stand der Technik in Bezug auf entsprechend der Gefährdungsbeurteilung durchzuführende notwendige Schutzmaßnahmen hat eine exponierte Bedeutung.

Der Stand der Technik wird in § 2 Absatz der OStrV definiert als „der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind. Gleiches gilt für die Anforderungen an die Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene“.

Der Begriff „Stand der Technik“ ist in Analogie zum Begriffsglossar zu den Regelwerken der

Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung, der Gefahrstoffverordnung, der Biostoffverordnung und – in gewisser Weise auch – des Bundes-Immissionsschutzgesetzes definiert. Hierdurch ist gewährleistet, dass ein einheitlicher Maßstab bei der Anwendung der Vorschriften der Verordnung angesetzt wird. Das Anforderungsniveau bei der Generalklausel „Stand der Technik“ liegt zwischen dem Anforderungsniveau der Generalklausel „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ und dem Anforderungsniveau der Generalklausel „Stand von Wissenschaft und Technik“.

Eine etwas abweichende Definition findet sich im Handbuch der Rechtsförmlichkeit [1]. Hiernach gilt als Stand der Technik „der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der nach herrschender Auffassung führender Fachleute das Erreichen des gesetzlich vorgegebenen Zieles gesichert erscheinen lässt. Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen oder vergleichbare Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen müssen sich in der Praxis bewährt haben oder sollten – wenn dies noch nicht der Fall ist – möglichst im Betrieb mit Erfolg erprobt worden sein“ [1].

Im Recht der Europäischen Union wird auch die Formulierung „die besten verfügbaren Techniken“ verwendet. Dies entspricht weitgehend der Generalklausel „Stand der Technik“.

Die Generalklausel „Stand von Wissenschaft und Technik“ umschreibt das höchste Anforderungsniveau und wird daher in Fällen mit sehr hohem Gefährdungspotenzial verwendet. „Stand von Wissenschaft und Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlichster Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach Auffassung führender Fachleute aus Wissenschaft und Technik auf der Grundlage neuester wissenschaftlich vertretbarer Erkenntnisse im Hinblick auf das gesetzlich vorgegebene Ziel für erforderlich gehalten werden und das Erreichen dieses Ziels gesichert erscheinen lassen“ [1].

Beachtenswert ist in diesem Zusammenhang, dass z. B. § 4 so formuliert ist, dass Messungen und Berechnungen sowie die dazu notwendigen Messverfahren und –geräte dem Stand der Technik entsprechen. Durch diese Inbezugnahme des Standes der Technik wird die Anknüpfung zu den einschlägigen technischen Normen hergestellt.

Gleichzeitig wird durch die Abstützung der Durchführung der notwendigen Schutzmaßnahmen entsprechend dem Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung deutlich, dass dem Laserschutzbeauftragten die Gefährdungsbeurteilung bekannt und transparent ist, da er sonst die entsprechende Unterstützung des Arbeitgebers bei der Durchführung der Schutzmaßnahmen nicht leisten kann. Durch die am 30.11.2016 erfolgte Änderung von § 5 Absatz 2 OStrV ist dies insofern auch folgerichtig formuliert worden.

6.6 Informationsermittlung

6.6.1 Informationsquellen für die Gefährdungsbeurteilung

Hersteller, Händler und Einführer gemäß Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) bzw. Inverkehrbringer nach Medizinproduktegesetz (MPG) sind dazu verpflichtet, entsprechende Unterlagen zu liefern, die alle zum sicheren Betrieb erforderlichen Informationen enthalten.

Für den europäischen Wirtschaftsraum ist in der Regel eine Klassifizierung der Lasereinrichtung durch den Hersteller, Bevollmächtigten oder Einführer nach den aktuellen Normserien DIN EN 60825 und DIN EN ISO 11553 (bei Laser-Maschinen) erforderlich. In erster Linie geht es darum, ob im spezifischen Arbeitsumfeld ein Laserbereich entsteht. In den meisten Fällen wird es sich im Arbeitsumfeld um ortsfeste Einrichtungen handeln.

Kann ein Laserbereich entstehen bzw. wird mit nicht klassifizierten Lasern gearbeitet, werden – je nach Laserart – für die Gefährdungsbeurteilung folgende Informationen benötigt: die Angaben zur Leistung, Energie, Strahldivergenz, Impulswiederholfrequenz, Wellenlänge, Augensicherheitsabstand (nach TROS Laserstrahlung) und Laserklasse.

Für Maschinen muss eine Risikobeurteilung nach der 9. ProdSV durch den Hersteller erfolgen. Sofern diese für den Arbeitgeber verfügbar ist, kann sie bei der Gefährdungsbeurteilung berücksichtigt werden (z. B. gibt der Hersteller oft den Sicherheits-Integritätslevel (SIL) oder Performance Level (PL) bekannt).

Eine Besonderheit stellen vollständig eingehauste oder gekapselte Laser-Einrichtungen z. B.

zur Materialbearbeitung oder Beschriftung dar. Da im bestimmungsgemäßen Normalbetrieb keine Laserstrahlung nach außen dringt, werden diese Einrichtungen vom Hersteller häufig der Laserklasse 1 zugeordnet (Anm.: Klassifiziert wird nach dem „gefährlichsten Zustand“), was manchmal zu Missverständnissen führen kann.

Das bedeutet auch, dass der Anwender einen LSB braucht, wenn die Anlage nicht die T1 Prüfklasse (30 000 s) gemäß DIN EN 60825-4 erfüllt. Dies ist oft weder dem Anwender noch dem Entwickler (Hersteller) bewusst.

Bei Arbeiten, die nicht dem Normalbetrieb entsprechen (z. B. Service-, Wartungs-, Errichtungs- oder Instandsetzungsarbeiten) kann allerdings oft Laserstrahlung zugänglich bzw. mit Strahlungsgrößen umgegangen werden, die einer höheren Laserklasse entsprechen und zumeist neben den Gefährdungen durch direkte Auswirkungen auch ein großes indirektes Gefährdungspotenzial besitzen können.

Für diese Fälle ist eine gesonderte Gefährdungsbeurteilung notwendig, in deren Anschluss die Zuständigkeiten (u. a. Fremd- oder Eigenservice, Unterweisungen, Personenkreis, etc.) und die Schutzmaßnahmen für diese Tätigkeiten geregelt werden.

Grundsätzlich sind diejenigen Maßnahmen zu realisieren, die Lasern der entsprechenden höheren Klasse zugeordnet sind. Dazu muss zwischen folgenden Betriebszuständen unterschieden werden:

1. Normalbetrieb und
2. Inbetriebnahme (Ingangsetzen), Einrichten, Probetrieb, Stillsetzen, Wartung/ Pflege, Instandsetzung und Störungen/Ausfälle.

Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ist in jedem Fall festzulegen, ob Einstell- und Wartungsarbeiten in Eigenregie oder durch den Hersteller bzw. eine beauftragte Wartungsfirma durchgeführt werden. Im letzteren Fall, bei „Fremdwartung“, trägt die Wartungsfirma die Verantwortung für den Laserschutz während der Wartungsarbeiten. In der Gefährdungsbeurteilung ist festzulegen, wie die Zusammenarbeit mit dem Wartungspersonal im Einzelfall vor Ort organisiert und geregelt werden soll. Entsprechendes gilt insbesondere beim Service von Lasereinrichtungen.

Hilfreich ist für diese Fälle zum Beispiel eine tabellarische Darstellung der möglichen Betriebsarten:

Betriebsart	Funktion	Berechtigung	Laserfunktion	Lasersicherheit gegeben
Normal	Materialbearbeitung	Bediener	möglich	JA
Einrichten	Programmierung	geschulter Bediener	nicht möglich	JA
Wartung	Instandhaltung	geschulter Bediener	nicht möglich	JA
Service	Reparatur	Hersteller oder namentlich autorisierte Personen	möglich z.B. nach Umgehung der Sicherheitsfunktionen	NUR MIT PSA

6.7 Arbeitsmedizinische Vorsorge

Für Beschäftigte, die in Bereichen mit „reiner“ (ohne inkohärente Strahlungsanteile) Laserstrahlung tätig sind, sieht die Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) seit 2013 in Bezug auf die Exposition gegenüber Laserstrahlung weder eine Pflicht- noch eine Angebotsvorsorge vor, sondern nur die Wunschvorsorge vor.

Individuelle arbeitsmedizinische Vorsorge kann Unfälle nicht verhindern. Eine unmittelbare Exposition von Beschäftigten ist niemals beabsichtigt und muss durch technische und

organisatorische Schutzmaßnahmen sicher verhindert werden.

Für inkohärente optische Sekundärstrahlung (z. B. durch Lasermaterialbearbeitung oder Pumpquellen) sind die entsprechenden Ausführungen in der TROS IOS Teil 1, Abschnitt 5 zu beachten.

Der Arbeitgeber hat Beschäftigten nach § 11 ArbSchG bzw. § 5a ArbMedVV arbeitsmedizinische Vorsorge zu ermöglichen, sofern ein Gesundheitsschaden im Zusammenhang mit der Tätigkeit nicht ausgeschlossen werden kann (Wunschvorsorge).

Arbeitsmedizinische Vorsorge bezüglich inkohärenter optischer Strahlung beim Einsatz von Lasern:

Bei vielen Lasern wird neben der kohärenten optischen Strahlung auch inkohärente optische Strahlung z. B. als Anregungsstrahlung oder bei der Vorionisierung durch UV-Quellen oder bei dem Auftreffen des Laserstrahls auf das Material (z. B. Schweißprozess) emittiert. Hierbei werden bei offenem Betrieb dieser Laser auch die EGW der inkohärenten optischen Strahlung in einer entsprechenden Entfernung überschritten. Ohne Rücksicht auf das Tragen der PSA ist deshalb bei Tätigkeiten an offenen Materialbearbeitungsanlagen und UV-Lasern von einer Expositionsgrenzwertüberschreitung für inkohärente optische Strahlung auszugehen und somit die Pflichtvorsorge erforderlich. Dies trifft nicht zu, wenn der Fachkundige oder der Hersteller hierzu eine eindeutige Aussage trifft, dass die EGW für inkohärente optische Strahlung eingehalten werden, wie dies typischerweise z. B. bei Messlasern der Fall ist.

Anmerkung:

DGUV I 250 (G17) – Handlungsanleitung für arbeitsmedizinische Untersuchungen nach dem DGUV Grundsatz G17 „Künstliche optische Strahlung“

6.8 Allgemeine arbeitsmedizinische Beratung

Der Arbeitgeber hat eine allgemeine arbeitsmedizinische Beratung der betroffenen Beschäftigten sicherzustellen, wenn die Expositionsgrenzwerte nach Abschnitt 5 der TROS Laserstrahlung, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ überschritten werden können. Diese Beratung, die im Rahmen der Unterweisung erfolgen soll, ist zu unterscheiden von der individuellen Beratung, die Bestandteil der arbeitsmedizinischen Vorsorge ist. Die allgemeine Beratung ist immer dann unter Beteiligung des Betriebsarztes durchzuführen, wenn dies aus arbeitsmedizinischen Gründen erforderlich ist.

6.9 Unterweisung der Beschäftigten

Die Unterweisung der Beschäftigten nach § 8 OStrV ist auf Basis der Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Sie ist erforderlich, wenn Gefährdungen für Sicherheit und Gesundheit, auch solche durch indirekte Gefährdungen, möglich sind. Hierbei ist auch das mögliche Fehlverhalten des Bedieners zu berücksichtigen, z. B. beim Abschrauben der Einhausung oder Abdeckung an einer Maschine oder an einem Laser. Die Unterweisung hat das Ziel, die Beschäftigten über die Gefährdungen durch direkte und indirekte Gefährdungen der Laserstrahlung zu informieren und sie mit den vorhandenen Sicherheitseinrichtungen und mit den erforderlichen Schutzmaßnahmen im Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung vertraut zu machen, damit Gesundheitsschäden durch Laserstrahlung verhindert und Beeinträchtigungen durch vorübergehende Blendung bei sichtbarer Laserstrahlung möglichst geringgehalten werden. Den Beschäftigten wird aufgezeigt, worin die Gefährdungen bestehen, wie die Laserstrahlung in Bezug auf die Expositionsgrenzwerte einzuschätzen ist, welche Maßnahmen ergriffen wurden und wie sie an deren Umsetzung mitwirken können. Die ordnungsgemäße Handhabung der Laser-Einrichtung kann zur Verringerung der Exposition beitragen. In diesem Zusammenhang sind z. B. erforderliche Verhaltens- und Handlungsweisen zu erklären.

Im Hinblick auf die Gefährdungen durch Laserstrahlung bei Lasern der Klasse 3R, 3B oder 4 unterstützt der LSB den Arbeitgeber bei der Unterweisung. Er kooperiert mit der Fachkraft für Arbeitssicherheit, dem Betriebsarzt und ggf. weiteren Beauftragten.

Die Unterweisung ist vor Aufnahme der gefährdenden Tätigkeit, z. B. nach der Einstellung oder Versetzung bzw. vor der ersten Inbetriebnahme der Laseranlage sowie mindestens einmal jährlich durchzuführen. Sie ist in einer für die Beschäftigten verständlichen Form und Sprache durchzuführen. Vor wesentlichen Änderungen der Arbeitsbedingungen und Expositionssituationen hat der Arbeitgeber die Beschäftigten über die neue Gefährdungssituation zu unterweisen. An Laserarbeitsplätzen können solche Anlässe sein:

- Änderung der Laserklasse (z. B. Erhöhung der Laserleistung);
- Gefährdungen durch neue Arbeitsverfahren, bzw. geänderte Anwendung;
- Inbetriebnahme einer neuen Laseranlage mit anderer Wellenlänge;
- (Beinahe-)Unfallgeschehen.

Anmerkung:

Kürzere Unterweisungsintervalle können sich auch aus speziellen Arbeitsschutzvorschriften ergeben, z. B. § 29 JArbSchG, das eine halbjährliche Unterweisung fordert.

Entsprechend der Gefährdungsbeurteilung können folgende Punkte darüber hinaus erforderlich sein:

- die Eigenschaften der Laserstrahlung,
- die Art der Gefährdung und Möglichkeit der Schädigungen von Haut und Augen durch Laserstrahlung,
- die Expositionsgrenzwerte und ihre Bedeutung,
- die tatsächlich ermittelten Expositionswerte zusammen mit der Bewertung der damit verbundenen Gefährdungen (direkte Gefährdung durch Laserstrahlung an einer Laseranlage), u. a. Wirkung der Laserstrahlung auf Auge und Haut, mögliche Verletzungen und Verletzungsfolgen,
- die Möglichkeit der vorübergehenden Blendung durch sichtbare Laserstrahlung und deren indirekte Auswirkungen,
- Gefährdungen durch indirekte Gefährdungen der Laserstrahlung wie lasergenerierte Schadstoffe (auch durch optische Komponenten wie ZnSe-Linsen), Zündung explosionsfähiger Atmosphären und explosionsgefährlicher Stoffe, Brandgefahr und Sekundärstrahlung,
- die festgelegten Maßnahmen zur Beseitigung oder zur Minimierung der Gefährdung unter Berücksichtigung der Arbeitsplatzbedingungen,
- die bestimmungsgemäße Verwendung der persönlichen Schutzausrüstungen und ggf. anderer individueller Maßnahmen, erforderlichenfalls ergänzt durch eine Schulung in der Benutzung,
- Verhalten im Laserbereich bei Normalbetrieb, insbesondere mögliches Fehlverhalten, wie das Abschrauben der Einhausung oder Abdeckung an einer Laser-Einrichtung,
- Verhalten im Laserbereich bei Service- und Wartungsarbeiten,
- Verhalten bei Unfällen im Laserbereich (Liste der potentiellen Notsituationen und Beschreibung der zugehörigen Rettungs-/Räumungsmaßnahmen, vorsorgliche Einweisung für Ersthelfer und Rettungskräfte),
- Voraussetzungen, unter denen die Beschäftigten Anspruch auf arbeitsmedizinische Vorsorge haben, und deren Zweck,
- die bestimmungsgemäße Handhabung der Arbeitsmittel und sichere Arbeitsverfahren zur Minimierung der Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung,
- Hinweise zur Erkennung und Meldung möglicher Gesundheitsschäden,
- Hinweise zu Wirkungen von Medikamenten, Kosmetika und Gefahrstoffen (z. B. photosensibilisierende Effekte).

Sonderfall Arbeitnehmerüberlassung

Liegt ein Fall von Arbeitnehmerüberlassung vor, trifft die Pflicht zur betriebspezifischen Unterweisung gemäß § 12 ArbSchG den Entleiher. Er hat den Beschäftigten, der ihm zur Arbeitsleistung überlassen wurde, über die mit der konkreten Tätigkeit verbundenen Gefährdungen zu unterweisen. Die sonstigen Arbeitsschutzpflichten des Verleihers als Arbeitgeber, insbesondere die Pflicht zur allgemeinen Unterweisung (unabhängig vom konkreten Arbeitsplatz oder Aufgabenbereich), bleiben unberührt.

Halten sich Personen nur kurzzeitig und in Begleitung einer selbst in Lasersicherheit geschulten Person in Laserbereichen auf, z. B. im Rahmen einer Führung, so reicht eine Kurzunterweisung der Personen aus. Hierbei ist insbesondere auf das Verhalten im Laserbereich und die Pflicht zum Tragen der persönlichen Schutzausrüstung einzugehen. Dies sollte trotzdem durch eine Unterschrift belegbar sein.

Halten sich betriebsfremde Personen zum Zwecke der Dienstleistungserbringung im laufenden Betrieb in Laserbereichen auf (Reinigungspersonal, Handwerker, Sicherheitspersonal), so ist eine für die Tätigkeit notwendige Unterweisung durchzuführen.

6.10 Dokumentation

Die Gefährdungsbeurteilung zu Laserstrahlung am Arbeitsplatz ist unabhängig von der Zahl der Beschäftigten zu dokumentieren. Dabei sind anzugeben:

- Bezeichnung und Beschreibung der Tätigkeit oder des Arbeitsplatzes bzw. des Arbeitsbereiches mit den Expositionsbedingungen, für die die Gefährdungsbeurteilung durchgeführt wurde,
- die am Arbeitsplatz vorhandenen tatsächlichen oder möglichen Gefährdungen,
- die Ergebnisse der durchgeführten Ermittlungen (z. B. Herstellerinformationen, vorhandene Expositionsdaten),
- die Ergebnisse der gegebenenfalls durchgeführten Messungen und Berechnungen,
- das Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung und
- die notwendigen Maßnahmen zur Vermeidung oder Minimierung der Gefährdung, einschließlich des Ergebnisses der Überprüfung der Wirksamkeit dieser Maßnahmen.

Dabei ist es notwendig, insbesondere die folgenden Punkte in der Dokumentation festzuhalten:

1. Beschreibung der Expositionsbedingungen (insbesondere Dauer, Abstand) Anm.: wurden Messungen durchgeführt, so sollten auch die verwendeten Messmittel sowie die Kalibrierung u.s.w. aufgeführt werden;
2. Lasertyp;
3. Laserklasse (die Bezeichnung der Norm und das Datum der Veröffentlichung);
4. Wellenlänge(n);
5. Leistung und Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte);
6. Impulswiederholfrequenz;
7. Sicherheitsabstände, Laserbereich;
8. Schutzmaßnahmen: Laser-Schutzeinhausung, Laser-Schutzbrillen-Schutzstufe, Laser-Justierbrillen-Schutzstufe, Unterweisung, Kennzeichnungen;
9. LSB.

Wird mit Lasern im Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 400 nm gearbeitet oder tritt infolge von Laserbearbeitungsprozessen relevante sekundäre UV-Strahlung auf, hat der Arbeitgeber die ermittelten Ergebnisse aus Messungen und Berechnungen der Expositionen durch UV-Strahlung in einer Form aufzubewahren, die eine spätere Einsichtnahme ermöglicht. Die Aufbewahrungsfrist für diese Dokumente beträgt 30 Jahre.

Die Dokumentation ist so auszuführen, dass sie jederzeit technisch nachvollziehbar ist.

7 Expositionsgrenzwerte

7.1 Allgemeines

Die Expositionsgrenzwerte gemäß der OStrV sind in den jeweils aktuellen technischen Regeln festgehalten. Die Expositionsgrenzwerte wurden europäisch auf Basis der Empfehlungen der ICNIRP (1996; 2000) [10, 11] festgelegt. Sie sollen für die Beschäftigten gewährleisten, dass es bei Einhaltung dieser Expositionsgrenzwerte nicht zu einer Gesundheitsschädigung kommen kann. Besondere Personengruppen (siehe TROS IOS und TROS Laserstrahlung) wurden hierbei nicht berücksichtigt. Die Festlegung und Bestimmung dieser Grenzwerte erfolgte aufgrund einer Vielzahl von Veröffentlichungen zu biologischen Wirkungen bei der Einwirkung von Laserstrahlung. Hierbei wurde früher ein multiplikativer Sicherheitsfaktor in der Größenordnung von 10 zu den Schädigungswerten berücksichtigt. Die Wellenlängenbereiche und das darin vorwiegend gefährdete Organ sowie die dabei vorherrschende Gefährdung sind in Tabelle 5 aufgelistet.

