



Laser sicher anwenden

baua: Praxis

Inhalt

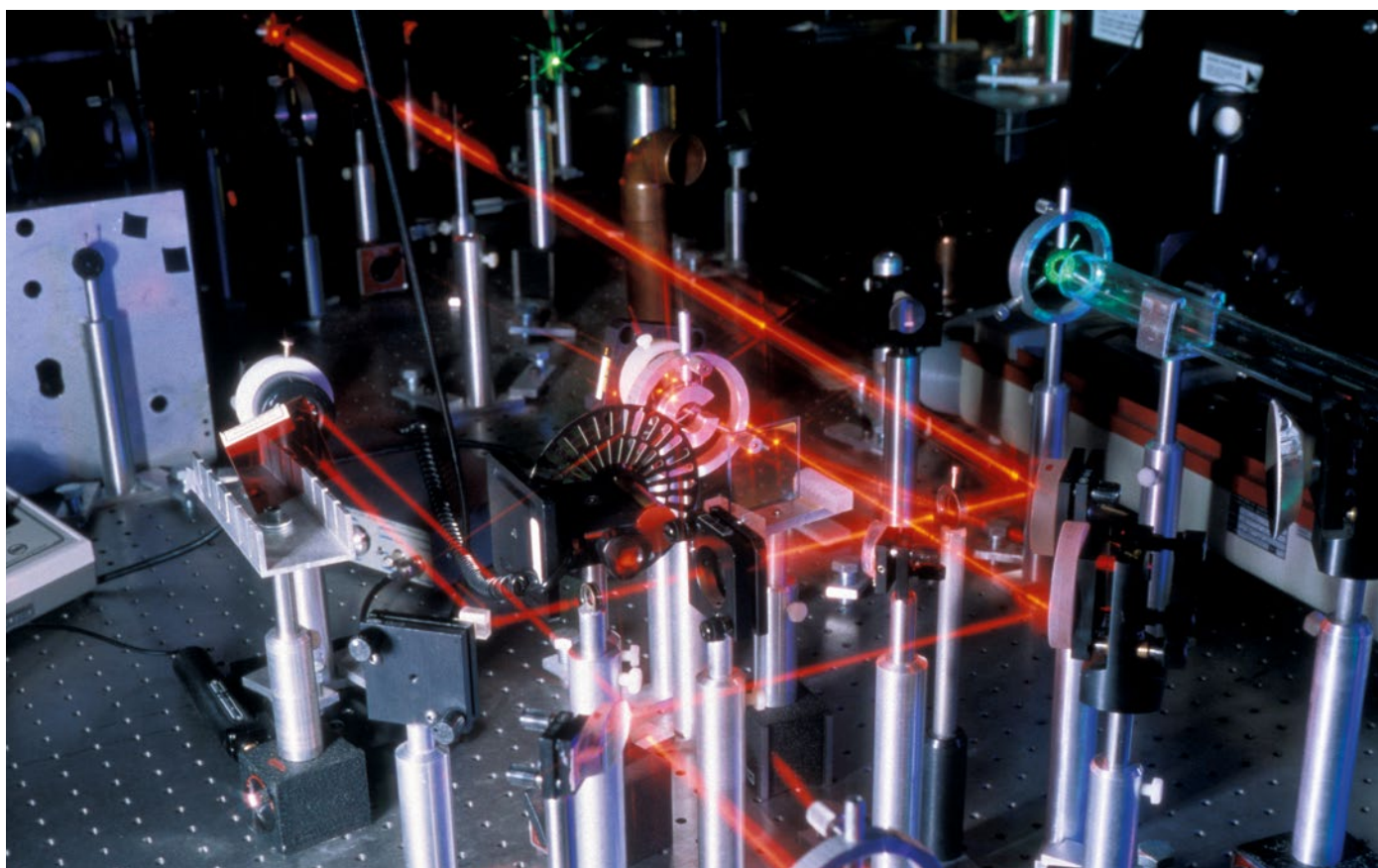
Einleitung	2
<hr/>	
1 Was ist Laserstrahlung?	3
<hr/>	
2 Laseranwendungen	7
<hr/>	
3 Wirkungen auf den Menschen	8
3.1 Gefährdungen des Auges	10
3.2 Gefährdungen der Haut	11
3.3 Weitere Gefährdungen	12
<hr/>	
4 Laserklassen	13
<hr/>	
5 Schutz vor Laserstrahlung	19
5.1 Laser im Verbraucherbereich	19
5.2 Laser am Arbeitsplatz	21
5.3 Schutzmaßnahmen vor Gefährdungen durch Laserstrahlung	22
<hr/>	
6 Forschungsergebnisse zum sicheren Umgang mit Lasern	23
6.1 Aktive Schutzreaktionen erhöhen die Sicherheit	23
6.2 Blendung bei Tätigkeiten vermeiden	26
6.3 Sichere persönliche Schutzausrüstung	29
<hr/>	
Fazit – Verhaltensregeln beim Umgang mit Lasern	32
<hr/>	
Weiterführende Informationen	34
<hr/>	
Impressum	36

Einleitung

Laser sind aus der heutigen Welt nicht mehr wegzudenken. Seit der experimentellen Entwicklung des ersten Lasers durch den Physiker Theodore Maiman im Jahr 1960 sind Laser in den vergangenen 60 Jahren zu bedeutenden und oft unverzichtbaren Geräten geworden – in Forschung und Medizin, in Industrie und Gewerbe, in der Informations- und Kommunikationstechnik und nicht zuletzt in der Unterhaltungsindustrie. Die Zahl der Beschäftigten, die beruflich mit Lasern zu tun haben, nimmt ständig zu. Immer mehr Laser finden sich auch im Verbraucherbereich, wo seit Jahren Laserdrucker, CD- und DVD-Player benutzt werden. Laserentfernungsmesser und -nivelliergeräte gehören mittlerweile zur Grundausstattung vieler Heimwerkerinnen und Heimwerker. Laserpointer stecken in mancher Schultasche und werden leider nicht nur als moderner Zeigestock verwendet. Mit zunehmender Verbreitung von Laseranwendungen wird es sowohl für Beschäftigte als auch für Verbraucherinnen und Verbraucher immer wichtiger, über den sicheren Umgang mit Lasern umfassend informiert zu sein.

Diese *baua: Praxis* enthält neben allgemeinen Informationen über Laserstrahlung und deren Wirkung auf den Menschen auch die derzeit gültige Laserklassifizierung. Sie gibt dem Arbeitgeber sowie den Benutzerinnen und Benutzern wichtige Informationen über mögliche Gefährdungen und daraus abzuleitende Schutzmaßnahmen. Zudem werden einige von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) initiierte Forschungsprojekte zum sicheren Umgang mit Lasern vorgestellt. Sie sollen zur Verbesserung der Sicherheit und Gesundheit von Beschäftigten beitragen, die an ihren Arbeitsplätzen mit Lasern zu tun haben.

1 Was ist Laserstrahlung?



Das Wort **Laser** setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der englischen Bezeichnung *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* zusammen, auf Deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Das beschreibt einen physikalischen Vorgang, der Laserstrahlung erzeugt. Dabei werden im ersten Schritt Atome eines Lasermediums (aktives Medium) durch Energiezufuhr angeregt (Abbildung 1). Der Kürze halber wird im Folgenden nur von Atomen gesprochen, obwohl es Atome, Moleküle oder Ionen sein können. Diesen Vorgang der Energiezufuhr bezeichnet man als Pumpen. Als aktives Medium können Gase, Flüssigkeiten oder Festkörper verwendet werden. Die Energiezufuhr kann, je nach aktivem Medium, durch elektrische Gasentladungen, Blitzlampen, eine angelegte Spannung oder einen anderen Laser erfolgen.

■ Laser ist die Abkürzung für (auf Deutsch): Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung.