7.2 Expositionsgrenzwerte gemäß TROS Laserstrahlung Teil 2

Die biophysikalisch relevanten Expositionswerte für optische Strahlung lassen sich anhand der nachstehenden Formeln bestimmen. Welche Formel zu verwenden ist, hängt von der Wellenlänge und der Dauer der von der Quelle ausgehenden Strahlung ab; die Ergebnisse sind mit den entsprechenden Expositionsgrenzwerten (EGW) der Tabellen 6 bis 8 zu vergleichen. Für die jeweilige Laserstrahlungsquelle können mehrere Expositionswerte und entsprechende Expositionsgrenzwerte relevant sein.

Die in den Tabellen 6 bis 8 als Berechnungsfaktoren verwendeten Koeffizienten sind in Tabelle 9, die Korrekturfaktoren für wiederholte Exposition sind in Tabelle 10 aufgeführt.

$$E = \frac{dP}{dA} \quad [W \cdot m^{-2}]$$

$$H = \int_0^t E(t) \cdot dt \quad [J \cdot m^{-2}]$$

Anmerkungen:

dP	<i>Leistung</i> , ausgedrückt in Watt [W];
dA	<i>Fläche</i> , ausgedrückt in Quadratmetern [m ²];
E(t), E	<i>Bestrahlungsstärke oder Leistungsdichte</i> : die auf eine Fläche einfallende Strahlungsleistung je Flächeneinheit, üblicherweise ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter [W·m ⁻²]; die Werte E(t) und E werden berechnet oder können vom Hersteller der Arbeitsmittel angegeben werden;
H	<i>Bestrahlung</i> : das Integral der Bestrahlungsstärke über die Zeit, ausgedrückt in Joule pro Quadratmeter [J·m ⁻²];
t	<i>Zeit, Dauer der Exposition</i> , ausgedrückt in Sekunden [s];
λ	<i>Wellenlänge</i> , ausgedrückt in Nanometern [nm];
γ	<i>Grenzempfangswinkel</i> , ausgedrückt in Milliradian [mrad];
γ _m	<i>Messempfangswinkel</i> , ausgedrückt in Milliradian [mrad];
α	<i>Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle</i> , ausgedrückt in Milliradian [mrad]; <i>Grenzblende</i> : die kreisförmige Fläche, über die Bestrahlungsstärke und Bestrahlung gemittelt werden;
G	<i>integrierte Strahldichte</i> : das Integral der Strahldichte über eine bestimmte Expositionsdauer, ausgedrückt als Strahlungsenergie je Flächeneinheit einer Abstrahlfläche je Einheitsraumwinkel der Emission, ausgedrückt in Joule pro Quadratmeter pro Steradian [J·m ⁻² ·sr ⁻¹].

Tabelle 5: Strahlungsgefährdung

Wellenlänge λ [nm]	Strahlungsbereich	Betroffenes Organ	Gefährdung
100 bis 400	UV	Auge	Photochemische Schädigung und thermische Schädigung
180 bis 400	UV	Haut	Erythem
400 bis 700	sichtbar	Auge	Netzhautschädigung
400 bis 600	sichtbar	Auge	Photochemische Schädigung
400 bis 700	sichtbar	Haut	Thermische Schädigung
700 bis 1 400	IR-A	Auge	Thermische Schädigung
700 bis 1 400	IR-A	Haut	Thermische Schädigung
1 400 bis 2 600	IR-B	Auge	Thermische Schädigung
2 600 bis 10^6	IR-C	Auge	Thermische Schädigung
1 400 bis 10^6	IR-B, IR-C	Auge	Thermische Schädigung
1 400 bis 10^6	IR-B, IR-C	Haut	Thermische Schädigung

Tabelle 6: Grenzwerte für die Exposition des Auges gegenüber Laserstrahlen - Kurze Expositionsdauer < 10 s

Wellenlänge [nm]		Öffnung	Dauer [s]											
			$10^{-13} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^1$					
UV-C	¹⁰⁰ - 280	1 mm für $t < 0,35$ s; $1,5 \cdot t^{0,375}$ für $0,35 < t < 10$ s	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ W m}^{-2}$ Siehe Fußnote ^c						$H = 30 \text{ J m}^{-2}$					
UV-B	280 - 302								$H = 40 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 2,6 \cdot 10^{-9}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	303								$H = 60 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 1,3 \cdot 10^{-8}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	304								$H = 100 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 1,0 \cdot 10^{-7}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	305								$H = 160 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 6,7 \cdot 10^{-7}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	306								$H = 250 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 4,0 \cdot 10^{-6}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	307								$H = 400 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 2,6 \cdot 10^{-5}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	308								$H = 630 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 1,6 \cdot 10^{-4}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	309								$H = 10^3 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 1,0 \cdot 10^{-3}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	310								$H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 6,7 \cdot 10^{-3}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
	311								$H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d		wenn $t < 4,0 \cdot 10^{-2}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe			
312	$H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d								wenn $t < 2,6 \cdot 10^{-1}$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe					
313	$H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$; Fußnote ^d								wenn $t < 1,6 \cdot 10^0$ dann $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ Siehe					
314									$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$					
UV-A	315 - 400	7 mm	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_E$ J m^{-2}		$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_E$ J m^{-2}		$H = 5 \cdot 10^{-3} C_E \text{ J m}^{-2}$		$H = 18 \cdot t^{0,75} C_E \text{ J m}^{-2}$					
Sichtbar und IR-A	400 - 700		$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_A C_E$ J m^{-2}		$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_A C_E$ J m^{-2}		$H = 5 \cdot 10^{-3} C_A C_E \text{ J m}^{-2}$		$H = 18 \cdot t^{0,75} C_A C_E \text{ J m}^{-2}$					
	700 - 1 050													

Wellenlänge [nm]		Öffnung	Dauer [s]					
			$10^{-13} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$
	1 050- 1 400		$H = 1,5 \cdot 10^{-3} C_C C_E$ $J m^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^5 t^{0,75} C_C C_E$ $J m^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-2} C_C C_E J m^{-2}$			$H = 90 \cdot t^{0,75} C_C C_E J m^{-2}$
IR-B und IR-C	1 400 - 1 500	S. Fußnote ^b	$E = 10^{12} W m^{-2}$	Siehe Fußnote ^c	$H = 10^3 J m^{-2}$			$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ $J m^{-2}$
	1 500 - 1 800		$E = 10^{13} W m^{-2}$	Siehe Fußnote ^c	$H = 10^4 J m^{-2}$			
	1 800 - 2 600		$E = 10^{12} W m^{-2}$	Siehe Fußnote ^c	$H = 10^3 J m^{-2}$			$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ $J m^{-2}$
	$2 600 - 10^6$		$E = 10^{11} W m^{-2}$	Siehe Fußnote ^c	$H = 100 J m^{-2}$	$H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25} J m^{-2}$		

^a Wird die Wellenlänge des Lasers von zwei Grenzwerten erfasst, so gilt der strengere Wert.

^b Wenn $1\,400 \leq \lambda < 10^5$ nm: Öffnungsdurchmesser = 1 mm bei $t \leq 0,35$ s und $1,5 t^{0,375}$ mm bei $0,35$ s < $t < 10$ s; wenn $10^5 \leq \lambda < 10^6$ nm: Öffnungsdurchmesser = 11 mm.

^c Mangels Daten für diese Impulslängen empfiehlt die ICNIRP, als Grenzwert für die Bestrahlungsstärke 1 ns zu verwenden.

^d Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für einzelne Laserimpulse. Bei mehrfachen Laserimpulsen müssen die Laserimpulsdauern von Impulsen, die innerhalb eines Intervalls T_{\min} (siehe Tabelle 10) liegen, aufaddiert werden, und der daraus resultierende Zeitwert muss in der Formel $5,6 \cdot 10^3 t^{0,25}$ für t eingesetzt werden.

Tabelle 7: Grenzwerte für die Exposition des Auges gegenüber Laserstrahlen - Lange Expositionsdauer ≥ 10 s

Wellenlänge ^a [nm]		Öffnung	Dauer [s]		
			$10^1 - 10^2$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 3 \cdot 10^4$
UV-C	100 - 280	3,5 mm	$H = 30 \text{ J m}^{-2}$		
	280 - 302				
	303		$H = 40 \text{ J m}^{-2}$		
	304		$H = 60 \text{ J m}^{-2}$		
	305		$H = 100 \text{ J m}^{-2}$		
	306		$H = 160 \text{ J m}^{-2}$		
	307		$H = 250 \text{ J m}^{-2}$		
	308		$H = 400 \text{ J m}^{-2}$		
	309		$H = 630 \text{ J m}^{-2}$		
	310		$H = 1,0 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	311		$H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	312		$H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	313		$H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
	314		$H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-2}$		
UV-A	315 - 400		$H = 10^4 \text{ J m}^{-2}$		
Sichtbar 400 - 700	400 - 600 Photochemisch ^b Netzhautschädigung	7 mm	$H = 100 C_B$ J m^{-2} $(\gamma = 11 \text{ mrad})^d$	$E = 1 C_B \text{ W m}^{-2}; (\gamma = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad})^d$	
	400 - 700 Thermisch ^b Netzhautschädigung		wenn $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$ dann $E = 10 \text{ W m}^{-2}$ wenn $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ und $t \leq T_2$ dann $H = 18 C_E t^{0,75} \text{ J m}^{-2}$ wenn $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ und $t > T_2$ dann $E = 18 C_E T_2^{-0,25} \text{ W m}^{-2}$		
IR-A	700 - 1 400	7 mm	wenn $\alpha < 1,5 \text{ mrad}$ dann $E = 10 C_A C_C \text{ W m}^{-2}$ wenn $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ und $t \leq T_2$ dann $H = 18 C_A C_C C_E t^{0,75} \text{ J m}^{-2}$ wenn $\alpha > 1,5 \text{ mrad}$ und $t > T_2$ dann $E = 18 C_A C_C C_E T_2^{-0,25} \text{ W m}^{-2}$ (maximal $1\,000 \text{ W m}^{-2}$)		
IR-B und IR-C	$1\,400 - 10^6$	siehe ^c	$E = 1\,000 \text{ W m}^{-2}$ Empfehlung für große Strahldurchmesser ab 10 mm und für lange Zeiten sollten $E_{\text{red}} = 100 \text{ W m}^{-2}$ nicht überschritten werden können.		

- a Wird die Wellenlänge oder eine andere Gegebenheit des Lasers von zwei Grenzwerten erfasst, so gilt der strengere Wert.
- b Bei kleinen Quellen mit einem Öffnungswinkel von 1,5 mrad oder weniger sind die beiden Grenzwerte für sichtbare Strahlung E von 400 nm bis 600 nm zu reduzieren auf die thermischen Grenzwerte für $10\text{ s} \leq t < T_1$ und auf die photochemischen Grenzwerte für längere Zeiten. Zu T_1 und T_2 siehe Tabelle 9. Der Grenzwert für photochemische Netzhautgefährdung kann auch ausgedrückt werden als Integral der Strahldichte über die Zeit $G = 10^6 C_B [\text{J m}^{-2} \text{sr}^{-1}]$, wobei Folgendes gilt: $t > 10\text{ s}$ bis zu $t = 10000\text{ s}$ und $L = 100 C_B [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}]$ bei $t > 10000\text{ s}$. Zur Messung von G und L ist γ_m als Mittelung des Gesichtsfelds zu verwenden. Die offizielle Grenze zwischen sichtbar und Infrarot ist 780 nm (entsprechend der Definition der CIE). Die Spalte mit den Bezeichnungen für die Wellenlängenbänder dient lediglich der besseren Übersicht. (Die Bezeichnung G wird vom CEN verwendet, die Bezeichnung L_t von der CIE und die Bezeichnung L_p von der IEC und dem CENELEC.)
- c Für die Wellenlänge 1400 nm - 10^5 nm: Öffnungsdurchmesser = 3,5 mm; für die Wellenlänge 10^5 nm - 10^6 nm: Öffnungsdurchmesser = 11 mm.
- d Für Messungen des Expositionswertes ist γ wie folgt zu berücksichtigen: Wenn α (Öffnungswinkel einer Quelle) $> \gamma$ (Grenzkegelwinkel, in eckigen Klammern in der entsprechenden Spalte angegeben), dann sollte das Messgesichtsfeld γ_m den Wert γ erhalten. (Bei Verwendung eines größeren Messgesichtsfelds würde die Gefährdung zu hoch angesetzt.) Wenn $\alpha < \gamma$, dann muss das Messgesichtsfeld γ_m groß genug sein, um die Quelle einzuschließen; es ist ansonsten jedoch nicht beschränkt und kann größer sein als γ .

Tabelle 8: Grenzwerte für die Exposition der Haut gegenüber Laserstrahlen

Wellenlänge ^a [nm]		Öffnung	Dauer [s]					
			$< 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^1$	$10^1 - 10^3$	$10^3 - 3 \cdot 10^4$
UV (A, B, C)	100 - 400	3,5 mm	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ W m}^{-2}$	Gleiche Werte wie Expositionsgrenzwerte für das Auge				
	Sicht- bar und IR-A		400 - 700	$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ W m}^{-2}$	$H=200 C_A$ J m^{-2}	$H = 1,1 \cdot 10^4 C_A t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$	$E = 2 \cdot 10^3 C_A \text{ W m}^{-2}$	
700 - 1 400			$E = 2 \cdot 10^{11} C_A \text{ W m}^{-2}$					
IR-B und IR-C	1 400 - 1 500		$E = 10^{12} \text{ W m}^{-2}$	Gleiche Werte wie Expositionsgrenzwerte für das Auge				
	1 500 - 1 800		$E = 10^{13} \text{ W m}^{-2}$					
	1 800 - 2 600		$E = 10^{12} \text{ W m}^{-2}$					
	2 600 - 10^6		$E = 10^{11} \text{ W m}^{-2}$					

- a Wird die Wellenlänge oder eine andere Gegebenheit des Lasers von zwei Grenzwerten erfasst, so gilt der strengere Wert.

Tabelle 9: Korrekturfaktoren und sonstige Berechnungsparameter

Parameter nach ICNIRP	Gültiger Spektralbereich [nm]	Wert
C _A	$\lambda < 700$	C _A = 1,0
	700 – 1 050	C _A = 10 ^{0,002·(λ - 700)}
	1 050 – 1 400	C _A = 5,0
C _B	400 – 450	C _B = 1,0
	450 – 700	C _B = 10 ^{0,02·(λ - 450)}
C _C	700 – 1 150	C _C = 1,0
	1 150 – 1 200	C _C = 10 ^{0,018·(λ - 1150)}
	1 200 – 1 400	C _C = 8,0
T ₁	$\lambda < 450$	T ₁ = 10 s
	450 – 500	T ₁ = 10 · 10 ^{0,02 (λ - 450)} s
	$\lambda > 500$	T ₁ = 100 s
Parameter nach ICNIRP	Biologische Wirkung	Wert
α _{min}	alle thermischen Wirkungen	α _{min} = 1,5 mrad
Parameter nach ICNIRP	Gültiger Winkelbereich [mrad]	Wert
C _E	$\alpha < \alpha_{\min}$	C _E = 1,0
	$\alpha_{\min} < \alpha \leq 100$	C _E = α / α _{min}
	$\alpha > 100$	C _E = α _{max} / α _{min} bei α _{max} = 100 mrad
T ₂	$\alpha < 1,5$	T ₂ = 10 s
	1,5 < α < 100	T ₂ = 10 · 10 ^[(α - 1,5) / 98,5] s
	$\alpha > 100$	T ₂ = 100 s
Parameter nach ICNIRP	Gültige Expositionsdauer [s]	Wert
γ	t ≤ 100	γ = 11 mrad
	100 < t < 10 ⁴	γ = 1,1 · t ^{0,5} mrad
	t > 10 ⁴	γ = 110 mrad

Bei der Berechnung der Expositionsgrenzwerte bei wiederholt gepulster oder modulierter Laserstrahlung ist jede der drei folgenden allgemeinen Regeln anzuwenden, die auftreten:

1. Die Exposition gegenüber jedem einzelnen Impuls einer Impulsfolge darf den Expositionsgrenzwert für einen Einzelimpuls dieser Impulsdauer nicht überschreiten.
2. Die Exposition gegenüber einer Impulsgruppe (oder einer Untergruppe von Impulsen in einer Impulsfolge) innerhalb des Zeitraums t darf den Expositionsgrenzwert für die Zeit t nicht überschreiten.
3. Die Exposition gegenüber jedem einzelnen Impuls in einer Impulsgruppe darf den Expositionsgrenzwert für den Einzelimpuls, multipliziert mit einem für die kumulierte thermische Wirkung geltenden Korrekturfaktor $C_p = N^{-0,25}$ nicht überschreiten (wobei N die Zahl der Impulse ist). Diese Regel gilt nur für Expositionsgrenzwerte zum Schutz gegen thermische Schädigung, wobei alle in weniger als T_{min} erzeugten Impulse als einzelner Impuls behandelt werden.

Tabelle 10: Parameter

Parameter	Gültiger Spektralbereich (nm)	Wert
T_{min}	$315 < \lambda \leq 400$	$T_{min} = 10^{-9} \text{ s} (= 1 \text{ ns})$
	$400 < \lambda \leq 1\ 050$	$T_{min} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ s} (= 18 \text{ } \mu\text{s})$
	$1\ 050 < \lambda \leq 1\ 400$	$T_{min} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ s} (= 50 \text{ } \mu\text{s})$
	$1\ 400 < \lambda \leq 1\ 500$	$T_{min} = 10^{-3} \text{ s} (= 1 \text{ ms})$
	$1\ 500 < \lambda \leq 1\ 800$	$T_{min} = 10 \text{ s}$
	$1\ 800 < \lambda \leq 2\ 600$	$T_{min} = 10^{-3} \text{ s} (= 1 \text{ ms})$
	$2\ 600 < \lambda \leq 10^6$	$T_{min} = 10^{-7} \text{ s} (= 100 \text{ ns})$

8 Klasseneinteilung

8.1 Laserklassen

Die Definition der Laserklassen ist insbesondere für die Gefährdungsbeurteilung wichtig.

Laser wurden und werden je nach Datum ihrer Herstellung entsprechend den zum Zeitpunkt der Bereitstellung auf dem Markt anzuwendenden technischen Anforderungen klassifiziert.

Das Klassifizierungssystem hat sich in der Vergangenheit mehrfach geändert. Dies ist bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen. Ein Beispiel ist die Laserklasse 3A, die für seit 2004 neu auf dem Markt bereitgestellte Laser keine Anwendung mehr findet.

Laserprodukte wurden in den letzten Jahren in der Regel gemäß DIN EN 60825-1:2008-05 (die Übergangsfrist für neue Produkte endete am 19.06.2019) oder nach der DIN EN 60825-1:2015-07 klassifiziert.

Nach den Regelungen zur Produktsicherheit ist es auch möglich, dass ein nicht nach der obigen Norm klassifizierter Laser vorliegt (z. B. ein Prototyp). Dann sind die Vorgaben des Herstellers zu beachten. Nicht klassifizierte Entwicklungsmuster und Prototypen sind in Anlehnung an die entsprechenden Laserklassen zu betrachten.

Eine Verpflichtung zur Klassifizierung von verwendungsfertigen Laser-Einrichtungen bestand gemäß BGV B2 / GUV-VB 2 bzw. VBG 93/GUV 2.20 „Laserstrahlung“ seit 1988.

Die im Folgenden aufgeführten Erläuterungen geben eine Hilfestellung zu den Definitionen der Laserklassen nach DIN EN 60825-1 nach Ausgabe 2008 oder früher.

Erläuterungen zu den Laserklassen gemäß DIN EN 60825-1:2008-05 und Ergänzungen zur früheren Laserklasse 3A

Allgemeines

Für Laser-Einrichtungen besteht die Verpflichtung einer Klassifizierung nach der Lasernorm DIN EN 60825-1. Die Laser werden in dieser Norm entsprechend ihrer Gefährlichkeit für den Menschen in Laserklassen eingeteilt. Die Zuordnung zu einer bestimmten Laserklasse soll für die Anwender die mögliche Gefährdung sofort ersichtlich machen und auf geeignete Schutzmaßnahmen hinweisen. Das Potenzial der Gefährdung steigt mit steigender Laserklasse: Je höher ein Laser klassifiziert ist, desto größer ist die Gefahr, die von ihm ausgehen kann. Für die Zuordnung eines Lasers zu einer bestimmten Laserklasse ist der Hersteller verantwortlich.

Die 3. Ausgabe der IEC 60825-1:2014 bzw. DIN EN 60825-1:2015-07 hat seit 19.6.2019 die bisherige DIN EN 60825-1 für neue Produkte abgelöst. Sie sieht neue Grenzwerte für die Klassifizierung vor die auf Basis der neuen ICNIRP Empfehlungen (2013) entwickelt wurden sowie die neue Laserklasse 1C. Bei der in der 3. Ausgabe der Norm neu definierten Laserklasse 1 können insbesondere bei gepulster Laserstrahlung die Expositionsgrenzwerte um bestimmte Faktoren überschritten werden. Bei der Verwendung von Lasern, die so klassifiziert wurden, müssen Schutzmaßnahmen wie bei den Laserklassen 3R und 3B getroffen werden.

Laserklasse 1

Die zugängliche Laserstrahlung ist unter vernünftigerweise vorhersehbaren Bedingungen ungefährlich.