Die angeregten Atome geben Photonen (Lichtteilchen) ab und kehren anschließend wieder in ihren nicht angeregten Zustand zurück. Treffen die Photonen auf andere Atome im angeregten Zustand, so können diese ebenfalls Photonen abgeben, die mit den ersten Photonen in Wellenlänge, Phase und Richtung übereinstimmen. Dieser als **stimulierte Emission** bezeichnete Vorgang läuft in einem optischen Resonator ab. Solch ein Resonator ist anschaulich ein Rohr, an dessen beiden Enden je ein Spiegel die optische Strahlung reflektiert. Diese durchläuft so mehrmals das aktive Medium und regt bei jedem Durchgang weitere Atome zur stimulierten Emission von Photonen an. Einer der beiden Spiegel ist teildurchlässig, sodass ein Teil der Strahlung ausgekoppelt werden kann.

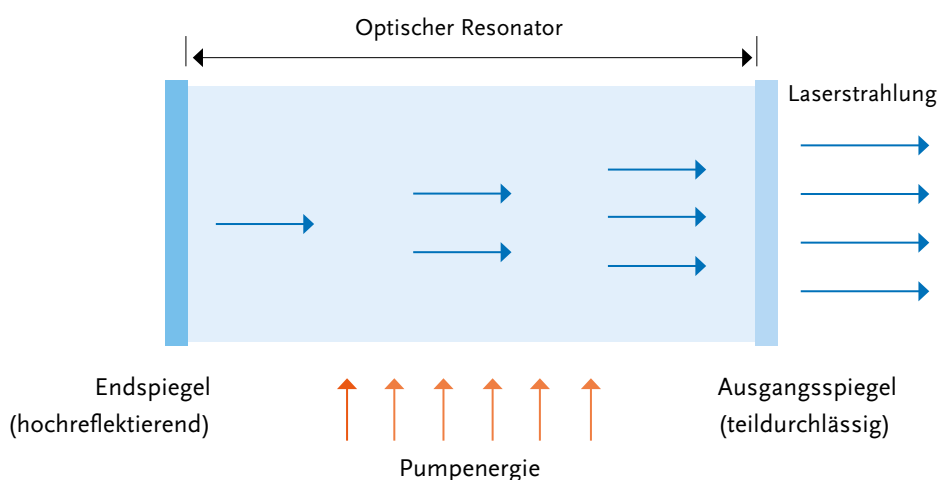


Abb. 1 Funktionsprinzip eines Lasers.

Laserstrahlung unterscheidet sich von optischer Strahlung konventioneller Quellen, wie z. B. Halogenlampen oder Licht emittierenden Dioden (LEDs), im Wesentlichen durch die folgenden Eigenschaften:

- **Kohärenz:** Die Wellen besitzen eine konstante Phasendifferenz, sie sind zeitlich und räumlich zusammenhängend.
- **Monochromasie:** Die Laserstrahlung weist exakt eine Wellenlänge auf.
- **Parallelität:** Der Laserstrahl zeichnet sich durch eine äußerst geringe Divergenz (Aufweitung) aus. Auch in großer Entfernung zur Laserstrahlquelle ist der Strahldurchmesser nur geringfügig vergrößert.

■ Laserstrahlung ist gekennzeichnet durch zeitlich und räumlich zusammenhängende Wellen, exakt eine Wellenlänge und eine geringe Strahldivergenz.

In der Praxis bedeutet dies: Laserstrahlen lassen sich sehr stark fokussieren (bündeln), was zu hohen Leistungsdichten führt. Das wird z. B. im CD-Player ausgenutzt, um die mikroskopisch kleinen Strukturen auf der CD auszulesen, oder in der Materialbearbeitung, um Werkstoffe sehr präzise zu schneiden.



Im Aufbau können Laser sehr unterschiedlich sein. Die Wellenlängen reichen vom ultravioletten (UV) Bereich über die sichtbare optische Strahlung (Licht) bis hin zum infraroten (IR) Bereich (Tabelle 1). Je nach verwendetem aktivem Medium gibt es **verschiedene Lasertypen**: Gas-, Flüssigkeits- oder Festkörperlaser (Tabelle 2). Man kann Laser auch danach unterteilen, ob sie die Strahlung kontinuierlich aussenden oder gepulst arbeiten. Laser mit einer Strahlungsdauer von mehr als 0,25 s werden als **Dauerstrichlaser** bezeichnet. Gepulste Laser geben in regelmäßigen oder auch in unregelmäßigen Zeitabständen Strahlungsimpulse ab, die eine Dauer im Bereich von Femtosekunden bis 0,25 s haben können (zum Wert von „Femto“ siehe Tabelle 3).

Tab. 1 Wellenlängenbereiche optischer Strahlung

Wellenlängenbereich in nm	Bezeichnung
100 bis 280	Ultraviolett C (UV-C)
280 bis 315	Ultraviolett B (UV-B)
315 bis 400	Ultraviolett A (UV-A)
400 bis 780	Sichtbare optische Strahlung (Licht)
780 bis 1 400	Infrarot A (IR-A)
1 400 bis 3 000	Infrarot B (IR-B)
3 000 bis 1 000 000 (1 mm)	Infrarot C (IR-C)

Tab. 2 Lasertypen mit Anwendungsbeispielen

Lasertyp	Aktives Medium	Wichtigste Wellenlängen	Anwendungsbeispiele
Gaslaser	Helium-Neon (He:Ne)	632,8 nm	Messtechnik
	Argon (Ar ⁺)	488 nm; 514,5 nm	Medizin, Spektroskopie, Messtechnik, Holografie
	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	10,6 µm	Materialbearbeitung, Medizin
Flüssigkeitslaser	Farbstoffe	Einstellbar von UV- bis IR-Bereich	Medizin, Spektroskopie
Festkörperlaser	Rubin (Cr ³⁺ :Al ₂ O ₃)	694,3 nm	Medizin
	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat (Nd ³⁺ :YAG)	1 064 nm	Materialbearbeitung, Medizin
	Halbleiter, z. B. Gallium-Aluminium-Arsenid (GaAlAs) und andere Laserdioden	405 nm bis 1 550 nm	Optische Datenübertragung, optische Speichermedien, Medizin

Tab. 3 Dezimalvorsätze, die in dieser Broschüre verwendet werden

Vorsatz	Abkürzung	Wert
Femto	f	10 ⁻¹⁵ = 0,000 000 000 000 001
Piko	p	10 ⁻¹² = 0,000 000 000 001
Nano	n	10 ⁻⁹ = 0,000 000 001
Mikro	µ	10 ⁻⁶ = 0,000 001
Milli	m	10 ⁻³ = 0,001
Ohne		1
Kilo	k	10 ³ = 1 000
Mega	M	10 ⁶ = 1 000 000
Giga	G	10 ⁹ = 1 000 000 000
Tera	T	10 ¹² = 1 000 000 000 000

2 Lasieranwendungen



Lasere werden in vielen Bereichen angewendet (Tabelle 2). Sie sorgen in der Materialbearbeitung für höchste Präzision beim Schneiden, Bohren, Schweißen und Lötens von Werkstücken. Auch für eine schnelle Datenübertragung per Lichtwellenleiter, in den verschiedensten spektroskopischen Verfahren oder in der Dünnschichttechnologie werden sie verwendet. In der Mess- und Prüftechnik werden sie für hochgenaues, berührungsloses Messen eingesetzt, etwa bei der Bestimmung von Entfernungen, Geschwindigkeiten, Materialdicken oder Oberflächenprofilen. Laserstrahlung wird auch zur Herstellung von Hologrammen etwa auf EC- und Kreditkarten sowie in den Strichcode-Lesegeräten an den Kassen der Supermärkte genutzt. Selbst Obst und Gemüse kann mittlerweile ohne Verlust seiner Frische mit einem Laser beschriftet werden.

■ Laser lassen sich in vielen Bereichen anwenden, etwa zur Materialbearbeitung, zum Messen oder in der Medizin.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich von Lasern ist die Medizin. Beispielsweise werden Laser bei der Zertrümmerung von Nieren- und Gallensteinen oder in der Chirurgie als Skalpell benutzt. Auch bei der Korrektur von Fehlsichtigkeit und bei der Entfernung von Pigmentflecken oder Narben leisten Laser gute Dienste.