Die vernünftigerweise vorhersehbaren Bedingungen sind beim bestimmungsgemäßen Normalbetrieb eingehalten.

Laser-Einrichtungen der Klasse 1 sind auch sicher, wenn eine Bestrahlung unter Benutzung optischer Instrumente, wie z. B. Ferngläsern, stattfindet.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 1, die im sichtbaren Spektralbereich emittieren, können z. B. Blendung, Beeinträchtigung des Farbsehens, Irritationen und Belästigungen nicht ausgeschlossen werden.

Die Laserklasse 1 umfasst auch sogenannte Hochleistungslasereinrichtungen, die voll gekapselt sind, so dass während des bestimmungsgemäßen Normalbetriebes innerhalb von 30 000 s keine möglicherweise gefährliche Laserstrahlung zugänglich ist.

Hinweis: Bestimmungsgemäßer Normalbetrieb

Der bestimmungsgemäße Normalbetrieb wird vom Anlagenhersteller festgelegt (siehe auch bestimmungsgemäße Verwendung). Hierfür erstellt der Hersteller auch seine Risikobewertung. Eine andere Anwendung als die bestimmungsgemäße ist vom Hersteller unter Umständen nicht vorgesehen und stellt ggf. ein höheres Risiko dar.

Laserklasse 1M

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 4 000 nm, d. h. in dem Spektralbereich, bei dem die meisten in optischen Instrumenten verwendeten Materialien weitgehend transparent sind. Die zugängliche Laserstrahlung ist für das bloße Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente, wie z. B. Teleskope, verkleinert wird.

Sofern keine optischen Instrumente verwendet werden, die den Strahlquerschnitt verkleinern, besteht bei Laser-Einrichtungen der Klasse 1M eine vergleichbare Gefährdung wie bei Laser-Einrichtungen der Klasse 1.

Bei Einsatz optisch sammelnder Instrumente können vergleichbare Gefährdungen wie bei den Laserklassen 3R oder 3B auftreten.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 1M, die im sichtbaren Spektralbereich emittieren, können z. B. Blendung, Beeinträchtigungen des Farbsehens, Irritationen und Belästigungen nicht ausgeschlossen werden.

Laserklasse 2

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Expositionsdauer (bis 0,25 s) auch für das Auge ungefährlich. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereiches von 400 nm bis 700 nm erfüllen die Bedingungen für Laserklasse 1.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2 ist das Auge bei zufälliger, kurzzeitiger Einwirkung der Laserstrahlung, d. h. bei Expositionsdauern bis 0,25 s nicht gefährdet. Laser-Einrichtungen der Klasse 2 dürfen deshalb ohne weitere Schutzmaßnahmen eingesetzt werden, wenn sichergestellt ist, dass für die Anwendung weder ein absichtliches Hineinschauen über längere Zeitdauern als 0,25 s, noch ein wiederholtes Hineinschauen in die Laserstrahlung bzw. in spiegelnd reflektierte Laserstrahlung erforderlich ist.

Der absichtliche, direkte Blick (Hineinstarren) in den Strahl einer Laser-Einrichtung der Klasse 2 kann gefährlich sein.

Von dem Vorhandensein des Lidschlussreflexes und von anderen Abwendungsreaktionen zum Schutz der Augen darf in der Regel nicht ausgegangen werden. Daher sollte man, falls Laserstrahlung der Klasse 2 ins Auge trifft, bewusst die Augen schließen und sich sofort abwenden.

Für kontinuierlich strahlende Laser der Klasse 2 beträgt der Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) $P = 1 \text{ mW}$ (bei $C_E = 1$, C_E ist ein Korrekturfaktor für sogenannte ausgedehnte Quellen; der Wert liegt zwischen 1 und $100/1,5$).

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2 können besonders bei geringer Umgebungshelligkeit durch den Blick in den Laserstrahl Irritationen, vorübergehende Blendung, Blitzlichtblindheit und länger andauernde Nachbilder verursacht werden. Durch diese indirekten Auswirkungen können mehr oder weniger starke Gefährdungen insbesondere bei Tätigkeiten auftreten, bei denen ein unbeeinträchtigtes Sehvermögen besonders wichtig ist, wie z. B. beim Arbeiten mit Maschinen oder beim Lenken bzw. Führen eines Fahr- oder Flugzeuges.

Laserklasse 2M

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Spektralbereich von 400 nm bis 700 nm. Sie ist bei kurzzeitiger Expositionsdauer (bis 0,25 s) für das bloße Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente, wie z. B. Teleskope, verkleinert wird. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereiches von 400 nm bis 700 nm erfüllen die Bedingungen für Laserklasse 1M.

Sofern keine optischen Instrumente verwendet werden, die den Strahlquerschnitt verkleinern, besteht bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2M eine vergleichbare Gefährdung wie bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2.

Bei Einsatz optisch sammelnder Instrumente können vergleichbare Gefährdungen wie bei den Laserklassen 3R oder 3B auftreten.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2M können besonders bei geringer Umgebungshelligkeit durch den Blick in den Laserstrahl Irritationen, vorübergehende Blendung, Blitzlichtblindheit und länger andauernde Nachbilder verursacht werden. Durch diese indirekten Auswirkungen können mehr oder weniger starke Gefährdungen insbesondere bei Tätigkeiten auftreten, bei denen ein unbeeinträchtigtes Sehvermögen besonders wichtig ist, wie z. B. beim Arbeiten mit Maschinen oder beim Lenken bzw. Führen eines Fahr- oder Flugzeuges.

Laserklasse 3A (anzuwenden bis März 1997)

Die zugängliche Laserstrahlung wird für das Auge gefährlich, wenn der Strahlquerschnitt durch optische Instrumente, wie z. B. Teleskope, verkleinert wird. Ist dies nicht der Fall, ist

die ausgesandte Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm) bei kurzzeitiger Expositionsdauer (bis 0,25 s), in den anderen Spektralbereichen auch bei Langzeitbestrahlung, ungefährlich.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3A handelt es sich um Laser, die nach der DIN EN 60825-1 (bis Ausgabe März 1997) klassifiziert worden sind. Laser-Einrichtungen der Klasse 3A, die nur im sichtbaren Wellenlängenbereich emittieren, können wie solche der Klasse 2M behandelt werden. Laser-Einrichtungen der Klasse 3A, die nur im nicht sichtbaren Spektralbereich emittieren, können wie solche der Klasse 1M behandelt werden.

Sofern keine optischen Instrumente verwendet werden, die den Strahlquerschnitt verkleinern, besteht bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3A, die nur im sichtbaren Spektralbereich emittieren, eine vergleichbare Gefährdung wie bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2. Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3A, die nur im nicht sichtbaren Spektralbereich emittieren, besteht eine vergleichbare Gefährdung wie bei Laser-Einrichtungen der Klasse 1.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3A, die im sichtbaren Spektralbereich emittieren, können besonders bei geringer Umgebungshelligkeit durch den Blick in den Laserstrahl Irritationen, vorübergehende Blendung, Blitzlichtblindheit und länger andauernde Nachbilder verursacht werden. Durch diese indirekten Auswirkungen können mehr oder weniger starke Gefährdungen insbesondere bei Tätigkeiten auftreten, bei denen ein unbeeinträchtigtes Sehvermögen besonders wichtig ist, wie z. B. beim Arbeiten mit Maschinen oder beim Lenken bzw. Führen eines Fahr- oder Flugzeuges.

Laserklasse 3R

Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 10^6 nm und ist gefährlich für das Auge. Die Leistung bzw. die Energie beträgt maximal das Fünffache des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung der Klasse 2 im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm und das Fünffache des Grenzwertes der Klasse 1 für andere Wellenlängen.

Laser-Einrichtungen der Klasse 3R sind für das Auge potenziell ähnlich gefährlich wie Laser-Einrichtungen der Klasse 3B. Das Risiko eines Augenschadens wird dadurch verringert, dass der Grenzwert der zugänglichen Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich auf das Fünffache des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung für Laserklasse 2, in den übrigen Wellenlängenbereichen auf das Fünffache des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung für Laserklasse 1 begrenzt ist.

Das Risiko einer Verletzung durch Laserstrahlung aus einer Laser-Einrichtung der Klasse 3R steigt mit der Expositionsdauer. Eine Exposition ist bei bewusster Augenbestrahlung gefährlich.

Für kontinuierlich strahlende Laser der Klasse 3R beträgt der Grenzwert der zugänglichen Strahlung $P = 5$ mW (bei $C_E = 1$) im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3R, die im sichtbaren Spektralbereich emittieren, können durch den Blick in den Laserstrahl Irritationen, vorübergehende Blendung, Blitzlichtblindheit und länger andauernde Nachbilder verursacht werden. Durch diese indirekten Auswirkungen können mehr oder weniger starke Gefährdungen insbesondere bei Tätigkeiten auftreten, bei denen ein unbeeinträchtigtes Sehvermögen besonders wichtig ist, wie z. B. beim Arbeiten mit Maschinen oder beim Lenken bzw. Führen eines Fahr- oder Flugzeuges.

Laser-Einrichtungen der Klasse 3R sollten nur dann eingesetzt werden, wenn ein direkter Blick in den Laserstrahl unwahrscheinlich ist.

Laserklasse 3B

Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge, häufig auch für die Haut.

Das direkte Blicken in den Strahl bei Lasern der Klasse 3B ist selbst dann gefährlich, wenn es nur kurzzeitig erfolgt.

Ein Strahlbündel aus einer Laser-Einrichtung der Klasse 3B kann theoretisch sicher über einen geeigneten diffusen Reflektor betrachtet werden, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind:

- der minimale Beobachtungsabstand zwischen diffusem Reflektor und Hornhaut des Auges beträgt mindestens 13 cm,
- die maximale Beobachtungsdauer beträgt höchstens 10 s und
- gerichtete Strahlanteile können nicht das Auge treffen.

Bei vielen Diffusoren ist mit gerichteten Strahlanteilen zu rechnen, wodurch die Expositionsbedingungen ungünstiger werden.

Eine Gefährdung der Haut durch die zugängliche Laserstrahlung besteht bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3B, wenn die Expositionsgrenzwerte der Haut überschritten werden. Dies trifft in der Regel zu, wenn die Strahldurchmesser zu klein sind oder wenn der Laserstrahl fokussiert wird.

Bei Laser-Einrichtungen der Klasse 3B kann es im Laserstrahl zum Entflammen entzündlicher Materialien kommen.

Laserklasse 4

Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahr verursachen.

Laser-Einrichtungen der Klasse 4 sind Hochleistungslaser, deren Ausgangsleistungen bzw. -energien die Grenzwerte der zugänglichen Strahlung für Klasse 3B übertreffen.

Die Laserstrahlung von Laser-Einrichtungen der Klasse 4 ist so stark, dass bei jeglicher Art von Exposition der Augen oder der Haut mit Schädigungen zu rechnen ist. Außerdem muss bei der Anwendung von Laser-Einrichtungen der Klasse 4 immer geprüft werden, ob ausreichende Maßnahmen gegen Brand- und Explosionsgefährdungen getroffen sind.

8.2 Anmerkungen zur Nomenklatur, Gefährdung und zu Prüfungen

8.2.1 Nomenklatur 1

Das M in den Laserklassen 1M und Laserklasse 2M ist abgeleitet von *magnifying optical viewing instruments*, d. h. vergrößernde optische Sehgeräte. Das R in Laserklasse 3R ist abgeleitet von *reduced* oder *relaxed requirements*, d. h. reduzierten Anforderungen sowohl für den Hersteller (z. B. werden kein Schlüsselschalter, kein Strahlfänger oder Strahlabschwächer und kein Verriegelungsstecker gefordert) als auch für den Benutzer gemäß den Anforderungen in der DIN EN 60825-1. Das B für Laserklasse 3B hat historische Gründe, da in der Ausgabe der Norm vor der Änderung A2:2001 eine Laserklasse 3A existierte, die eine ähnliche Bedeutung hatte, wie jetzt die Laserklassen 1M und 2M.

8.2.2 Gefahr und Risiko

Bei den Beschreibungen in Abschnitt 8.1 sollte beachtet werden, dass immer dann, wenn das Wort „gefährlich“ verwendet wird oder wenn ein Hinweis auf ein hohes Verletzungsrisiko auftaucht, Gefahr und Risiko nur in dem Bereich um den Laser existieren, wo die entsprechenden Expositionsgrenzwerte überschritten sind. Diese entsprechen sowohl den Expositionsgrenzwerten in Abschnitt 7.2 als auch der Ausgabe DIN EN 60825-1:2008-05. Für eine Bestrahlung des bloßen Auges ist dieser Bereich durch den Augensicherheitsabstand NOHD begrenzt oder für gut kollimierte Laser der Klasse 1M und der Klasse 2M durch den erweiterten Augensicherheitsabstand (ENOHD), d. h. hierbei wird die Verwendung optisch sammelnder Instrumente berücksichtigt.

8.2.3 Beispiele der Laserbereiche

Es ist möglich, dass bestimmte Laser-Einrichtungen der Laserklasse 3B oder 4 einen sehr kleinen Sicherheitsabstand haben, sodass für das Personal dieser Installationen oder Anwendungen außerhalb des Augensicherheitsabstandes kein Augenschutz erforderlich ist.

Beispiele solcher Installationen sind richtungsveränderliche Laser oder Linienlaser, die an der Decke der Werkshalle montiert sind und ein Muster auf das Werkstück im Arbeitsbereich darunter projizieren. Obwohl die Höhe der Leistung und das Ablenkungsmuster so sein könnten, dass die Bestrahlung des Arbeitsplatzes unterhalb der Expositionsgrenzwerte und daher sicher ist, müssen Wartungs- und Serviceverfahren gesondert betrachtet werden. Zum Beispiel kann eine Bestrahlung in einem kürzeren Abstand gefährlich sein, wenn der Benutzer sich beispielsweise auf einer Leiter befindet und ein Laserstrahl-Austrittsfenster reinigt. Ein anderes Beispiel ist, dass, obwohl das Ablenkmuster sicher ist, eine Gefahr entsteht, wenn der Strahl nicht mehr abgelenkt wird. Außerdem gibt es für Laser-Einrichtungen der Klasse 4 einen Augensicherheitsabstand, der sich auf diffuse Reflexionen bezieht (obwohl dieser Augensicherheitsabstand wahrscheinlich von recht begrenzter Ausdehnung ist). Die Charakterisierung der Gefahr für einen speziellen Laser bzw. dessen Anwendung ist Teil der Gefährdungsbeurteilung.

8.2.4 Hinweise zu Prüfungen

Prüfungen für die Klassifizierung sollen den ungünstigsten Fall erfassen und restriktiv sein, um sicherzustellen, dass eine Einrichtung einer niedrigen Laserklasse (z. B. Laserklasse 1) keine Gefahr für Auge oder Haut sogar in vernünftigerweise vorhersehbaren ungünstigsten Fällen darstellt. Infolgedessen kann eine Einrichtung der Laserklasse 3B oder 4 trotzdem so konstruiert sein, dass sie für den bestimmungsgemäßen Gebrauch als sicher angesehen werden kann, da die Gefahr nur in den ungünstigsten Fällen zugänglich wird. Zum Beispiel könnte die Einrichtung ein Schutzgehäuse (nach DIN EN 60825-4) haben, aber die Anforderungen an einen gekapselten Laser der Klasse 1 nicht erfüllen, da:

- dass Schutzgehäuse die Prüfung nach DIN EN 60825-1 für eine längere Zeitdauer (30.000 s) nicht besteht (während für Geräte nach DIN EN 60825-4 eine kürzere Bewertungsdauer verwendet werden kann);
- sie keine obere Abdeckung hat, aber für ein Umfeld, in dem sich keine Personen oberhalb der Schutzwand befinden, als sicher angesehen wird;
- sie keine automatische Überwachung eines begehbaren Zugangs hat. In einem kontrollierten Umfeld kann dies jedoch durch eine organisatorische Schutzmaßnahme mit individualisierten Verriegelungen, die ein Schließen der Tür verhindern, falls sich jemand in dem Gehäuse befindet, ersetzt werden. Das beeinflusst zwar nicht die Klassifizierung, stellt aber eine Maßnahme dar, die das gewünschte Sicherheitsniveau für den Benutzer erreicht.

8.2.5 Hinweise zu Gefährdung

In Fällen, in denen die mit Laser-Einrichtungen der Klasse 3B oder 4 verbundene Gefahr auf den Bereich innerhalb des Gehäuses beschränkt ist, können organisatorische Schutzmaßnahmen ausreichend sein. Organisatorische Schutzmaßnahmen können auch für einen Laser ohne Abdeckung ausreichend sein oder dann, wenn die Schutzwand während einer länger andauernden Fehlersituation durchbrennen kann.

Es gibt andere Beispiele, wo die Gefahren bei Lasern der Klasse 3B oder 4 nur in speziellen Situationen auftreten. Beispielsweise kann die Klassifizierung auf einem Zubehör, wie einer kollimierenden Linse, an einer stark divergenten Quelle für Lasertherapie mit niedriger Leistung, beruhen. Diese Einrichtung kann auf Grund der aufgeschraubten Zubehörlinse als Laserklasse 3B klassifiziert sein, da die Linse einen möglicherweise gefährlichen kollimierten Strahl erzeugt. Ein Einsatz ohne das aufgeschraubte Zubehör würde jedoch einen divergenten Strahl erzeugen und könnte sicher sein, d. h., die Expositionsgrenzwerte sind eingehalten. Ein Gefahrenbereich um den Laser würde also nur existieren, wenn das Zubehör

aufgeschraubt ist.

8.3 Grenzen der Klassifizierung

Die Klassifizierung von Lasereinrichtungen erfolgt konservativ und berücksichtigt den ungünstigsten Fall. Es gibt jedoch seltene Fälle, in denen Gefährdungen auftreten können, die über die Klassifizierung nicht abgebildet werden. Die Klassifizierung beruht auf drei Aspekten:

1. den GZS der verschiedenen Laserklassen;
2. den Messanforderungen bezüglich Messabstand, Blendendurchmesser und Grenz-Empfangswinkel, welche die verschiedenen Bestrahlungsbedingungen widerspiegeln sollen. Diese Messbedingungen legen für eine gegebene Lasereinrichtung die zugängliche Strahlung fest, die mit dem GZS verglichen wird, um die Laserklasse zu bestimmen;
3. den Prüfbedingungen, unter denen der GZS und die zugängliche Strahlung bestimmt werden. Dies schließt die Berücksichtigung vernünftigerweise vorhersehbarer Fehlbedingungen ein. Ferner müssen Normalbetrieb, Wartung und Service unterschieden werden. Die Verwendung von Zubehör und von verschiedenen Konfigurationen der Einrichtung, die ohne Verwendung von Werkzeug erzeugt werden können, müssen berücksichtigt werden.

Jede dieser drei Komponenten hat einige implizite Annahmen. In seltenen Fällen treffen diese Annahmen nicht zu. Dann können Gefährdungen auftreten, die über die üblichen mit der Klassifizierung verbundenen Gefährdungen hinausgehen. Zum Beispiel beruht der GZS für die Laserklassen 1 und 1M für lange Einwirkungsauern auf der Annahme von Augenbewegungen eines nicht anästhetisierten Auges. Wird jedoch ein anästhetisiertes Auge während medizinischer Behandlungen lange bestrahlt, dann kann die Emission von Lasern der Klasse 1 zu möglicherweise gefährlichen Bestrahlungen führen. Auch beruhen die Messanforderungen auf Annahmen und Bewertungen der Wahrscheinlichkeit einer Bestrahlung mit bestimmten Arten optischer Instrumente. So könnte zum Beispiel sogar ein kollimierter Strahl mit großem Durchmesser einer Laser-Einrichtung der Klasse 1 gefährlich sein, wenn er von einem großen Fernrohr aufgefangen wird. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit einer solchen zufälligen Bestrahlung des Auges auf Grund des kleinen Gesichtsfeldes des Fernrohrs normalerweise sehr gering. Eine andere Situation, die möglicherweise betrachtet werden muss, ist der Betrieb einer Einrichtung unter einer Bedingung, die für die Klassifizierung nicht betrachtet werden muss, in der aber trotzdem gefährliche Strahlung zugänglich werden könnte. Zum Beispiel könnte, obwohl eine kollimierende Linse vom Hersteller der Einrichtung nicht als Zubehör geliefert wird, ein divergenter Strahl einer Einrichtung der Laserklasse 1M oder 2M in einen kollimierten Strahl mit einem möglicherweise großen Gefährdungsabstand umgewandelt werden, indem eine solche Linse an die Einrichtung angebaut wird. Dies würde jedoch als eine Änderung der Einrichtung angesehen werden. Die Klassifizierung ist zu überprüfen.