Natürlich ist der Laser auch Bestandteil vieler Geräte im Verbraucherbereich: Drucker, Scanner, Wasserwaagen und Entfernungsmesser mit Lasern sind heute eher die Regel als die Ausnahme. Der heimische Blu-Ray-Player gehört ebenso in diese Liste wie der Laserpointer. In Diskotheken, bei Bühnenshows und Veranstaltungen sorgen Laser für besondere Lichteffekte.

3

Wirkungen auf den Menschen



Laserstrahlung und optische Strahlung aus konventionellen Strahlungsquellen unterscheiden sich nicht grundsätzlich in ihren biologischen Wirkungen. Den Unterschied macht insbesondere die **starke Bündelung** der Laserstrahlung. Dadurch können hohe Bestrahlungsstärken erreicht werden. Als Bestrahlungsstärke bezeichnet man die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit, üblicherweise ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Bei der Exposition können verschiedene Gewebeeränderungen die Folge sein. Dabei ist die Wirkung der Laserstrahlung vom Absorptions-, Reflexions- und Streuvermögen des biologischen Gewebes abhängig. Aber auch Wellenlänge, Bestrahlungsstärke und Bestrahlungsdauer entscheiden über die Wirkung auf das bestrahlte Gewebe.

■ **Starke Bündelung der Laserstrahlung führt zu hohen Bestrahlungsstärken.**

Biologisches Gewebe enthält in der Regel sehr viel Wasser, das die optische Strahlung am stärksten im fernen IR-Bereich (IR-B und IR-C) absorbiert. Im UV-, sichtbaren und nahen IR-Bereich (IR-A) findet Absorption dagegen durch biologische Moleküle wie etwa Hämoglobin (Blutfarbstoff, der die Atmung und die Stoffwechselfvorgänge regelt) oder Melanin (Farbpigment, das für die Bräunung der Haut verantwortlich ist) statt.

Bei einer relativ langen Bestrahlungsdauer im Minutenbereich und mit geringen Bestrahlungsstärken ($< 50 \text{ mW/cm}^2$) können insbesondere im kurzwelligeren sichtbaren Spektralbereich fotochemische Wirkungen im Gewebe ausgelöst werden. Bestimmte biologische Moleküle absorbieren dabei die auftreffende optische Strahlung, werden dadurch angeregt und geben ihre Energie z. B. an Sauerstoffmoleküle ab, wodurch hochreaktive Radikale entstehen, die die Erbsubstanz Desoxyribonukleinsäure (DNS) schädigen können. UV-Strahlung kann auch eine direkte Schädigung der DNS hervorrufen. Derartige Schädigungen der DNS können krebsauslösend wirken.

Bei einer Bestrahlungsdauer von einigen Sekunden bis zu einigen Millisekunden und Bestrahlungsstärken oberhalb von 100 W/cm^2 sind thermische Effekte zu beobachten. Diese reichen von einer leichten Erwärmung des Gewebes über die Veränderung der natürlichen Molekülstruktur, die Gerinnung von Eiweiß (Koagulation) und die Verdampfung des Wassers (Vaporisation) im Gewebe bis hin zur Verkohlung (Karbonisierung) des Gewebes.

Bei weiter erhöhter Bestrahlungsstärke bis 1 GW/cm^2 und Verkürzung der Impulsdauer auf Mikro- bis Nanosekunden „verdampft“ das Gewebe, es wird praktisch explosionsartig abgetragen (Fotoablation). Bei noch weiterer Verkürzung der Impulsdauer auf Werte im Nano- bis Pikosekunden-Bereich und gleichzeitiger Erhöhung der Bestrahlungsstärken auf 1 TW/cm^2 entsteht Plasma, d. h. freie Elektronen, Ionen und neutrale Atome bzw. Moleküle. Dieser Prozess wird von einer akustischen Stoßwelle begleitet, die sich ausbreitet und das Gewebe mechanisch zerstört. In diesem Fall spricht man von Fotodisruption.

Die Wirkung von Laserstrahlung auf das bestrahlte Gewebe hängt von der Wellenlänge, der Bestrahlungsstärke und der Bestrahlungsdauer ab.