Trotzdem sollte sich der Hersteller dieser Grenzen bewusst sein, damit Warnungen in die Bedienungs-, Gebrauchs- bzw. Betriebsanleitungen für den Benutzer der Einrichtungen eingefügt werden können. Spezielle Beispiele solch möglicher Grenzen sind:

- kollimierte Strahlen großen Durchmessers von Laser-Einrichtungen der Klasse 1, 2 oder 3R, die mit großen Fernrohren betrachtet werden;
- stark divergente Strahlen von Laser-Einrichtungen der Klasse 1, 2 oder 3R, die mit Geräten hoher Vergrößerung betrachtet werden;
- Fernrohre und Ferngläser mit einer Vergrößerung von weniger als dem Siebenfachen. In diesem Fall sollte für Bedingung 1 die Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle, die verwendet werden darf (siehe DIN EN 60825-1:2008-05, 8.3 c)), oder alternativ die Verringerung des Grenz-Empfangswinkels (siehe DIN EN 60825-1:2008-05, A.4.3 b)) gleich dem tatsächlichen Vergrößerungsfaktor sein, d. h. weniger als siebenfach;
- richtungsverändernde Strahlen, die mit einem Fernrohr betrachtet werden;

- Doppelfehlerbedingungen, die wahrscheinlich sein könnten. Damit sind Fälle gemeint, in denen ein einzelner Fehler nicht zu zugänglicher Strahlung oberhalb der GZS führen würde. Wenn aber beide Fehler zur gleichen Zeit auftreten, könnte dies der Fall sein. Wird erwartet, dass diese Fehler mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit auftreten, dann wäre die Wahrscheinlichkeit eines Doppelfehlers ausreichend hoch, sodass dieser Fall bei der Konstruktion des Gerätes betrachtet werden soll,
- kleine Strahldurchmesser von z. B. 100 μm bei gleichzeitiger hoher Leistungsdichte müssen gesondert behandelt werden, da hier bei einer Mittelung über 1 mm oder 7 mm die Gefährdungen nicht ausreichend berücksichtigt werden.

9 Messung und Berechnung

Die Kenntnis der charakteristischen Strahleigenschaften einer Laserstrahlquelle ist sowohl für deren Anwendung als auch für Sicherheitsanalysen und die Klassifizierung erforderlich. Dazu sind eine oder mehrere der folgenden Eigenschaften sowie weitere, die davon abgeleitet werden, anzugeben:

Wellenlänge/n, Leistung, Energie, Impulsdauer, Impulsfolgefrequenz, Strahlabmessungen, Strahldivergenz, Modenprofil, Strahlpropagationsfaktor (M^2) und Betriebsmodus.

Aus diesen Größen können in den meisten Fällen, die für die jeweilige Anwendung bzw. Sicherheitsanalyse erforderlichen Größen errechnet werden. Eine Messung kann umgangen werden, wenn durch ausreichende Herstellerangaben sichergestellt werden kann, dass die Expositionsgrenzwerte niemals überschritten werden können oder angegeben werden kann, in welchem Bereich die Expositionsgrenzwerte überschritten werden. Eine Ausnahme hierfür ist z. B. die Ermittlung der Laserstreustrahlung. Diese Leistung hängt von vielen unterschiedlichen Parametern ab, die sich durch Spezifikation der Laserstrahlquelle nicht bestimmen lässt. Die Ermittlung der Laserstreustrahlung erfordert immer eine Messung.

Die Messung der Leistung und Energie von Laserstrahlung ist in den meisten Fällen nicht so einfach, dass man nur ein Messgerät für die Messung dieser Eigenschaften einsetzen kann. Komplikationen können unter anderem dadurch auftreten, dass die Leistung der Laserstrahlquelle ein Vielfaches der üblichen Strahlungsleistung übersteigt, die z. B. im Bereich der Telekommunikation auftritt.

Erfordert die Situation, dass eine Messung oder Messungen durchgeführt werden müssen, sind einige fundierte Kenntnisse über den Laser und die Anwendung notwendig. Aus der gesuchten Messgröße und den Eigenschaften des Lasers ergeben sich die Kriterien, nach denen ein geeignetes Messgerät und Messverfahren gewählt werden können. Je nachdem, wie viele Informationen über den Laser vom Hersteller verfügbar sind, müssen die einzelnen Spezifikationen durch Messungen zusammengetragen werden. Die Ergebnisse müssen durch geeignete Rechnung verarbeitet werden, um sie mit den Expositionsgrenzwerten vergleichen zu können.

Grundsätzlich ist zu klären, welche Messgröße oder Messgrößen zu ermitteln sind. Danach richtet sich das Messmittel und die Messverfahren. Im Allgemeinen wird für eine Sicherheitsanalyse die Leistung in Watt [W] gemessen.

Darauffolgend sind der Leistungsbereich und die Wellenlänge des Lasers in Erfahrung zu bringen. Das Messmittel muss für den Wellenlängenbereich des Lasers geeignet sein, um überhaupt eine Messung zu ermöglichen. Um eine Übersteuerung oder gar Zerstörung des Messgerätes zu vermeiden, ist das Messmittel entsprechend der zur erwartenden Leistung und Leistungsdichte anzupassen. Die Messanordnung, die Fehlerwahrscheinlichkeit und der Kalibrierstand des Messmittels sind rechtssicher zu dokumentieren.

Zusätzlich ist die Betriebsart des Lasers ein entscheidender Faktor. Bei gepulsten Lasern kann die Messung der Impulslänge eine Herausforderung für das Messmittel darstellen. Einige Laseranwendungen erfordern kurze Impulslängen die sogar weniger als Nanosekunden andauern. Diese Impulse zu vermessen, kann gerade dahingegen eine

Schwierigkeit darstellen, wenn neben der Impulsleistung auch die Impuls-Form bestimmt werden muss.

Bei Messung und Bewertung von Laserstrahlung sind geeignete Laserleistungs-/ Laserenergiemessgeräte unter Beachtung der festgelegten Messbedingungen zu verwenden. Falls die Daten aus der Klassifizierung für Sicherheitsbetrachtungen nicht ausreichend erscheinen, sollten für Messungen und Bewertungen ggf. Spezialisten hinzugezogen werden (siehe Abschnitt 16, Adressen).

Für die Ermittlung der jeweiligen Messgröße oder Spezifikation des Lasers könnten folgende Messgeräte zum Einsatz kommen:

Wellenlänge: Um die Wellenlänge eines Lasers zu bestimmen, können Spektrometer verwendet werden. Eine wichtige Größe bei der Gerätespezifikation ist die Bandbreite. Diese beschreibt, in welchem Maß eine Wellenlänge bei der Analyse verbreitert wird. Als Folge wird eine Laserlinie nicht mehr als Linie dargestellt. Daraus ergibt sich eine gewisse Unschärfe, die die exakte Wellenlängenbestimmung beeinträchtigt. Verfügt das Messgerät über eine geeignete Kalibrierung und die technischen Voraussetzungen, kann dieses Messgerät neben der Wellenlängenbestimmung auch zur Leistungsmessung verwendet werden.

Leistung und Energie: Für die Messung der Leistung und Energie können unterschiedliche Messtechnologien zum Einsatz kommen. Thermische Detektoren, die auf Basis von Thermoelementen oder dem pyroelektrischen Effekt funktionieren, sind eine davon. Diese Detektoren haben den Vorteil, dass die spektrale Empfindlichkeit über einen großen Wellenlängenbereich konstant ist. Die geringe Zeitauflösung und Photoempfindlichkeit ist jedoch ein Nachteil dieser Detektoren. Eine weitere Technologie stellen die Halbleiterdetektoren dar. Mittels Si- (250 nm - 1100 nm) oder InGaAs-Photodioden (800 nm – 1800 nm) kann ein großer Spektralbereich abgedeckt werden. Die Detektoren besitzen eine starke wellenlängenabhängige Empfindlichkeit. Daher ist immer eine spektrale Kalibrierung für eine Leistungsmessung notwendig. Die hohe Empfindlichkeit und Zeitauflösung erlauben den Detektoren auch niedrige und kurze Ereignisse zeitaufgelöst erfassen zu können. In vielen Fällen können die Dioden auch gedämpft werden, wenn die Leistung zu hoch für den Messbereich sein sollte. Diese Messdetektoren lassen sich sehr gut mit Ulbrichtkugeln kombinieren. Ein Vorteil der Ulbrichtkugel ist, dass man sowohl kollimierte als auch aufgeweitete Laserstrahlen messen kann. Polarisierungseffekte, wie sie bei „flachen“ Detektoren vorkommen können, treten hierbei nicht auf. Über den Kugeldurchmesser hat man Einfluss auf den Dämpfungsfaktor. Die maximal messbare Leistung ist durch die Betriebstemperatur begrenzt.

Laserstreustrahlung: Bei der Ermittlung der Laserstreustrahlung können spektral kalibrierte Breitbandmessköpfe zum Einsatz kommen. Über eine Blende mit einem Durchmesser von 7 mm wird die freie Apertur einer Pupille des menschlichen Auges nachempfunden.

Impulsfolgefrequenz: Für die Feststellung der Impulsfolgefrequenz lassen sich schnelle Photodioden und ein passendes Oszilloskop verwenden. Die Diode wird dabei häufig mit einer Vorspannung betrieben.

10 Schutzmaßnahmen

10.1 Schutzmaßnahmen seitens des Herstellers

Der Hersteller muss zunächst sein Laserprodukt klassifizieren. In Abhängigkeit von der Laserklasse muss er entsprechende Schutzmaßnahmen ergreifen. Sie beschränken sich naturgemäß auf technische Schutzmaßnahmen sowie auf das Bereitstellen von Informationen (unter anderem das Anbringen von Warn- und Hinweisschildern und die Sicherheitshinweise in der Gebrauchsanweisung).

10.1.1 Technische Schutzmaßnahmen (Konstruktionsanforderungen) Zugangsabdeckungen, Schutzgehäuse

Jedes Lasergerät muss ein Schutzgehäuse haben, welches den Austritt von Strahlung verhindert, die nicht für die Funktion des Gerätes notwendig ist. Serviceabdeckungen müssen durch einen Sicherheitsschalter (Interlock) geschützt oder müssen so gestaltet sein, dass zur Entfernung Werkzeug notwendig ist. Abdeckplatten müssen abgesichert sein, wenn das Öffnen im bestimmungsgemäßen Betrieb vorgesehen ist.

Fernbediente Sicherheitsverriegelung (Interlock)

Laser der Klasse 3B und 4 müssen einen Anschluss für fernbediente Sicherheitsverriegelungen besitzen. Die Interlockschnittstellen müssen mindestens den für die Lasereinrichtung ermittelten Performancelevel (PL) aufweisen (DIN EN 13849) sowie die notwendigen Informationen über deren Ausfallwahrscheinlichkeit beinhalten.

Schlüsselschalter

Laser der Klasse 3B und 4 müssen mit einem Schlüsselschalter ausgestattet sein. Der Begriff „Schlüssel“ umfasst dabei auch Magnetkarten, Ziffernkombinationen, Passwörter.

Emissions-Warneinrichtungen

Laser der Klasse 3R mit unsichtbarer Strahlung und Laser der Klasse 3B und 4 müssen ein akustisches und/oder optisches Signal abgeben, wenn das Gerät eingeschaltet oder Kondensatoren gepulster Laser geladen werden. Diese Emissionswarneinrichtung muss redundant oder ausfallsicher sein. In der Regel sollte die Leuchtdichte mindestens 200 cd/m^2 in Räumen und 400 cd/m^2 im Freien betragen. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass die Farbe der Warnleuchte durch die Filter der zugehörigen Laserschutzbrillen klar erkennbar ist.

Strahlfänger (Shutter), Strahlabschwächer

Lasergeräte der Klasse 3B und 4 müssen einen Strahlfänger besitzen, der es dem Benutzer ermöglicht, unabhängig vom Ein- und Ausschalten des Gerätes den Austritt des Strahls zu verhindern.

Steuerung

Die Steuerungseinrichtungen des Lasers müssen so platziert sein, dass Justage und Betrieb des Lasergerätes möglich ist, ohne einer Laserstrahlung der Klassen 3R, 3B oder 4 ausgesetzt zu sein.

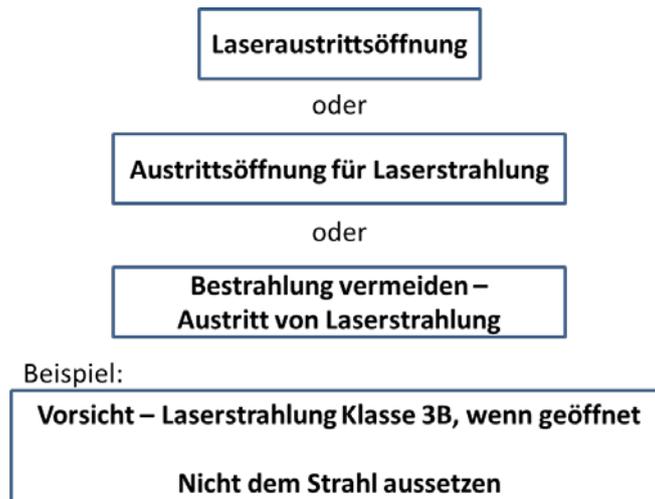
Beobachtungsoptiken

Sollte das Lasergerät mit einer Beobachtungseinrichtung ausgestattet sein, so ist zu gewährleisten, dass die MZB-Werte beim Blick durch die Beobachtungsoptik nicht überschritten werden können.

Richtungsveränderliche Strahlung (Scan-Laser)

Scan-Laser dürfen infolge eines Versagens der Ablenkung, Änderung der Scan-Geschwindigkeit oder der Amplitude keine zugängliche Strahlung über den Grenzwerten der zugeordneten Klasse zulassen.

Kennzeichnung an Strahlaustrittsöffnung



10.1.2 Warn- und Hinweisschild

Gemäß DIN EN 60825-1 müssen alle Warnschilder dauerhaft angebracht, gut lesbar und auch während des Betriebes deutlich sichtbar sein. Text, Umrandung und Symbole müssen (mit Ausnahme der Klasse 1) schwarz auf gelbem Untergrund sein.

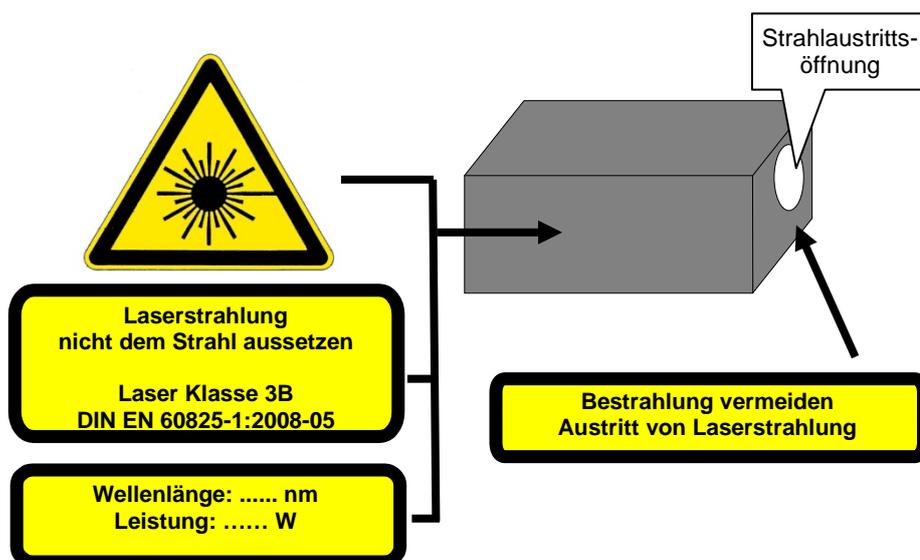
Laserwarnschild

Bedeutung: Achtung Laserstrahlung. Muss auf allen Lasergeräten der Klasse 2 und höher angebracht sein.

Klassenangabe und Warntext

Jede Lasereinrichtung ab Klasse 2 muss ein Hinweisschild aufgeklebt oder beigelegt haben, dass die Laserklasse, den entsprechenden Warntext sowie das Datum der Veröffentlichung der Norm, nach der das Produkt klassifiziert wurde, angibt.

Beispiel für die Kennzeichnung eines Lasers der Klasse 3B



Anmerkung: Nach DIN EN 60825-1:2015-07 sind andere Beschilderungen möglich.

10.1.3 Informationen für den Anwender

Folgende Informationen müssen integraler Bestandteil der Gebrauchsanweisung zum Laserprodukt sein:

- a) Anweisungen für den richtigen Zusammenbau, die Wartung und den Betrieb.
- b) Für Laserprodukte der Klassen 1M und 2M sind zusätzliche Warnhinweise hinsichtlich Gefährdungsmöglichkeit erforderlich (welches optische Instrument erhöht die Gefährdung?).
- c) Angabe der Strahlparameter (Divergenz, Impulsenergie, Impulsdauer, etc.) einschließlich der Messunsicherheit.
- d) Für gekapselte (eingebaute) Laserprodukte sind alle notwendigen Hinweise bereitzustellen, um einer schädlichen Strahlungsexposition vorzubeugen.
- e) Wenn es relevant ist, sollte der Lasergefahrenbereich NOHA für Laserprodukte der Klasse 3B und 4 angegeben sein (bzw. der erweiterte Gefahrenbereich ENOHA bei 1M oder 2M).
- f) Hinweise über die geeignete Laser-Schutzbrille.
- g) Lesbare Reproduktion aller Hinweisschilder und Beschreibung der Befestigungsstellen der Warnschilder.
- h) Falls die Warnschilder nicht vom Hersteller befestigt wurden, dann muss er auf diesen Umstand hinweisen und angeben, in welcher Form und Weise sie mitgeliefert wurden.
- i) Hinweis auf die Lage der Laserstrahl-Austrittsöffnungen.
- j) Liste der Bedienungsmöglichkeiten (inkl. Justier-Einrichtung) und Verfahrensweisen, inklusive Warnung vor Fehlbedienung und deren Konsequenzen.
- k) Sofern das Laserprodukt seine Energieversorgung nicht enthält, ist die Art der Energieversorgung zu spezifizieren.

10.2 Schutzmaßnahmen seitens des Betreibers (Anwender)

10.2.1 Allgemeines

Bei der Planung von Schutzmaßnahmen ist zu bedenken, wie die Lasereinrichtung eingesetzt wird.

Die Schutzmaßnahmen ergeben sich aus der Gefährdungsbeurteilung gemäß OStrV. Zu beachten ist, ob der Laserstrahl innerhalb eines Gehäuses, eines Raumes, Gebäudes, Betriebsgeländes oder außerhalb des Betriebsgeländes geführt wird. Die folgenden Punkte enthalten wichtige Informationen zur Festlegung der Schutzmaßnahmen beim Betrieb von Lasern. Ist der Laserstrahl außerhalb des Betriebsgeländes zugänglich, ist zusätzlich zu beachten, dass entsprechende Genehmigungen der zuständigen Behörden, wie z. B. Ordnungsamt, Flugsicherungsbehörde einzuholen sind.

Grundsätzlich ist der Laserbereich so klein wie möglich zu halten. Bauliche und konstruktive Schutzmaßnahmen (Tabelle 11) sind vorrangig anzuwenden. Nur wenn der Schutz durch diese Maßnahmen nicht hergestellt werden kann, sind zunächst organisatorische vor persönlichen Schutzmaßnahmen (Tabelle 12) vorzusehen.

10.2.2 Vorgehensweise

Zu Beginn ist zu prüfen, ob der Laserstrahl vollkommen umbaut werden kann, sodass kein Zugang zur Laserstrahlung besteht. Ist dies nicht oder nur unvollständig möglich, ist der Lasergefahrenbereich zu ermitteln, d. h. es sind die Bereiche zu erfassen, in denen die Expositionsgrenzwerte der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) überschritten werden können. Dabei sind neben der direkten Strahlausbreitung auch die Bereiche, in denen durch Reflexion und Remission die Expositionsgrenzwerte überschritten werden können, zu ermitteln. Nach Ermittlung des Lasergefahrenbereiches ist zu prüfen, wie der Bereich durch bauliche -/technische Maßnahmen verkleinert werden kann. Maßnahmen können z. B. eine Begrenzung der Strahlausbreitung durch Strahlfänger oder Strahlrichtung sein. Der Lasergefahrenbereich ist daraufhin erneut zu ermitteln. Ergibt die Ermittlung, dass Beschäftigte sich bei ihren Tätigkeiten im Lasergefahrenbereich aufhalten müssen, sind weitere Maßnahmen – nach technischen auch organisatorische – zur Verringerung des Lasergefahrenbereiches und eine erneute Ermittlung des Lasergefahrenbereiches vorzusehen. Verhindert dieses Vorgehen nicht, dass Beschäftigte sich in Lasergefahrenbereichen aufhalten müssen, so sind persönliche Schutzmaßnahmen – Augen- und ggf. Hautschutz vorzusehen.

Außer den Beschäftigten innerhalb eines Unternehmens können auch z. B. bei Anwendungen im Freien, andere Personen in den Lasergefahrenbereich gelangen. Auch für sie ist sicherzustellen, dass zumindest die Expositionswerte der OStrV nicht überschritten werden. Kann der Blick durch optische Geräte mit vergrößernder Wirkung nicht ausgeschlossen werden, ist dies zusätzlich zu berücksichtigen.

10.2.3 Betrieb von Lasereinrichtungen in Gebäuden

Lasereinrichtungen der Klasse 2

Andauerndes oder wiederholtes direktes Blicken in den Laserstrahl ist zu vermeiden, da nur eine kurzzeitige Exposition (bis 0,25 s), wie sie bei zufälliger Bestrahlung des Auges zustande kommt, ungefährlich ist. Anwesende Personen sind darauf hinzuweisen, nicht in den Laserstrahl zu blicken.

Hinweis: Vom Schutz der Augen durch den Lidschlussreflex kann nicht grundsätzlich ausgegangen werden. Daher sollte man, falls Strahlung ins Auge gelangt, die Augen sofort bewusst schließen und sich abwenden.

Lasereinrichtungen der Klasse 1M, 2M und 3A

Der Laserstrahl darf im Strahlengang mit optischem Gerät vergrößernder Wirkung nur durch ausreichende Laserschutzfilter betrachtet werden. Für Lasereinrichtungen der Klassen 2M und 3A, die Strahlung im sichtbaren Bereich (400 nm bis 700 nm) aussenden, sind darüber hinaus die Schutzbestimmungen für Laser der Klasse 2 zu beachten. Wird der Strahlquerschnitt durch optische Instrumente (z. B. Lupen, Linsen, Teleskope) verkleinert, besteht eine vergleichbare Gefährdung wie bei Lasern der Klassen 3R und 3B; entsprechende Schutzvorkehrungen sind zu treffen.

Lasereinrichtungen der Klasse 3R und 3B

Während des Laserbetriebs sind die dazu benutzten Räume Lasergefahrenbereiche. In ihnen sind folgende Schutzmaßnahmen zu treffen:

- In den Räumen dürfen sich keine explosionsgefährlichen oder leicht entzündlichen Stoffe befinden.
- Die Eingänge zu den Räumen sollten mit einem Warnzeichen und einem Hinweisschild und mit einer Warnleuchte versehen sein, die während des Laserbetriebs eingeschaltet sein muss. Warnleuchten wurden bisher in der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ nur bei Lasern der Klasse 4 gefordert (siehe auch TROS Laserstrahlung Teil 3).

- Türen sind so zu sichern, dass ein unbefugtes oder zufälliges Betreten der Räume während des Laserbetriebs unmöglich ist.
- Fluchttüren müssen mit einem Panikverschluss versehen sein.
- Fußböden, Decken, Wände und Einrichtungen der Räume sollten matte, raue Oberflächen aufweisen.
- Fenster sind beim Laserbetrieb abzudecken.
- Der Laserstrahl ist möglichst abgeschirmt zu führen. Nicht abgeschirmte Laserstrahlen sollen oberhalb (typisch: 2,7 m) oder unterhalb (kleiner 0,6 m) der Augenhöhe verlaufen.
- Die Strahlachse von Lasereinrichtungen ist so zu sichern, dass ein Auswandern des Laserstrahls nicht möglich ist.
- Der Strahlengang ist durch eine diffus reflektierende, temperaturbeständige Zielfläche oder durch Absorber zu begrenzen.
- Gegenstände, die eine unkontrollierte spiegelnde Reflexion hervorrufen können, sind aus der Umgebung des Laserstrahls zu entfernen oder mit nichtreflektierendem Material abzudecken.
- Alle Personen, die sich während des Laserbetriebs in den Laserbereichen aufhalten, müssen Laser-Schutzbrillen tragen, die auf Wellenlänge und Laserleistung abgestimmt sind.
- Jeder Benutzer und jede Benutzerin einer Laser-Schutzbrille hat sich vor deren Gebrauch zu vergewissern, dass an seiner bzw. ihrer Brille keine Veränderungen erkennbar sind (z. B. Sprünge, Farbveränderungen), die den Schutz vor Laserstrahlung beeinträchtigen können. Solche Fehler sind unverzüglich dem bzw. der Laserschutzbeauftragten zu melden.
- Alle im Raum Anwesenden sind so rechtzeitig vor dem Einschalten der Lasereinrichtung zu verständigen, dass sie Gelegenheit haben, die nötigen Vorkehrungen zu treffen. Wird durch technische Einrichtungen an der Lasereinrichtung sicher verhindert, dass Laserstrahlen in den Raum oder in andere Räume gelangen können, entstehen keine Lasergefahrenbereiche und die genannten Schutzvorkehrungen können entfallen.

Lasereinrichtungen der Klasse 4

Für Lasereinrichtungen der Klasse 4 gelten die gleichen Schutzbestimmungen wie für die Klasse 3B mit der Maßgabe, dass der Laserstrahl grundsätzlich abgeschirmt zu führen ist und die Zielfläche oder der Absorber nicht ungeschützt betrachtet werden kann. Lasereinrichtungen der Klasse 4 sollen fernbedient werden, damit auf diese Weise die Anwesenheit von Personen in der Umgebung der Lasereinrichtung ausgeschlossen ist.

Der Betrieb von Lasereinrichtungen der Klasse 4 kann mit erheblichen Brand- und Explosionsgefahren verbunden sein.

Besondere Vorkehrungen können notwendig sein, wenn unerwünschten Reflexionen im Infrarotbereich vorzubeugen ist.

10.2.4 Betrieb von Lasereinrichtungen im Freien

Lasereinrichtungen der Klasse 2

Andauerndes oder wiederholtes direktes Blicken in den Laserstrahl ist zu vermeiden. Ungefährlich ist nur eine kurzzeitige Exposition (bis 0,25 s), wie sie bei zufälliger Bestrahlung des Auges zustande kommt. Personen, die in den Bereich des Laserstrahls gelangen können, sind darauf hinzuweisen, dass sie nicht in den Laserstrahl blicken dürfen.

Hinweis: Vom Schutz der Augen durch den Lidschlussreflex kann nicht grundsätzlich

ausgegangen werden. Daher sollte man, falls Strahlung ins Auge gelangt, die Augen sofort bewusst schließen und sich abwenden.

Lasereinrichtungen der Klassen 1M, 2M und 3A

Bei Lasereinrichtungen der Klassen 2M und 3A, die Strahlung im sichtbaren Bereich (400 nm bis 700 nm) aussenden, ist ein andauerndes Blicken in den Laserstrahl zu vermeiden. Ungefährlich ist nur eine kurzzeitige Exposition (bis 0,25 s), wie sie bei zufälliger Bestrahlung des Auges zustande kommt. Weiterhin sind die Schutzbestimmungen für Lasereinrichtungen der Klasse 2 zu beachten.

Lässt sich nicht ausschließen, dass innerhalb der Distanz der erweiterten NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance, Sicherheitsabstand für das Auge) optische Geräte mit vergrößernder Wirkung ohne ausreichende Laserschutzfilter zur Beobachtung benutzt werden oder der Strahlquerschnitt durch optische Instrumente verkleinert wird, sind für alle Lasereinrichtungen dieser Klassen folgende Schutzvorkehrungen zu treffen:

Der Lasergefahrenbereich im Gelände ist unter Verwendung des erweiterten Augensicherheitsabstandes (ENOHD) festzulegen, wobei bei verschiedenen optischen Geräten vom größten Wert des erweiterten Augensicherheitsabstandes (ENOHD) auszugehen ist. Die Ermittlung des NOHD ist z. B. in der TROS Laserstrahlung beschrieben.

- Objekte, die eine spiegelnde Reflexion hervorrufen können, sind bei der Festlegung des Lasergefahrenbereiches zu berücksichtigen, ggf. zu entfernen oder mit nicht reflektierendem Material abzudecken. Der Lasergefahrenbereich ist abzugrenzen und mit Warnzeichen und Hinweisschildern (Anlage 5 der TROS Laserstrahlung Teil Allgemeines) so zu kennzeichnen, dass niemand unbeabsichtigt in den Lasergefahrenbereich gelangen kann. Sofern eine Kennzeichnung nicht möglich oder wegen zu kurzer Distanz nicht sinnvoll ist oder durch Kennzeichnung kein ausreichender Schutz Unbeteiligter gewährleistet werden kann, ist der Lasergefahrenbereich lückenlos (z. B. durch das Betriebspersonal, ggf. durch Posten) zu überwachen.
- Bei der Festlegung des Lasergefahrenbereichs ist der wirksame Strahlenkegel um eine horizontale und eine vertikale Pufferzone zu erweitern, weil es beim Ausrichten des Laserstrahls zu Fehlern kommen kann. Diese Pufferzone gehört zum Lasergefahrenbereich und ist bei der Bemessung von Strahlfängern zu berücksichtigen.
- Im Lasergefahrenbereich darf optisches Gerät mit vergrößernder Wirkung zur Beobachtung nur dann benutzt werden, wenn es mit ausreichenden Laserschutzfiltern versehen ist.
- Der Laserbetrieb ist durch ein optisches Signal anzuzeigen. Dies hat rechtzeitig vor Inbetriebnahme zu geschehen, damit alle Anwesenden Schutzmaßnahmen treffen können. Das Signal muss während des gesamten Laserbetriebs andauern.

Lasereinrichtungen der Klassen 3R und 3B

- Vor Inbetriebnahme der Lasereinrichtung ist der Lasergefahrenbereich im Gelände festzulegen. Strahlfänger natürlicher oder künstlicher Art können dabei berücksichtigt werden. Objekte, die spiegelnde Reflexionen hervorrufen können, sind zu berücksichtigen, ggf. zu entfernen oder mit nichtreflektierendem Material abzudecken.
- Wenn der Lasergefahrenbereich sich über das Betriebsgelände hinweg in Bereiche erstreckt, die allgemein zugänglich sind, sind die Auflagen der genehmigenden Stellen einzuhalten. Bereiche, die nicht bestrahlt werden dürfen, sind in DIN EN 60825-12 „Sicherheit von optischen Freiraumkommunikationssystemen“ für die Informationsübertragung benannt.
- Der Lasergefahrenbereich ist abzugrenzen und mit Warnzeichen und Hinweisschildern zu kennzeichnen.

- Es ist so zu kennzeichnen, dass niemand unbeabsichtigt in den Lasergefahrenbereich gelangen kann.
- Ist eine Kennzeichnung nicht möglich oder kann durch die Kennzeichnung kein ausreichender Schutz Unbeteiligter erzielt werden, so ist der Lasergefahrenbereich lückenlos (z. B. durch Posten) zu überwachen.
- Bei der Festlegung des Lasergefahrenbereichs ist der wirksame Strahlenkegel um eine horizontale und eine vertikale Pufferzone zu erweitern, weil es beim Ausrichten des Laserstrahls zu Fehlern kommen kann. Diese Pufferzone gehört zum Lasergefahrenbereich und ist bei der Bemessung von Strahlfängern zu berücksichtigen.
- Zur Begrenzung des Lasergefahrenbereichs sollen technische Maßnahmen, wie Sperrern oder Verriegelungen verwendet werden, die den horizontalen und vertikalen Schwenkbereich der Lasereinrichtungen eingrenzen.
- Im Lasergefahrenbereich darf optisches Gerät mit vergrößernder Wirkung nur dann benutzt werden, wenn es mit ausreichenden Laserschutzfiltern versehen ist.
- Personen, die den Lasergefahrenbereich innerhalb des Augensicherheitsabstands (NOHD) betreten müssen, müssen Laser-Schutzbrillen tragen, die auf Wellenlänge und Laserleistung abgestimmt sind. Jeder Benutzer und jede Benutzerin einer Laser-Schutzbrille hat sich vor Gebrauch zu vergewissern, dass an der Brille keine Veränderungen erkennbar sind, die den Schutz vor Laserstrahlung beeinträchtigen können (z. B. Sprünge, Farbveränderungen). Solche Veränderungen sind unverzüglich dem bzw. der Laserschutzbeauftragten zu melden. Soweit in den systemgebundenen Sicherheitsbestimmungen angegeben, sind zusätzlich Körperschutzmittel zum Schutz der Haut zu verwenden.
- Der Laserbetrieb ist durch ein optisches Signal anzuzeigen. Dies hat rechtzeitig vor Inbetriebnahme zu geschehen, damit alle Anwesenden Schutzmaßnahmen treffen können. Das Signal muss während des gesamten Laserbetriebs andauern.
- Der Laserbetrieb ist einzustellen, sobald sich Fahrzeuge (einschließlich Luft- und Wasserfahrzeuge) oder ungeschützte Personen dem Lasergefahrenbereich nähern.

Lasereinrichtungen der Klasse 4

Für Lasereinrichtungen der Klasse 4 gelten die gleichen Schutzbestimmungen wie für die Klasse 3B. Zusätzlich sind bei dieser Klasse diffuse Reflexionen sowie Brand- und Explosionsgefahren als Gefahrenquellen zu berücksichtigen.

Während sich Teil 1 der Normenreihe DIN EN 60825 an den Hersteller richtet, sind in Teil 14 (DIN EN 60825 Bbl 14 (VDE 0837 Bbl 14)) empfohlene Schutzmaßnahmen angeführt, die der Anwender umsetzen kann.

Hinweis: DIN EN 60825 Beiblatt 14:2006-07 (VDE 0837 Beiblatt 14:2006-07) "Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 14: Ein Leitfaden für Benutzer (IEC/TR 60825-14:2004)" wurde zurückgezogen.

Tabelle 11: Bauliche und konstruktive Schutzmaßnahmen

Bauliche- /konstruktive Schutzmaßnahmen							
Sicherheitsmaßnahmen	Laser-Einrichtung (Klasse)						
	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Wände					matt, hell, diffus reflektierend		
Abschirmungen					große spektrale Absorption bei der Wellenlänge der Laser und wirksam gegen Sekundärstrahlung		
Laserbereich					Kennzeichnung der Grenzen		
Strahlwarnung; Emissionswarnanzeige					optisch oder akustisch an den Zugängen; auf dem Laser; bei 3R nur bei unsichtbarer Strahlung		
Not-Aus-Schalter	abhängig von einer produktspezifischen Gefährdungsanalyse (siehe Maschinenrichtlinie Abs. 1.2.4 der Anlage)						
Fernverriegelungs- einrichtung	erforderlich nur, wenn ein Klasse 3B- oder 4-Laser eingebaut ist				an Türkontakt oder zusätzl. NOT-AUS anschließen		
Schutzgehäuse	Laser Klasse 1 anstreben						
Sicherheitsverriegelung					zuverlässige Ausführung (siehe Merkblatt: Sicherheitsgrenztaster)		
Schlüsselschalter					berechtigter Personenkreis; abziehen, wenn Laser außer Betrieb		
Spezifizierung: Interlock; Not-Aus, Türkontakt (Fernverriegelung)					Kategorisierung des Eingangs für den Interlock, des Türkontaktes und des Not -Aus entsprechend der DIN EN 13849-1		
Beobachtungsoptik und Beobachtungsfenster			Einbau von Laserschutzfiltern; GZS der Klasse 1 einhalten (EGW (0,25 s; 2 s; 100 s) einhalten)				

Tabelle 12: Organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen

Organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen							
Sicherheitsmaßnahmen	Laser-Einrichtung (Klasse)						
	1	1M	2	2M	3R	3B	4
Laserschutzbeauftragter *)	i. a. nicht erforderlich				schriftliche Bestellung*)		
Laserbereich	i. a. nicht erforderlich, wenn die Strahlung von Lasern der Klasse 1, 1M, 2 oder 2M nicht im Arbeits- oder Verkehrsbereich verläuft				Grenzen festlegen, u. U. zeitlich begrenzen; z. B. Wartung mit beweglichen Abschirmungen (siehe auch DIN EN 12254)		
Laser-Schutzbrillen und Laser-Justierbrillen	nicht erforderlich, wenn nicht absichtlich in den Laserstrahl geblickt werden muss				erforderlich; eventuell Raumhelligkeit erhöhen		
Unterweisung	erforderlich; Bestätigung mit Unterschrift; mindestens einmal jährlich						
Strahlwege	-	Den Strahl am Ende seines zweckdienlichen Weges blockieren, spiegelnde Reflexionen vermeiden					
<p>*) Der Laserschutzbeauftragte unterstützt den Unternehmer/Arbeitgeber bei der Überwachung des sicheren Betriebes der Laseranlage, für die er bestellt wurde. Der Laserschutzbeauftragte muss erfolgreich an einem Kurs zur Erlangung der besonderen Fachkenntnisse für Laserschutzbeauftragte teilgenommen haben (siehe OStrV).</p> <p>Für die Schweiz gilt: Der Einsatz eines Laserschutzbeauftragten ist in der Schweiz für Laser der Klasse 3B und 4 Pflicht. Der Laserschutzbeauftragte muss im Besitz der nötigen Kenntnisse über Lasersicherheit sein, um seine Aufgabe erfüllen zu können. Wie er sich diese anzueignen hat, ist nicht Gegenstand einer gesetzlichen Vorschrift.</p>							

11 Besondere Aspekte beim Einsatz des Lasers in der Medizin

Bei in der Medizin eingesetzten Lasern muss zusätzlich das Medizinprodukte-Gesetz und die Medizinprodukte-Betreiberverordnung berücksichtigt werden. Das bedeutet unter anderem, dass bei bestimmten Anwendungen nur bauartzugelassene Geräte benutzt werden dürfen.

Schon kurz nach der erstmaligen Konstruktion des Lasers vor fast 60 Jahren wurde der Laser in der Medizin erfolgreich eingesetzt. Heute findet der Laser in nahezu allen medizinischen Disziplinen vielfältige Anwendung, sowohl in der Diagnose, als auch in der Therapie. Für die Anwendung von Lasern in der Medizin stehen verschiedene Lasertypen in einem großen Wellenlängenbereich von 193 nm bis 10,6 µm und mit Leistungen von einigen Milliwatt bis ca. 250 W zur Verfügung.

Die Wahl eines geeigneten Lasers für eine medizinische Anwendung wird bestimmt durch (a) die Absorptionscharakteristika des zu behandelnden Gewebes, (b) die Laserwellenlänge, (c) die zeitlich applizierte Energie (Strahlleistungsdichte, Gewebeoberflächenenergiedichte und Expositionsdauer), sowie (d) dem Applikationsmodus der Energie (CW oder gepulste Strahlung und direkter Kontakt oder kontaktlos mit dem Gewebe).

Gegenüber herkömmlichen inkohärenten optischen Strahlenquellen verfügt der Laser über sehr hohe Leistungsdichten und die Fähigkeit, ultrakurze Impulse im Bereich von bis zu 10^{-15} s auszusenden. Auf diese Weise ist es erst möglich geworden, mit einer optischen Strahlenquelle Gewebe schonend abzutragen und Gewebe präzise zu schneiden. Weiterhin ist es möglich, über die Einkopplung hoher Leistungen in Lichtwellenleiter endoskopisch Anwendungen vornehmen zu können.

Mit einer Laserbehandlung kann der Ort der Applikation exakt bestimmt und das Therapievolumen laufend kontrolliert werden mit einer geringen mechanischen Traumatisierung des umliegenden Gewebes. Welche Einsatzmöglichkeiten der Laser mittlerweile in der Medizin hat, zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13: Einsatz gebräuchlicher Laser in verschiedenen Medizindisziplinen

	Lasertypen	Hauptindikationen
Dermatologie	Gepulster Farbstoff, CO ₂ , Alexandrit, Argon, Diode, Rubin, Nd:YAG, Excimer	Gefäßläsionen, benigne und maligne Tumoren, pigmentierte Läsionen, Tattoos, kosmetische Korrekturen
Ophthalmologie	Rubin, Argon, Nd:YAG, Diode, Excimer	diabetische Retinopathie, Hornhautanomalie, altersbedingte Makuladegeneration
Zahnheilkunde	Argon, KTP (Frequenzverdoppelter Nd:YAG), He:Ne, Diode, CO ₂ , ErCr:YSGG, Er:YAG, Nd:YAG	Karies, Parodontits, entzündete Wurzelkanäle, Weichgewebechirurgie, Zahnbleichen
HNO-Heilkunde	CO ₂ , KTP, Argon, Nd:YAG, Ho:YAG, Diode	Polypen, Leukoplakie, Stenosen, kapilläre Hämangiome
Gastroenterologie	Nd:YAG, Diode	Hämostase, Gefäßläsionen, Tumorentfernung, Ösophagus Dysplasie, Fragmentierung von Gallensteinen
Urologie	Ho:YAG, KTP, gepulster Farbstoff	Lithotripsie, benigne Prostatahyperplasie, Prostatatumor, Harnblasentumor
Gynäkologie	Nd:YAG, CO ₂ , KTP, Farbstoff, Diode	Kondylom, Leukoplakie, Hysterektomie, Endometriose, Ovarialzysten
Herz-Kreislaufsystem	Argon, Excimer, Ho:YAG, CO ₂	Atherosklerotische Läsionen, Thrombus, transmyokardiale Revaskularisation, perkutane myokardiale Revaskularisation
Neurochirurgie	CO ₂ , Nd:YAG, Diode, Argon	Meningiom, Neurom, Spinaltumor, Metastasen, vaskuläre Fehlbildungen, stereotaktische Neurochirurgie
Orthopädie	Nd:YAG, Ho:YAG	Schneiden/Abtragen von Hart-/Weichgewebe, Knorpelglättung, Knie, Bandscheibenvorfall

Unter "optischer Diagnostik" versteht man eine Technik, mit der ohne Zerstörung die Struktur und Funktion eines Gewebes mittels bildgebender und spektroskopischer Verfahren wie Absorption, Reflexion, elastische Streuung und Raman-Streuung erfasst werden kann. Vorrangige Ziele sind Nachweis von malignem Gewebe, des Weiteren den aktuellen Stoffwechsel, Blutfluss und die aktuelle Medikamentenkonzentration überwachen zu können.

Neue Geräte werden immer kompakter, anwendungsvariabler und preisgünstiger. Femtosekundenlaser mit hohen Leistungsdichten aber geringen Energien werden eine präzise Mikrochirurgie ohne signifikante Gewebeaufheizung ermöglichen. Faserlaser mit unterschiedlichen Wellenlängen im Dauerstrich- oder gepulsten Modus werden ohne den bisher erforderlichen optischen Resonator zur Laserstrahlungserzeugung konstruiert werden können. Festkörperlaser und zunehmend Halbleiterlaser werden demnächst mit höherer Ausgangsleistung und allen erforderlichen Wellenlängen im sichtbaren und nahen infraroten Bereich zur Verfügung stehen. Diagnostische Laseranwendungen wie in vivo Spektroskopie und bildgebende Systeme werden zukünftig häufiger mit therapeutischen Laseranwendungen kombiniert werden. Aber auch Weiterentwicklungen von leistungsstarken nicht-kohärenten Strahlungsquellen, wie z. B. gepulste Blitzlichtlampen und LED werden in einigen Anwendungsbereichen den Laser ersetzen.

Wegen der leichten Zugänglichkeit der Haut hat die Prüfung der Anwendbarkeit des Lasers in der Medizin im dermatologischen Bereich von jeher eine Vorreiterrolle in der Medizin gehabt. Bis in die 90er Jahre standen nur Laser zur Verfügung, deren Wirkung vornehmlich auf dem thermischen Effekt beruhte. Daher waren Behandlungen von Hautläsionen oft mit ungewollten Nebenwirkungen wie z. B. einer Narbenbildung verbunden. Neuentwicklungen der letzten Jahre erlauben es, dass mit einer Vielzahl von Wellenlängen, Impuls- und Wiederholraten viel besser auf die Anforderungen der Behandlung unter Schonung der gesunden Haut eingegangen werden kann. Allerdings ermöglicht es, auch nicht speziell ausgebildeten Personen, diese mittlerweile durchaus preisgünstigen Laser für die verschiedensten kosmetischen Korrekturen verwenden zu können. Zur Vermeidung von Behandlungsfehlern und zur Beherrschung von Nebenwirkungen, Begleitreaktionen sowie Allergien sollte die Behandlung jedoch nur unter der direkten Aufsicht von lasererfahrenen Fachärzten durchgeführt werden. Dies setzt ein erfolgreich abgeschlossenes Medizinstudium, eine mehrjährige Facharztausbildung und die umfangreiche Erfahrung mit verschiedenen Lasersystemen voraus.

Die wichtigsten Vorteile einer thermischen Lasertherapie sind eine präzise, blutstillende und sterile Schneidetechnik, geringere Ödem- und Narbenbildung, geringere Schmerzbelastung des Patienten und eine verkürzte Heilung. Die Vorteile der Photodynamischen Therapie liegen bei einer hohen Selektivität und fehlenden Toxizität des Photosensitizers in der Kombination der Therapie mit begleitender Diagnose (z. B. Fluoreszenz) und der Wiederholbarkeit trotz begrenzendem Eindringvermögen der Strahlung in das Gewebe. Der Erfolg einer Laseranwendung hängt aber in erster Linie davon ab, inwieweit ein fundiertes Wissen über die Wirkungen von optischer Strahlung auf biologisches Gewebe vorliegt und welcher für das entsprechende Krankheitsbild geeignete Laser einzusetzen ist. Ziel ist es ja im Rahmen einer therapeutischen Behandlung, die applizierte Laserstrahlung nur in dem Maße anzuwenden, dass der beabsichtigte Effekt eintritt und zwar mit minimalen Nebenwirkungen und Langzeitrisiken für den Patienten. Dazu bedarf es eines speziell geschulten Mediziners.

Weitere Informationen sind z. B. in der FA-Information F 05 des FA ET „Betrieb von Laser-Einrichtungen für medizinische und kosmetische Anwendungen“ (Stand: 11/2009) der DGUV (www.bgetem.de) veröffentlicht [26].

12 Besondere Aspekte beim Einsatz von Lasern als Verbraucherprodukt

Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)

Lasere finden zunehmend im privaten Bereich Anwendung, z. B. als Laserpointer, Justierlaser, Distanzmessgeräte, Laserwasserwaagen, Laser für Astronomie-zwecke, Motivlaser sowie Distanzmess- und Nivelliergeräte und auch für Showzwecke. Diese werden oftmals von Personen ohne ausreichende Kenntnisse über die Gefährdungen durch Laserstrahlung eingesetzt. Für die Marktaufsicht war es schwierig zu beurteilen, ob von diesen Produkten eine Gefährdung ausgeht, denn es sind auf dem Markt auch Laser höherer Leistung anzutreffen. Daraufhin wurde auf Anregung des Landesinstitutes für Gesundheit und Arbeit des Landes Nordrhein-Westfalen (LIGA.NRW) und auf Initiative der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin nach § 12 Abs. 2 des damaligen Geräte- und Produktsicherheitsgesetzes (GPSG; heute Produktsicherheitsgesetz, ProdSG) unter Beteiligung von Vertretern der Marktaufsicht, der Berufsgenossenschaft BG ETEM, Herstellern und Experten eine Technische Spezifikation mit dem Titel „Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)“ [27] zur Bewertung von Lasern erstellt.

Lasere-Produkte mit geringer Leistung sind meist nur batteriebetrieben (typischerweise 3 V - 12 V) und unterliegen nicht den aufgeführten Verordnungen. Für diese Produkte gelten die grundlegenden Festlegungen nach § 3 Absatz (2) des ProdSG und hier findet die technische Spezifikation ihre Anwendung.

Diese technische Spezifikation zur Risikobewertung von Verbraucherprodukten, die Laser sind oder beinhalten, richtet sich an Hersteller, Bevollmächtigte und Einführer. Sie konkretisiert Anforderungen an Laser als bzw. in Verbraucherprodukte(n), damit sowohl bei bestimmungsgemäßer Verwendung als auch bei vorhersehbarer Fehlanwendung die Sicherheit und Gesundheit von Verwendern oder Dritten nicht gefährdet wird.

Der Anwendungsbereich der Technischen Spezifikation ist wie folgt festgelegt:

Es dürfen nur nachstehende Laser als bzw. in Verbraucherprodukte(n) in den Verkehr gebracht werden:

- die nach der DIN EN 60825-1 klassifiziert sind und
- den Laserklassen 1, 1M, 2 oder 2M entsprechen.

An die Klassen sind für den Hersteller von Laserprodukten bestimmte Anforderungen geknüpft, z. B. an die Konstruktion und an die Benutzerinformation. In der Norm sind für die Laserklassen 1, 1M, 2 oder 2M jedoch über die Benutzerinformationen hinaus keine sicherheitstechnischen Anforderungen für die Verbraucherprodukte festgelegt.

Lasere der Klassen 3R, 3B und 4 dürfen nicht als Verbraucherprodukt im Sinne des ProdSG auf dem Markt bereitgestellt werden bzw. zum Einsatz kommen. Bei Lasern der Klassen 3R, 3B und 4 ist die zugängliche Laserstrahlung gefährlich für das Auge und bei hoher Leistung für die Haut. Solche Laser sind nur unter Anwendung von speziellen Schutzmaßnahmen (s. DGUV Vorschrift 11, Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ BGV B2 und Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung, OStrV) im gewerblichen Bereich einsetzbar, da die Hersteller, ihre Bevollmächtigten und die Einführer von solchen Lasereinrichtungen nicht sicherstellen können, dass diese Produkte sicher zur Anwendung kommen.

Bei der Klassifizierung nach DIN EN 60825-1 sind die ungünstigsten Bedingungen zu berücksichtigen (z. B. volle Batterien, erhöhte Netzspannung von 250 V) ggf. Schutzschichten an Schaltern die erst nach 100-facher Benutzung versagen.

Anmerkung: Für die „Sicherheit von Laserprodukten - Besondere Anforderungen an Verbraucher-Laser-Produkte“ gibt es zur Zeit der Drucklegung dieses Leitfadens die E DIN EN 50689.

In der Technischen Spezifikation ist festgelegt, dass sie nicht für Produkte gilt, die speziellen

europäischen Harmonisierungsrechtsvorschriften und den sie umsetzenden nationalen Rechtsvorschriften unterliegen.

Danach gilt die Technische Spezifikation nicht für:

- Produkte, für die Rechtsverordnungen nach § 8 Abs. 1 ProdSG bestehen wie z. B.:
 - Medizinproduktegesetz
 - Niederspannungsverordnung
 - Spielzeugverordnung
 - Maschinenverordnung.
- Produkte, für die harmonisierte Normen bestehen wie z. B.:
 - DIN EN 60065 „Audio-, Video- und ähnliche elektronische Geräte – Sicherheitsanforderungen“
 - DIN EN 62115 „Elektrische Spielzeuge – Sicherheit“
 - DIN EN 60950-1 „Einrichtungen zur Informationstechnik“

Produkte mit Lasern, die in die Klassen 3R, 3B und 4 eingestuft sind, dürfen nicht als Verbraucherprodukte in den Verkehr gebracht werden.

Bei der Laser-Klassifizierung wird die zugängliche Strahlung zu Grunde gelegt. Bei einem gekapselten Laser handelt es sich daher um einen Laser der Klasse 1, der einen Laser höherer Klasse beinhalten kann. In der Benutzerinformation ist hierzu ein Hinweis zu geben, dass ein Laser mit höherer Leistung eingebaut ist. Das Schutzgehäuse darf nur vom Fachpersonal mit speziellem Werkzeug unter Berücksichtigung von besonderen Schutzmaßnahmen entfernt werden. Die Anwendungen liegen im Multi-Millionen-Bereich, da z. B. in jedem PC, CD-Player, DVD-Brenner und in jeder Spielkonsole Laser zum Einsatz kommen. Der Einsatz von eingehausten Lasern wird als sicher angesehen und erfordert keine Verbote oder Prüfungen. Durch Manipulation am Gerät durch den Anwender erlischt in der Regel die Gewährleistung der Sicherheit durch den Hersteller.

Die Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n) wurde vom Ausschuss für technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte ermittelt und im Bundesanzeiger Nr. 97 vom 2. Juli 2010, S. 2290, bekanntgemacht (Stand: 30. Oktober 2013).

Die Technische Spezifikation ist auf der Homepage der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin als Download hinterlegt [27]:

<http://www.baua.de>

Blendung durch Laserpointer

Gängige Laserpointer können eine geringe Strahldivergenz von knapp über 1 mrad haben. Das heißt, bei einer Divergenz von 1 mrad weitet sich der Strahl mit einem Durchmesser von 1 mm auf einer Entfernung von 1 km auf 1 m auf. Zur Abschätzung der Blendung kann der in der DGUV Information 203-036 (BGI 5007) „Lasereinrichtungen für Show- und Projektionszwecke“ [28] angegebene Wert von 40 μ W herangezogen werden. Wichtige Hinweise zur Blendung sind im Forschungsbericht "Untersuchungen zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen" [29] enthalten. Dort sind auch Angaben von geblendeten Piloten zu finden, wonach Blendereignisse bereits bei ca. 0,5 μ W aufgetreten sind.

Die Berechnungen zur Reichweite von Lasern, die eine Gefährdung durch Blendung hervorrufen können, sind hierzu sehr aufwendig. Die Reichweite ist von der Laserleistung, der Wellenlänge und der verwendeten Optik abhängig.

Eine grobe Abschätzung zeigen folgende drei Beispiele:

- Laserpointer mit einer Ausgangsleistung von 1 mW verursacht Blendung noch in einem Abstand von etwa 50 m - 100 m.
- Laserpointer mit einer Ausgangsleistung von 50 mW verursacht Blendung noch in einem Abstand von 500 m - 1000 m.
- Laserpointer mit einer Ausgangsleistung von 500 mW verursacht Blendung noch in einem Abstand von bis zu 5 km.

Die Gefährdung kann durch den Einsatz von einfachen Optiken (Linsensysteme) typischerweise um einen Faktor 10 erhöht werden.

Bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, wie beim Fliegen eines Luftfahrzeugs (Flugzeug oder Hubschrauber) oder beim Lenken von Fahrzeugen (z. B. PKW, LKW, Bus, Straßenbahn, U-Bahn, Zug) kann durch Blendung von Lasern ein erhebliches Gefährdungspotenzial entstehen. Die Verbreitung von Lasern mit zunehmend höheren Leistungen steigt derzeit weiter und stellt eine wachsende potenzielle Gefährdung durch Schädigung der Augen und durch Blendung dar. Dabei kann das Sehvermögens, also insbesondere die Sehschärfe und das Farbsehen, vor allem bei Dunkelheit ganz besonders beeinträchtigt werden.

Die relativ leichte Zugänglichkeit bezüglich handgehaltener Laser (so genannte Laserpointer) relativ hoher Leistungen kann zu einer Veränderung der Sicherheitslage führen. Dabei kann es sich einerseits um unbeabsichtigte und unbedachte Laserstrahlexpositionen handeln; es ist aber auch nicht auszuschließen, dass solche Lasergeräte unkontrolliert oder gar fahrlässig z. B. auf Fahr- bzw. Flugzeuge gerichtet und dann z. B. Piloten oder Fahrzeuglenker mehr oder weniger stark geblendet werden, wie dies bereits wiederholt geschehen ist. Hatte man bis vor ein paar Jahren zunächst nur rote Laserpointer mit allenfalls ein paar Milliwatt an optischer Leistung, so sind heute Laserpointer nicht nur bei der besonders beliebten Farbe Grün (532 nm, als frequenzverdoppelte Infrarot-Laser), sondern mittlerweile auch im blauen Wellenlängenbereich bei 445 nm und 405 nm erhältlich. Dabei werden teilweise schon handgehaltene Laser mit Leistungen von bis zu zwei Watt als Verbraucherprodukte illegal im Handel angeboten.

Während sich Flugzeuge im Allgemeinen beim Start und bei der Landung relativ weit weg von Personen befinden, die z. B. mit einem Laser auf Flugzeuge „zielen“ und die von einem Laserstrahl getroffenen Piloten im Cockpit zwar durchaus erschrecken und ablenken können, aber eigentlich keiner Gefährdung durch direkte Einwirkung der Laserstrahlung auf das Auge aussetzen, wenn man einmal von der Verwendung von Laserstrahlung aus Geräten mit Ausgangsleistungen im Wattbereich absieht, so werden sie aber dennoch durch die mit einer Blendung verbundenen Nachbilderscheinungen unter Umständen erheblich im Sehvermögen beeinträchtigt. Zurzeit ist das Wissen um solche Effekte insbesondere soweit es die Wirkung einer Blendung bei Dunkelheit betrifft, noch sehr gering und geeignete Abwehrmaßnahmen fehlen eigentlich.

An Hubschrauber aller Art und Straßen- sowie Schienenfahrzeuge können Personen mit Laserpointern aber meist viel näher herankommen, so dass in diesen Fällen beim Einsatz entsprechend leistungsstarker Geräte zur Blendung eine direkte Schädigung der Augen durch die Laserstrahlung durchaus hinzukommen kann, weil in diesen Fällen der Strahlquerschnitt noch so klein sein kann, dass die Leistungsdichte am Auge für eine Schädigung noch ausreicht, und zwar auch dann, wenn die Exposition nur relativ kurzzeitig erfolgt und das aktive Kopfwegdrehen und Augenschließen unter Umständen nicht mehr ausreichend schützen kann.

13 Besondere Aspekte bei der Lasermaterialbearbeitung

Generelles

Die Leistung von Lasern zur Materialbearbeitung ist – in der Regel – so hoch, dass der Laserstrahl ohne zusätzliche Abschirmung immer Körperverletzungen hervorruft. Deshalb muss verhindert werden, dass Menschen in den Bereich der Laserstrahlung gelangen.

Zum Schutz von Menschen werden üblicherweise Schutzwände verwendet. Bezüglich der Eignung werden diese nach DIN EN 60825-4 getestet. Die sicherheitsbezogenen Wirkungsmechanismen sind: Kühlung durch Wärmestrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, Wärmeleitung und Wärmekapazität. Reflexion kann nur als Schutzmechanismus akzeptiert werden, wenn nichtlineare Effekte ausgeschlossen werden können. Weitere Informationen sind in [2] – [8] zu finden.

Laserschutzfenster in Einhausungen sind durchsichtige Schutzwandelemente und bezüglich ihrer Eignung ebenfalls nach der DIN EN 60825-4 zu testen. Prüfnachweise nach DIN EN 207 oder DIN EN 12254 sind nicht ausreichend.

Laser-Schutzbrillen sind nicht dafür bestimmt direkt in einen Laserstrahl mit hoher Leistungsdichte zu blicken. Sie sollen vor zufällig reflektierter oder gestreuter Laserstrahlung schützen. Empfehlenswert ist hier die Verwendung von Videosystemen, so dass Personen nicht optischen Gefahren und aus dem Bearbeitungsprozess entstehenden Gefahrstoffen ausgesetzt sind. Diese Belastungsgrenzen von Laser-Schutzbrillen werden vom Hersteller in der Regel nicht direkt angegeben und sollten vom Fachkundigen ggf. beim Hersteller nachgefragt werden. Charakteristische Größen, die die Gefährdung durch Hochleistungslaser beschreiben, sind nicht nur die Laserleistung bei CW-Lasern. Anwendungsspezifisch kann noch der Strahlpropagationsfaktor hinzukommen [7].

Ultra-Kurzpuls Laser

In den Jahren 2006 bis 2015 hat es erhebliche Fortschritte im Bereich Strahlquellenentwicklung gegeben (mittl. Laserleistungen von 5 W bis zu 1 kW). Deshalb muss den nichtlinearen Effekten Selbstfokussierung, „Weißlichtgeneration“ und Erzeugung ionisierender Strahlung Beachtung geschenkt werden [2, 5, 9].

Expositionsgrenzwerte existieren nur bis zu 100 fs. Allerdings sind Strahlquellen mit Impulsdauern von < 10 fs mehrerer Hersteller schon verfügbar. Es wird empfohlen die Expositionsgrenzwerte für $1 \cdot 10^{-13}$ s anzuwenden.

14 Expositionsgrenzwerte in der Schweiz

14.1 Allgemeine Bemerkungen

Als Werte für die maximal zulässige Bestrahlung im Teil 1 der IEC 60825 (2014) wurden die von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) veröffentlichten Expositionsgrenzwerte übernommen [12]. Die MZB-Werte sind so festgelegt, dass sie unterhalb der bekannten Gefahrenpegel liegen. Sie basieren auf den besten zur Verfügung stehenden Informationen aus experimentellen Studien. Die MZB-Werte sollten als Richtwerte bei der Kontrolle von Bestrahlungen, für die Konstruktion eines sicheren Produktes angesehen werden und nicht als präzise definierte Abgrenzung zwischen sicheren und gefährlichen Pegeln. In jedem Fall sollte die Einwirkung der Laserstrahlung so gering wie möglich sein.

Bei Bestrahlung mit mehreren Wellenlängen sollte ein additiver Effekt auf einer proportionalen Basis der spektralen Wirksamkeit entsprechend den MZB-Werten von den Tabellen 14.1, 14.2, 14.3, 14.4 und 14.5 angenommen werden, wenn die Spektralbereiche für die Einwirkung auf das Auge und für die Einwirkung auf die Haut additiv sind. Sind die ausgestrahlten Wellenlängen nicht additiv, dann sollten die Gefahren getrennt bewertet werden.

Tabelle 14.1: Expositionsgrenzwerte (EGW \triangleq MZB) der Hornhaut für $C_6 = 1$ ausgedrückt in Bestrahlung oder Bestrahlungsstärke ^{a, b}

Wellenlänge λ in nm	Expositionsdauer t in s										
	10^{-13} bis 10^{-11}	10^{-11} bis 10^{-9}	10^{-9} bis 10^{-7}	10^{-7} bis 5×10^{-6}	5×10^{-6} bis 13×10^{-6}	13×10^{-6} bis 1×10^{-3}	1×10^{-3} bis 10	10 bis 10^2	10^2 bis 3×10^4		
180 bis 302,5	$30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$										
302,5 bis 315	$3 \times 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		thermische Gefährdung ^d ($t \leq T_1$) $C_1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$					photochemische Gefährdung ^d ($t > T_1$) $C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$
315 bis 400			$C_1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$					$10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			
400 bis 450	$1 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$18 t^{0,75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$100 C_3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ und ^c $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$C_3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$			
450 bis 500											
500 bis 700										$10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
700 bis 1 050	$1 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-3} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$18 t^{0,75} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				$10 C_4 C_7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$			
1 050 bis 1 400 ^e	$1 \times 10^{-3} C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-2} C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			$90 t^{0,75} C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$						
1 400 bis 1 500	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			$5 600 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				$1 000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
1 500 bis 1 800	$10^{13} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$								
1 800 bis 2 600	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			$5 600 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$					
2 600 bis 10^6	$10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		$100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$5 600 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$							

^a Für Korrekturfaktoren und Einheiten siehe Tabelle 9 in SN 60825-1 bzw. Tabelle 14.7; die Bestrahlungsstärke zum Vergleich mit den EGW wird über eine angemessene Blende gemittelt (siehe Tabelle 19, SN 60825-1 bzw. Tab 14.6)

^b Die EGW für geringere Entwicklungsdauern als 10^{-9} s und für Wellenlängen kürzer als 400 nm und größer als 1 400 nm wurden ermittelt, indem die entsprechenden Strahlengrenzwerte für 10^{-9} s berechnet wurden. Die EGW für kürzere Einwirkungsduern als 10^{-13} s wurden den entsprechenden EGW für 10^{-13} s gleichgesetzt.

^c Im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 500 nm treffen beide Grenzwerte zu und die Bestrahlung sollte keinen überschreiten.

^d UV-Laser mit wiederholenden Impulsen sollten keinen Grenzwert überschreiten.

^e Im Wellenlängenbereich zwischen 1 250 nm und 1 400 nm, können die in dieser Tabelle angegebenen Grenzwerte für den Schutz der Netzhaut die äußeren Augenpartien (Hornhaut, Iris) u. U. nicht adäquat beschützen und daher ist Vorsicht angebracht. Falls die Bestrahlung die Haut-EGW nicht überschreitet, besteht für die äußeren Augenpartien auch keinen Anlass zur Sorge.

Tabelle 14.2: Expositionsgrenzwerte durch ausgedehnte Quellen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 400 nm (Bereich der Netzhautgefährdung) ausgedrückt in Bestrahlung oder Bestrahlungsstärke^d

Wellenlänge λ in nm	Expositionsdauer t in s						
	10^{-13} bis 10^{-11}	10^{-11} bis $5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$ bis $1,3 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$ bis 10	10 bis 10^2	10^2 bis 10^4	10^4 bis 3×10^4
400 bis 700	$1 \times 10^{-3} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-3} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$18 t^{0,75} C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	400 nm bis 600 nm – photochemische Netzhautgefährdung ^a			
				$100 C_3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ mit $\gamma_{\text{ph}} = 11 \text{ mrad}$	$100 C_3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ mit $\gamma_{\text{ph}} = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad}$	$1 C_3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ mit $\gamma_{\text{ph}} = 110 \text{ mrad}$	
				<i>UND</i> ^b			
				400 nm bis 700 nm – thermische Netzhautgefährdung			
				$(t \leq T_2)$ $18 t^{0,75} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$18 C_6 T_2^{-0,25} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ $(t > T_2)$		
700 bis 1 050	$1 \times 10^{-3} C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-3} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$18 t^{0,75} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$18 C_4 C_6 T_2^{-0,25} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ $(t > T_2)$			
				$(t \leq T_2)$ $18 t^{0,75} C_4 C_6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			
1 050 bis 1 400 ^c	$1 \times 10^{-3} C_6 C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-2} C_6 C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$90 t^{0,75} C_6 C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$90 C_6 C_7 T_2^{-0,25} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ $(t > T_2)$			
				$(t \leq T_2)$ $90 t^{0,75} C_6 C_7 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			

ANMERKUNG 1 Die Expositionsgrenzwerte für Augengewebe können für ophthalmischen Instrumenten unterschiedlich sein – siehe ISO 15004-2.

^a Der Winkel γ_{ph} ist die Messbegrenzung des Empfangswinkels.

^b Im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 600 nm treffen beide Grenzwerte zu und die Bestrahlung sollte keinen überschreiten. Im Normalfall gelten photochemische Grenzwerte erst für längere Einwirkungsauern als 10 s; nichtsdestotrotz sollten im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 484 nm bei einer scheinbaren Quelle, die zwischen 1,5 mrad und 82 mrad groß ist, beide photochemischen Gefahrengrenzwerte $100 C_3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ für eine Einwirkungsdauer größer oder gleich 1 Sekunde angewandt werden.

^c Im Wellenlängenbereich zwischen 1 250 nm und 1 400 nm, können die in dieser Tabelle angegebenen Grenzwerte für den Netzhautschutz die äußeren Augenpartien (Hornhaut, Iris) nicht adäquat beschützen und daher ist Vorsicht angebracht. Falls die Bestrahlung die Haut-EGW nicht überschreitet, gibt es für die äußeren Augenpartien auch keinen Anlass zur Sorge.

^d Für eine kürzere Einwirkungsdauer als 0,25 s können die in dieser Tabelle angegebenen Grenzwerte für den Netzhautschutz die äußeren Augenpartien (Hornhaut, Iris) nicht adäquat beschützen und daher ist Vorsicht angebracht. Falls die Bestrahlung die Haut-EGW nicht überschreitet, gibt es für die äußeren Augenpartien auch keinen Anlass zur Sorge.

Tabelle 14.3: Expositionsgrenzwerte der Hornhaut nach Tabelle 14.1 ($C_6 = 1$) im Wellenlängenbereich 400 nm bis 1 400 nm ausgedrückt in Leistung oder Energie ^{a, b}

Wellenlänge λ in nm	Expositionsdauer t in s					
	10^{-13} bis 10^{-11}	10^{-11} bis $5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$ bis 13×10^{-6}	13×10^{-6} bis 10	10 bis 10^2	10^2 bis 3×10^4
400 bis 450	$3,8 \times 10^{-8}$ J	$7,7 \times 10^{-8}$ J	$7 \times 10^{-4} t^{0,75}$ J	$3,9 \times 10^{-3}$ J	$3,9 \times 10^{-3}$ J	$3,9 \times 10^{-5} C_3$ W
450 bis 500					$3,9 \times 10^{-3} C_3$ J und ^c $3,9 \times 10^{-4}$ W	
500 bis 700					Bei Messung und Bewertung von Laserstrahlung sind geeignete Laserleistungs-/ Laserenergiemessgeräte unter Beachtung der festgelegten Messbedingungen zu verwenden. Falls die Daten aus der Klassifizierung für Sicherheitsbetrachtungen nicht ausreichend erscheinen, sollten für Messungen und Bewertungen ggf. Spezialisten hinzugezogen werden (siehe Abschnitt 16, Adressen).	
700 bis 1 050	$3,8 \times 10^{-8}$ J	$7,7 \times 10^{-8} C_4$ J	$7 \times 10^{-4} t^{0,75} C_4$ J	$3,9 \times 10^{-4} C_4 C_7$ W		
1 050 bis 1 400 ^d	$3,8 \times 10^{-8} C_7$ J	$7,7 \times 10^{-7} C_7$ J		$3,5 \times 10^{-3} t^{0,75} C_7$ J		
ANMERKUNG Die in Leistung oder Energie ausgedrückte Exposition wird aus EGW bestimmt und ist diejenige Leistung oder Energie, die durch eine Blende mit einem Durchmesser von 7 mm tritt (die EGW dieser Tabelle wurden aus Tabelle 14.1 durch Multiplikation mit einer Blendenfläche mit einem Durchmesser von 7 mm abgeleitet).						
^a Für Korrekturfaktoren, siehe Tab. 14.7. ^b Die EGW für eine kürzere Einwirkungsdauer als 10^{-13} s, sind den EGW für 10^{-13} s gleichgesetzt. ^c Im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 500 nm treffen beide Grenzwerte zu und die Bestrahlung sollte keinen überschreiten. ^d Im Wellenlängenbereich zwischen 1 250 nm und 1 400 nm, können die in dieser Tabelle angebenen Grenzwerte für den Netzhautschutz die äußeren Augenpartien (Hornhaut, Iris) nicht adäquat beschützen und daher ist Vorsicht angebracht. Falls die Bestrahlung die Haut-EGW nicht überschreitet, gibt es für die äußeren Augenpartien auch keinen Anlass zur Sorge.						

Tabelle 14.4: Expositionsgrenzwerte nach Tabelle 14.2 (ausgedehnte Quellen) im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 400 nm (Bereich der Netzhautgefährdung) ausgedrückt in Leistung oder Energie ^{a, b, c, d, e, f, g}

Wellenlänge λ in nm	Expositionsdauer t in s							
	10^{-13} bis 10^{-11}	10^{-11} bis $5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$ bis 13×10^{-6}	13×10^{-6} bis 10	10 bis 10^2	10^2 bis 10^4	10^4 bis 3×10^4	
400 bis 700	$3,8 \times 10^{-8} C_6 J$	$7,7 \times 10^{-8} C_6 J$	$7 \times 10^{-4} t^{0,75} C_6 J$	400 nm bis 600 nm – photochemische Netzhautgefährdung ^{d, e}				
				$3,9 \times 10^{-3} C_3 J$ mit $\gamma_{ph} = 11 \text{ mrad}$	$3,9 \times 10^{-5} C_3 W$ mit $\gamma_{ph} = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad}$	$3,9 \times 10^{-5} C_3 W$ mit $\gamma_{ph} = 110 \text{ mrad}$		
				UND ^c				
				400 nm bis 700 nm – thermische Netzhautgefährdung				
				$(t \leq T_2)$ $7 \times 10^{-4} t^{0,75} C_6 J$			$7 \times 10^{-4} C_6 T_2^{-0,25} W$ $(t > T_2)$	
700 bis 1 050	$3,8 \times 10^{-8} C_6 J$	$7,7 \times 10^{-8} C_4 C_6 J$	$7 \times 10^{-4} t^{0,75} C_4 C_6 J$	$(t \leq T_2)$ $7 \times 10^{-4} t^{0,75} C_4 C_6 J$			$7 \times 10^{-4} C_4 C_6 T_2^{-0,25} W$ $(t > T_2)$	
1 050 bis 1 400 ^f	$3,8 \times 10^{-8} C_6 C_7 J$	$7,7 \times 10^{-7} C_6 C_7 J$	$3,5 \times 10^{-3} C_6 C_7 J$	$(t \leq T_2)$ $3,5 \times 10^{-3} t^{0,75} C_6 C_7 J$			$3,5 \times 10^{-3} C_6 C_7 T_2^{-0,25} W$ $(t > T_2)$	

Anmerkung 1 Die Expositionsgrenzwerte für bestimmte Augengewebeararten können bei Einsatz ophthalmischer Instrumenten unterschiedlich sein – siehe ISO 15004-2.

Anmerkung 2 Der Wert der Exposition in Leistung oder Energie ausgedrückt zum Vergleich mit den EGW, wird bestimmt als diejenige Leistung oder Energie, die durch eine Blende mit einem Durchmesser von 7 mm tritt (die EGW dieser Tabelle wurden Tabelle 14.2 entnommen mittels Multiplikation einer Blende mit einem Durchmesser von 7 mm).

^a Für Korrekturfaktoren, siehe Tabelle 14.7.

^b Die EGW für eine kürzere Einwirkungsdauer als 10^{-13} s, sind den EGW für 10^{-13} s gleichgesetzt.

^c Im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 600 nm treffen beide Grenzwerte zu und die Bestrahlung sollte keinen überschreiten.

^d Winkel γ_{ph} ist die Messbegrenzung des Empfangswinkels.

^e Werden Bestrahlungszeiten zwischen 1 s und 10 s verwendet für Wellenlängen zwischen 400 nm und 484 nm bei einer scheinbaren Quelle, die zwischen 1,5 mrad und 82 mrad groß ist, werden beide photochemischen Gefahrgrenzwerte von $3,9 \times 10^{-13} C_3 J$ auf 1 s erhöht.

^f Im Wellenlängenbereich zwischen 1 250 nm und 1 400 nm, können die in dieser Tabelle angebenen Grenzwerte für den Netzhautschutz die äußeren Augenpartien (Hornhaut, Iris) nicht adäquat beschützen und daher ist Vorsicht angebracht. Falls die Bestrahlung die Haut-EGW nicht überschreitet, gibt es für die äußeren Augenpartien auch keinen Anlass zur Sorge.

^g Für eine kürzere Einwirkungsdauer als 0,25 s können die in dieser Tabelle angebenen Grenzwerte für den Netzhautschutz die äußeren Augenpartien (Hornhaut, Iris) nicht adäquat beschützen und daher ist Vorsicht angebracht. Falls die Bestrahlung die Haut-EGW nicht überschreitet, gibt es für die äußeren Augenpartien keinen Anlass zur Sorge.

Tabelle 14.5: Expositionsgrenzwerte für die Einwirkung von Laserstrahlung auf die Haut ^{a, b}

Wellenlänge λ in nm	Einwirkungsdauer t in s					
	$< 10^{-9}$	10^{-9} bis 10^{-7}	10^{-7} bis 10^{-3}	10^{-3} bis 10	10 bis 10^3	10^3 bis 3×10^4
180 bis 302,5	$3 \times 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				
302,5 bis 315		$C_1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ($t \leq T_1$)	$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ($t > T_1$)		$C_2 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	
315 bis 400		$C_1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			$10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
400 bis 700	$2 \times 10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$200 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$1,1 \times 10^4 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$2\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
700 bis 1 400	$2 \times 10^{11} C_4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$200 C_4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$1,1 \times 10^4 C_4 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$2\,000 C_4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
1 400 bis 1 500	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5\,600 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ }^c$
1 500 bis 1 800	$10^{13} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$				
1 800 bis 2 600	$10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		$5\,600 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$		
2 600 bis 10^5	$10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$5\,600 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$			
^a Für Korrekturfaktoren und Einheiten siehe Tabelle 14.7. ^b Es gibt nur wenig Erfahrung über die Wirkung bei Einwirkungsdauern unter 10^{-9} s. Die EGW für diese Einwirkungsdauern wurden abgeleitet durch Beibehaltung der Bestrahlungsstärke bei 10^{-9} s. ^c Für bestrahlte Hautflächen größer als $0,1 \text{ m}^2$ wird der EGW auf $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ verringert. Zwischen $0,01 \text{ m}^2$ und $0,1 \text{ m}^2$ verändert sich der EGW umgekehrt proportional zur bestrahlten Hautfläche.						

14.2 Grenzblenden

Für alle Messungen und Berechnungen der Bestrahlungswerte sollte eine geeignete Blende verwendet werden. Dies ist die Grenzblende und sie ist bestimmt durch den Durchmesser einer kreisförmigen Fläche, über die die Bestrahlungsstärke oder Bestrahlung zu mitteln ist. Die Werte für die Grenzblenden sind in der Tabelle 14.6 angegeben. Wo die EGW für den Bereich der Netzhautgefährdung in Leistung oder Energie angegeben werden (Tabelle 14.3 oder 14.4), ist der Wert der Exposition in Leistung oder Energie auszudrücken und er wird bestimmt als diejenige Leistung oder Energie, die durch eine Blende mit einem Durchmesser von 7 mm tritt.

Für Bestrahlung durch wiederholt gepulste Laser im Wellenlängenbereich zwischen 1 400 nm und 10^5 nm wird die 1-mm Blende für die Bestimmung der Gefährdung aus einem einzelnen Impuls verwendet. Dagegen wird die 3,5-mm-Blende zur Bestimmung des EGW für Bestrahlungen von länger als 10 s verwendet.

Die Werte für die Bestrahlung der Augen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 400 nm werden mit einer Blende von 7 mm Durchmesser (Pupille) bestimmt. Der EGW sollte nicht korrigiert werden, um kleinere Pupillendurchmesser zu berücksichtigen.

Tabelle 14.6: Blendendurchmesser für die Messung der Bestrahlungsstärke und der Bestrahlung durch Laser

Wellenlängenbereich nm	Blendendurchmesser für mm	
	Auge	Haut
180 bis 400	1	3,5
≥ 400 bis 1 400	7	3,5
≥ 1 400 bis 10 ⁵	1 für $t \leq 0,35$ s 1,5 $t^{3/8}$ für $0,35$ s < t < 10 s 3,5 für $t \geq 10$ s	3,5
≥ 10 ⁵ bis 10 ⁶	11	11

ANMERKUNG Für Bestrahlung durch Mehrfachimpulse siehe Abschnitt 14.3.

14.3 Wiederholt gepulste oder modulierte Laser

Die folgenden Verfahren sollten zur Bestimmung der EGW bei Einwirkung von wiederholt gepulster Strahlung verwendet werden.

Die Bestrahlung durch irgendeine Gruppe von Impulsen (ohne Untergruppe von Impulsen in einem Impulszug) während irgendeiner gegebenen Zeit sollte den EGW für diese Zeit nicht überschreiten.

Der EGW für eine Bestrahlung der Augen für Wellenlängen unter 400 nm und oberhalb 1 400 nm sowie der EGW für eine Bestrahlung der Haut ist durch die Benutzung der restriktivsten der Anforderungen a) und b) bestimmt.

Der EGW für eine Bestrahlung der Augen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 400 nm ist durch die Benutzung der restriktivsten der Anforderungen a), b) und c) bestimmt. Die Anforderung c) gilt nur für die thermischen Netzhautgrenzwerte und nicht für die photochemischen Netzhautgrenzwerte.

- Die Exposition durch jeden Einzelimpuls einer Impulsfolge darf nicht den EGW für einen Einzelimpuls überschreiten.
- Die gemittelte Exposition durch eine Impulsfolge der Einwirkungsdauer T darf den EGW der Tabellen A.1, A.2 und A.3 (SN 60825-1; hier auch: Tab. 14.1, 14.2 und 14.3) für einen Einzelimpuls der Einwirkungsdauer T nicht übersteigen. Bei irregulären Impulsmustern (inklusive variierender Impulsenergie), muss T zwischen T_i und der höchsten angenommenen Einwirkungsdauer variieren. Bei regulären Impulsmustern ist es hinreichend über die höchste angenommene Einwirkungsdauer zu mitteln.
- Die Exposition je Impuls darf den EGW für einen einzelnen Impuls multipliziert mit dem Korrekturfaktor C_5 nicht überschreiten. C_5 ist nur anwendbar für Impulsdauern kürzer 0,25 s.

$$EGW_{\text{Einzelimpuls, Folge}} = EGW_{\text{Einzelimpuls}} \cdot C_5$$

Dabei ist:

$EGW_{\text{Einzelimpuls}}$ der EGW für einen Einzelimpuls;

$EGW_{\text{Einzelimpuls, Folge}}$ der EGW für einen Einzelimpuls in der Impulsfolge.

Sind die Impulsdauern $t \leq T_i$, dann gilt:

Für eine erwartete maximale Einwirkungsdauer kleiner oder gleich 0,25 s,

$$C_5 = 1, 0$$

Für eine erwartete maximale Einwirkungsdauer größer als 0,25 s

$$\text{wenn } N \leq 600 \quad C_5 = 1,0$$

$$\text{wenn } N > 600 \quad C_5 = 5 N^{0,25} \text{ mit einem kleinsten Wert von } C_5 = 0,4$$

Sind die Impulsdauern $t > T_i$, dann gilt:

wenn $\alpha \leq 5$ mrad:

$$C_5 = 1,0$$

wenn $5 \text{ mrad} < \alpha \leq \alpha_{\max}$:

$$C_5 = N^{0,25} \text{ wenn } N \leq 40$$

$$C_5 = 0,4 \text{ wenn } N > 40$$

wenn $\alpha > \alpha_{\max}$:

$$C_5 = N^{0,25} \text{ wenn } N \leq 625$$

$$C_5 = 0,2 \text{ wenn } N > 625$$

solange α nicht größer als 100 mrad und in allen Fällen $C_5 = 1,0$ ist.

N Die effektive Anzahl der Impulse in der Impulsfolge während der untersuchten Einwirkungsdauer, (wenn Impulse innerhalb von T_i (siehe Tabelle 2, SN 60825-1 bzw. Tab. 14.8) dann ist N kleiner als die tatsächliche Anzahl von Impulsen, siehe unten). Die maximale Einwirkungsdauer, die für die Bewertung betrachtet werden muss, ist für Wellenlängen zwischen 400 nm und 1 400 nm T_2 (siehe Tabelle 14.7) oder gleich der erwarteten Einwirkungsdauer, je nachdem, was kürzer ist.

Treten während der Zeitdauer T_i (siehe Tabelle 2, SN 60825-1 bzw. Tab. 14.8) Mehrfachimpulse auf, dann werden sie um N zu bestimmen, als ein einziger Impuls gezählt und die Energien der einzelnen Impulse werden zum Vergleich mit dem EGW für T_i addiert.

14.4 Messbedingungen

14.4.1 Allgemeines

Um die tatsächliche Bestrahlung zu bewerten, sollten die folgenden Messbedingungen verwendet werden.

14.4.2 Grenzblende

Bestrahlungswerte oder Bestrahlungsstärkewerte, die mit den entsprechenden EGW verglichen werden sollen, sind über eine kreisförmige Messblende zu mitteln, die den Grenzblenden von Tabelle 14.6 entspricht. Für Bestrahlung der Augen im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 400 nm wird ein minimaler Messabstand von 100 mm verwendet.

14.4.3 Empfangswinkel

a) Photochemische Grenzwerte für die Netzhaut:

Bei Messungen an Quellen, die hinsichtlich der photochemischen Grenzwerte (400 nm bis 600 nm) bewertet werden sollen, beträgt der Grenzempfangswinkel γ_{ph}

$$\text{für } 10 \text{ s} < t \leq 100 \text{ s:} \quad \gamma_{\text{ph}} = 11 \text{ mrad}$$

$$\text{für } 100 \text{ s} < t \leq 10^4 \text{ s:} \quad \gamma_{\text{ph}} = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad}$$

$$\text{für } 10^4 \text{ s} < t \leq 3 \times 10^4 \text{ s:} \quad \gamma_{\text{ph}} = 110 \text{ mrad}$$

Ist die Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle größer als der angegebene Grenzempfangswinkel γ_{ph} , dann sollte der Empfangswinkel nicht größer als die Werte sein, die für γ_{ph} festgelegt sind. Ist die Winkelausdehnung α der Quelle kleiner als der angegebene Grenzempfangswinkel γ_{ph} , dann sollte der Empfangswinkel die betrachtete Quelle voll erfassen, braucht im Übrigen aber nicht genau definiert zu sein (d. h., der Empfangswinkel braucht nicht auf γ_{ph} beschränkt zu sein).

Anmerkung:

Ist bei Messungen an einzelnen kleinen Quellen $\alpha < \gamma_{\text{ph}}$, dann braucht nicht mit einem bestimmten, genau definierten Empfangswinkel gemessen zu werden. Um einen genau definierten Empfangswinkel zu erhalten, kann der Empfangswinkel gemessen werden. Um einen genau definierten Empfangswinkel zu erhalten, kann der Empfangswinkel entweder durch Abbildung der Quelle auf eine Feldblende oder

durch eine Ablendung der Quelle festgelegt werden – siehe die entsprechenden Bilder, SN 60825-1.

b) Alle anderen Grenzwerte:

Für die Messung von Strahlung, die mit anderen Grenzwerten als denen für die photochemische Gefährdung der Netzhaut verglichen werden soll, sollte der Empfangswinkel die betrachtete Quelle voll erfassen (d. h., der Empfangswinkel sollte mindestens so groß sein wie die Winkelausdehnung α der Quelle). Ist jedoch im Wellenlängenbereich von 302.5 nm bis 400 nm $\alpha > \alpha_{\max}$ dann darf der Grenzempfangswinkel für die Grenzwerte, die sich auf die thermische Gefährdung beziehen, nicht größer als α_{\max} sein. Im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1 400 nm sollte der Empfangswinkel für die Bewertung einer aus mehreren Punkten bestehenden scheinbaren Quelle bezüglich der thermischen Grenzwerte im Bereich $\alpha_{\min} \leq \gamma \leq \alpha_{\max}$ liegen (siehe SN 60825-1).

Für die Bestimmung der EGW von nicht kreisförmigen Quellen ist die Winkelausdehnung einer rechteckigen oder einer linienförmigen Quelle als arithmetischer Mittelwert der beiden Winkelausdehnungen der Quelle festgelegt. Jede Winkelausdehnung, die größer als α_{\max} oder kleiner als α_{\min} ist, sollte auf α_{\max} bzw. α_{\min} begrenzt werden, bevor der Mittelwert berechnet wird. Die Grenzwerte für die photochemische Netzhautgefährdung hängen nicht von der Winkelausdehnung der Quelle ab, und die Quelle wird mit dem oben angegebenen Empfangswinkel gemessen.

14.5 Laser als ausgedehnte Quelle

Die folgenden Korrekturen der EGW für kleine Quellen sind in den meisten Fällen auf die Beobachtung diffuser Reflexionen beschränkt. In einigen Fällen könnten sie auch für Laseranordnungen, Linienlaser, Laser mit Strahltaillen über 0,2 mm und Divergenzwinkeln über 2 mrad oder ausgedehnte Quellen bei Lasereinrichtungen, die gestreute Strahlung erzeugen, gelten.

Für Laserstrahlung ausgedehnter Quellen (z. B. Betrachtung diffuser Reflexionen) mit Wellenlängen von 400 nm bis 1 400 nm werden die EGW für die thermische Netzhautgefährdung um den Faktor C_6 vergrößert, vorausgesetzt, dass die Winkelausdehnung der Quelle (gemessen vom Auge des Beobachters) größer als α_{\min} ist, wobei α_{\min} gleich 1,5 mrad ist.

Der Korrekturfaktor C_6 ist gegeben durch:

$$\begin{array}{ll} C_6 = 1 & \text{für } \alpha \leq \alpha_{\min} \\ C_6 = \alpha / \alpha_{\min} & \text{für } \alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max} \\ C_6 = \alpha_{\max} / \alpha_{\min} & \text{für } \alpha > \alpha_{\max} \end{array}$$

Tabelle 14.7: Korrekturfaktoren und Knickpunkte für Bewertungen der EGW

Parameter	Spektralbereich nm
$C_1 = 5,6 \times 10^3 t^{0,25}$	180 bis 400
$T_1 = 10^{0,8(\lambda - 295)} \times 10^{-15} \text{ s}$	302,5 bis 315
$C_2 = 30$	180 bis 302,5
$C_2 = 10^{0,2(\lambda - 295)}$	302,5 bis 315
$T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha_{\min})/98,5]} \text{ s}$ für $\alpha_{\min} < \alpha \leq 100 \text{ mrad}$	400 bis 1 400
$T_2 = 10 \text{ s}$ für $\alpha \leq 1,5 \text{ mrad}$	400 bis 1 400
$T_2 = 100 \text{ s}$ für $\alpha > 100 \text{ mrad}$	400 bis 1 400
$C_3 = 1,0$	400 bis 450
$C_3 = 10^{0,02(\lambda - 450)}$	450 bis 600
$C_4 = 10^{0,002(\lambda - 700)}$	700 bis 1 050
$C_4 = 5$	1 050 bis 1 400
$C_5 = 1^a$	180 bis 400 und 1 400 bis 10^6
$C_5 = N^{-1/4 a}$	400 bis 1 400
$C_6 = 1$	180 bis 400 und 1 400 bis 10^6
$C_6 = 1$ für $\alpha \leq \alpha_{\min}^b$	400 bis 1 400
$C_6 = \alpha/\alpha_{\min}$ für $\alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max}^b$	400 bis 1 400
$C_6 = \alpha_{\max}/\alpha_{\min}$ für $\alpha > \alpha_{\max}^{b,c}$	400 bis 1 400
$C_7 = 1$	700 bis 1 150
$C_7 = 10^{0,018(\lambda - 1150)}$	1 150 bis 1 200
$C_7 = 8 + 10^{0,04(\lambda - 1250)}$	1 200 bis 1 400
$\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$ $\alpha_{\max} = 5 \text{ mrad}$ für $t < 625 \mu\text{s}$ $200 t^{0,5} \text{ mrad}$ für $625 \mu\text{s} \leq t \leq 0,25 \text{ s}$ 100 mrad für $t > 0,25 \text{ s}$ N ist die Anzahl der in der angewendeten Dauer auftretenden Impulse.	
<p>ANMERKUNG 1 Es gibt nur wenige Erkenntnisse über Wirkungen von Bestrahlungsdauern kleiner als 10^{-9} s bei Wellenlängen unterhalb 400 nm und oberhalb 1 400 nm. Die EGW für diese Einwirkungsauern und Wellenlängen wurden ermittelt, indem im Wellenlängenbereich kleiner als 400 nm und größer als 1 400 nm 10^{-9} s für die Berechnung der entsprechenden Strahlleistung oder Bestrahlungsstärke aus den Werten der Strahlungsleistung oder Bestrahlung verwendet wurde.</p> <p>ANMERKUNG 2 Siehe Tabelle (SN 60825-1) für Grenzblenden.</p> <p>ANMERKUNG 3 In den Formeln der Tabellen 3 bis 8 (SN 60825-1) und in diesen Anmerkungen wird die Wellenlänge in Nanometern, die Einwirkungsduer t in Sekunden und α in Milliradian ausgedrückt.</p> <p>ANMERKUNG 4 Bei Emissionsdauern, die auf Werte der Zellenbegrenzungen in Tabelle 3 bis 8 (SN 60825-1) fallen (beispielsweise 10 s), trifft der niedrigere Grenzwert zu. Wobei Zellenbegrenzungen das „\leq“ Symbol verwendet wird, ist „kleiner oder gleich“ gemeint. Bei der Angabe von Wellenlängenbereichen λ_1 bis λ_2 ist gemeint: $\lambda_1 \leq \lambda < \lambda_2$.</p>	
^a	C_5 ist nur bei kürzeren Impulsen als 0,25 s anwendbar. Siehe SN 60825-1 zur Bestimmung von C_5 in 4.3f.
^b	C_6 ist nur für Grenzwerte der thermischen Netzhautgefährdung anwendbar.
^c	Der größtmögliche Grenzempfangswinkel γ_{ph} muss gleich α_{\max} sein (siehe 4.3 c, SN 60825-1)

In einigen Fällen kann der berechnete Wert für $EGW_{\text{Einzelimpuls, Folge}}$ kleiner sein als der EGW, der für CW-Betrieb mit gleicher Spitzenleistung bei gleicher Zeitbasis anzuwenden wäre. Unter diesen Umständen kann der EGW für CW-Betrieb benutzt werden.

Tabelle 14.8: Zeiten, unterhalb deren die Impulsgruppen aufsummiert werden

Wellenlänge nm	T_i s
$400 \leq \lambda < 1\ 050$	5×10^{-6}
$1\ 050 \leq \lambda < 1\ 400$	13×10^{-6}
$1\ 400 \leq \lambda < 1\ 500$	10^{-3}
$1\ 500 \leq \lambda < 1\ 800$	10
$1\ 800 \leq \lambda < 2\ 600$	10^{-3}
$2\ 600 \leq \lambda \leq 10^6$	10^{-7}

15 Informationsquellen und Literatur

Die wichtigsten Unterlagen für den sicheren Umgang mit Laserstrahlung sind:

- [1] Handbuch der Rechtsförmlichkeit, Empfehlungen des Bundesministeriums der Justiz für die rechtsförmliche Gestaltung von Gesetzen und Rechtsverordnungen, 3. Auflage, BAnz 60 Nr. 160a vom 22.Oktober 2008, Bundesanzeiger Verlag, Köln
- [2] Anforderungen an Schutzkabinen bei UKP-Lasern im Vergleich mit herkömmlichen Lasern; Franek, Heberer, Proceedings NIR 2004
- [3] Braunreuther, S.; Zäh, M. F.: A-priori-Schutzzeitermittlung passiver Hohlkammer-Laserschutzwände bei CW-Lasern
- [4] Franek, J.; Heberer, E.: Physikalische Grenzen der optischen Belastung von Schutzeinhausungen; SLV Halle, Monographie BG, 2006
- [5] Franek, J.; Heberer, E.: Requirements for Laser Guards for Femtosecond Lasers in Comparison to usual High Power Lasers; Proceedings ILSC 2005
- [6] Franek, J.; Heberer, E.: Laser Security through Heat Conduction; Proceedings ILSC 2007
- [7] Bestimmung des kritischen Fokusradius für eine mehrteilige Schutzwand; Dipl.Phys. Joachim Franek, PIBF; Proceedings NIR2011
- [8] Lugauer, F.; Braunreuther, S.; Wiedenmann, R.; Zaeh, M. F.: Laser Intensity as a Basis for the Design of Passive Laser Safety Barriers – A Dangerous Approach; Physics Procedia 56 (2014) 1384 – 1391
- [9] Brose, M.; Ludwig, Th.; Püster, Th.: Ultrakurzpulslaser: Anwendungen, Risiken, Sicherheitsmaßnahmen; Strahlenschutzpraxis 2/2004, S. 3443
- [10] ICNIRP Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1000 μ m, Health Physics 71(5), p. 804-819, 1996
- [11] ICNIRP: Revision of guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 400 nm and 1,4 μ m, Health Physics 79(4), p. 431-440, 2000
- [12] ICNIRP Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μ m; Health Physics 105(3):271-295; 2013
- [13] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV) vom 19. Juli 2010, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 38, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2010, zuletzt geändert am 18.10.2017

- [14] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Art. 427 V v. 31.8.2015 I S. 1474
- [15] 221. Verordnung: Verordnung optische Strahlung – VOPST und Änderung der Verordnung über die Gesundheitsüberwachung am Arbeitsplatz und der Verordnung über Beschäftigungsverbote und –beschränkungen für Jugendliche [CELEX-Nr.: 32006L0025], Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich. Jahrgang 2010, Ausgegeben am 8. Juli 2010, Teil II
- [16] Grenzwerte am Arbeitsplatz, Suva, Publikation 1903.d; www.suva.ch/waswo
- [17] Niemz M. H.: Laser-tissue Interactions: Fundamentals and Applications) (2007)
- [18] Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung Quelle: 11062019: <https://publications.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/556b55ab-5d1a-4119-8c5a-5be4fd845b68>
- [19] Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 1 der Verordnung vom 15. November 2016 (BGBl. I S. 2549) geändert worden ist, zuletzt geändert Art. 3 Abs. 1 V v. 15.11.2016 I 2549
- [20] Merkblatt M 080 "Grundlagen der Lasersicherheit", www.auva.at.
- [21] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L 157, 9.6.2006, p. 24–86
- [22] Betriebssicherheitsverordnung vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 7 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist
- [23] Strahlenschutzgesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966) geändert worden ist
- [24] Legall, H., Schwanke, Ch., Pentzien, S., Dittmar, G., Bonse, J., Krüger, J.: X-ray emission as a potential hazard during ultrashort pulse laser material processing, Applied Physics A, 124:407, 2018
- [25] TROS Laserstrahlung, GMBI. 2018 S. 962 [Nr. 50-53] (21.11.2018)
- [26] FA ET 5 Betrieb von Laser-Einrichtungen für medizinische und kosmetische Anwendungen (Stand: 11/2009)
- [27] Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; Stand: 30. Oktober 2013
- [28] DGUV Information 203-036 "Laser-Einrichtungen für Show- oder Projektionszwecke" (bisher: BGI 5007)
- [29] Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G.; Janßen, M.; Brose, M.: Blendung durch optische Strahlungsquellen (Projekt 2185: Untersuchungen zu arbeitsplatzbezogenen Beeinträchtigungen durch Blendung mit optischen Strahlungsquellen), Dortmund/Berlin/Dresden 2008
- [30] DGUV Vorschrift 1 "Grundsätze der Prävention", November 2013
- [31] DGUV Grundsatz "Ausbildung und Fortbildung von Laserschutzbeauftragten sowie Fortbildung von fachkundigen Personen zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung nach OStrV bei Laseranwendungen"
- [32] Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036)
- [33] DGUV Information 203-042 „Auswahl und Benutzung von Laser-Schutzbrillen, Laser-Justierbrillen und Laser-Schutzabschirmungen“

Detailliertere Informationen können aus Folgenden Quellen gewonnen werden:

DIN EN 207	Persönlicher Augenschutz, Filter und Augenschutz gegen Laserstrahlung (Laser-Schutzbrillen)
DIN EN 208	Persönlicher Augenschutz; Brillen für Justierarbeiten an Lasern und Laseraufbauten (Laser-Justierbrillen)
DIN EN 12254	Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen; Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung
DIN EN 56912	Sicherheitstechnische Anforderungen für Showlaser und Showlaser, Anlagen und Prüfung
DIN EN 60601-2-22 (VDE 0750-2-22)	Medizinische elektrische Geräte; Teil 2: Besondere Festlegungen für die Sicherheit von diagnostischen und therapeutischen Lasergeräten
DIN EN 60825-1	Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen
DIN EN 60825-2 (VDE 0837 Teil 2)	Sicherheit von Laser-Einrichtungen; Teil 2: Sicherheit von Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen
DIN EN 60825-4 (VDE 0837 Teil 4)	Sicherheit von Laser-Einrichtungen, Teil 4: Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen
DIN EN 61040 (VDE 0835) zurückgezogen	Empfänger, Messgeräte und Anlagen zur Messung von Leistung und Energie von Laserstrahlen (alt)
DIN EN ISO 11145	Optik und optische Instrumente; Laser und Laseranlagen; Begriffe mit Formelzeichen
DIN EN ISO 11553-1	Sicherheit von Maschinen, Laserbearbeitungsmaschinen, Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderung (ISO 11553-1:2005)
DIN EN ISO 11553-2	Sicherheit von Maschinen, Laserbearbeitungsmaschinen; Teil 2 Sicherheitsanforderungen an handgeführte und handbediente Maschinen
DIN 5031-1	"Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik"
DIN 5031-10	"Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren"
DIN V 18730	„Laser und Laseranlagen; Grundbegriffe der Lasertechnik"

Weitere Verordnungen und Richtlinien:

Produktsicherheitsgesetz vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179; 2012 I S. 131), das durch Artikel 435 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist

Explosionsschutz-Regeln (EX-RL) DGUV Regel 113-001 (bisher: BGR 104)

Medizinproduktegesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 7. August 2002 (BGBl. I S. 3146), das zuletzt durch Artikel 16 des Gesetzes vom 23. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3191) geändert worden ist

Medizinprodukte-Betreiberverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. August 2002 (BGBl. I S. 3396), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 27. September 2016 (BGBl. I S. 2203) geändert worden ist

Schall- und Laserverordnung (SLV):

Verordnung über den Schutz des Publikums von Veranstaltungen vor gesundheits-

gefährdenden Schalleinwirkungen und Laserstrahlen, Verordnung vom 28. Februar 2007, Schweiz.

Gefahrstoffverordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die zuletzt durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist

DGUV Information 203-079 „Auswahl und Anbringung von Verriegelungseinrichtungen“ August 2014

DGUV Grundsätze für arbeitsmedizinische Untersuchungen (G17) „Künstliche optische Strahlung“ (Gentner-Verlag Stuttgart)

Bundesgesundheitsamt: Empfehlungen zur Vermeidung gesundheitlicher Strahlenrisiken bei der Anwendung von Soft- und MID-Lasern, Bundesgesundheitsblatt 30 Nr. 1, 1987

Grenzwerte am Arbeitsplatz, SUVA,1903.d

WHO (World Health Organisation): "Lasers and Optical Radiation", in Environmental Health Criteria, No 23, Genf, 1982

Bücher, Zeitschriften und Medien:

Informationsschrift Suva: Achtung, Laserstrahl. Bestellnummer: 66049.dlen 5031

Sliney, D.; Wolbarsht, M.: Safety with Lasers and Other Optical Sources, Plenum Press, New York, Ausgabe 1985

Henderson, R.; Schulmeister, K.: Laser Safety, Taylor & Francis Group, New York, London, 2004,

Brunner, W.; Junge, K.: Lasertechnik; Hüthig, Heidelberg 1987

VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien: Lasersicherheit bei der Materialbearbeitung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990

Kneubühl, F.; Sigrist, M.: Laser; Teubner, Stuttgart November 1999 - 5., überarb. u. erg. A.

Sutter, E.: Schutz vor optischer Strahlung – Berlin 3. Auflage; Offenbach: VDE-Verlag, 2008

Berlien, H.-P.; Müller G.: Angewandte Lasermedizin; Ecomed-Verlagsgesellschaft, 1989

Multimedia CD „Lasersicherheit“, CD 5, BG ETEM Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Gustav-Heinemann Ufer 130, 50968 Köln; www.bgetem.de

Struve, B.; Becker, W.-J.; Bonfig, K.W.; Höing, K. (Hrsg.): Laser. Grundlagen, Komponenten, Technik; Technik Verlag, Berlin 2001

Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Hofmann, J.: Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes, 1. Auflage. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH 2003

Schneeweiss, C.; Eichler, J.; Brose, M.: Leitfaden für Laserschutzbeauftragte; Springer-Verlag 2018

Reidenbach, H.-D., Brose, M., Ott, G., Siekmann, H., 2012: Praxis-Handbuch optische Strahlung, Erich Schmidt Verlag, ISBN: 978-3-503-13822-7, Berlin

16 Adressen

Beratung und Messungen bei Sicherheitsbetrachtungen im Zusammenhang mit dem Einsatz von Lasern können durch die folgenden Stellen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) durchgeführt werden:

Fachbereich ETEM der DGUV, Geschäftsstelle: BGETEM Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Gustav-Heinemann Ufer 130, 50968 Köln; www.bgetem.de

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Willi-Brandt-Straße 5, 38226 Salzgitter

Schweizerische Unfallversicherungsanstalt,
Bereich Physik, Postfach, CH-6002 Luzern; www.suva.ch

VDE, Verein Deutscher Elektrotechniker, Prüfstelle,
Offenbach, Merianstr. 28, 63069 Offenbach; www.vde.de

TÜV, Technischer Überwachungsverein der Bundesländer,
VdTÜV, Postfach 103834, 45145 Essen - www.tuev-nord.de ; www.tuev-sued.de

PTB, Physikalisch Technische Bundesanstalt,
Laboratorium für Radiometrie, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig;
www.ptb.de

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA),
Fachbereich Produkte und Arbeitssysteme, Friedrich-Henkel-Weg 1-25,
44149 Dortmund; www.baua.de

Technische Hochschule Köln, Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung, Betzdorferstr. 2, 50679 Köln; www.th-koeln.de

Öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige (Auskunft erteilt die Industrie- und Handelskammer), <https://svv.ihk.de/content/home/home.ihk>

Ingenieurbüro Goebel GmbH, Akkreditiertes Prüflabor für optischen Strahlenschutz, De La Fosse Weg 26, 64289 Darmstadt, www.goebel-laser.de

Institut für Medizinische Physik und Lasermedizin, Fabbeckstr. 60-62, 14195 Berlin;
www.medizin.fu-berlin.de

Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik an der Universität Ulm, Helmholtzstr. 12, 89081 Ulm; <http://www.ilm-ulm.de>

AUVA, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt, Abteilung HUB, Adalbert Stifter Str. 65, A-1200 Wien
Internet: <http://www.auva.at>

Seibersdorf Labor GmbH, A-2444 Seibersdorf
Internet: <http://www.seibersdorf-laboratories.at>