3.1 Gefährdungen des Auges

Das Auge (Abbildung 2) besitzt die Eigenschaft, Licht – also Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich – stark zu bündeln. Durch die Fokussierung des Linsensystems Hornhaut und Linse wird die Bestrahlungsstärke auf dem Weg von der Hornhaut zur Netzhaut bis zu etwa 100 000-fach verstärkt. Das erklärt, warum bereits relativ geringe Bestrahlungsstärken für das Auge gefährlich sein können. Schäden an der Netzhaut, wie z. B. Verbrennungen, können zu erheblichen Beeinträchtigungen des Sehvermögens führen. Kleinere Verbrennungen der Netzhaut bleiben meist un bemerkt, soweit sie außerhalb des Flecks des schärfsten Sehens (der gelbe Fleck) liegen. Größere geschädigte Stellen können jedoch zu Ausfällen im Gesichtsfeld führen. Darüber hinaus kann es zu massiven Blutungen in die Netzhaut kommen, die diese mehr oder weniger stark zerstören. Bei einer Schädigung an der Stelle des schärfsten Sehens können das Scharfsehen und das Farbsehvermögen stark verringert werden. Wird die Einmündung des Sehnervs in die Netzhaut, der sogenannte blinde Fleck, getroffen, droht die völlige Erblindung.

■ Schon geringe Bestrahlungsstärken können für das Auge gefährlich sein, weil sie auf dem Weg zur Netzhaut bis zu 100 000-fach verstärkt werden.

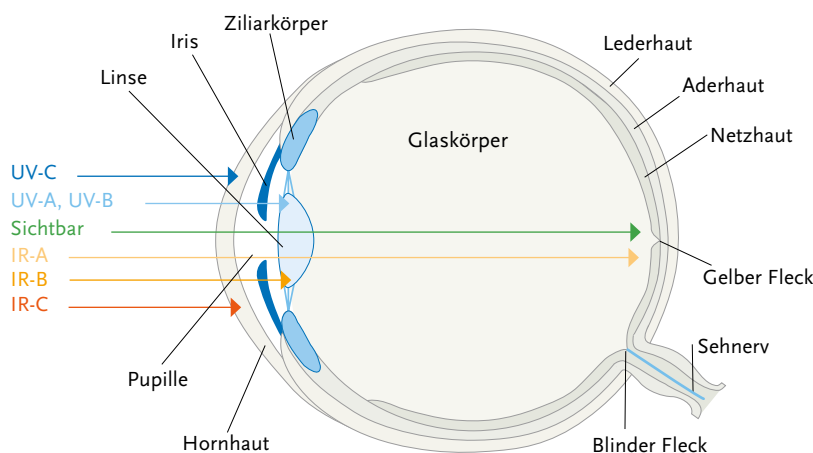


Abb. 2 Das Auge und die Eindringtiefen optischer Strahlung im UV-, sichtbaren und IR-Spektralbereich.

Das Sehvermögen ist auf den sichtbaren Spektralbereich begrenzt, d. h., diese Strahlung gelangt durch Hornhaut, Linse und Glaskörper und wird auf der Netzhaut abgebildet. Im Hinblick auf eine potenzielle Augengefährdung muss aber besonders berücksichtigt werden, dass darüber hinaus auch optische Strahlung im nahen IR-Bereich mehr oder weniger stark die Netzhaut erreicht und dort thermische Schädigungen hervorrufen kann. Optische Strahlung im UV- und fernen IR-Bereich wird dagegen bereits von der Hornhaut, der Bindehaut und der Linse absorbiert und kann somit keine Schäden auf der Netzhaut verursachen. Allerdings können durch UV-Strahlung fotochemische Reaktionen ausgelöst werden, die zu schmerzhaften Entzündungen der Hornhaut (Photokeratitis) sowie der Bindehaut (Photokonjunktivitis) führen. Durch hohe Bestrahlungsstärken und wiederholte Einwirkungen über einen längeren Zeitraum kann es zu Linsentrübungen (Katarakten) kommen. Im IR-Bereich sind ebenfalls Linsentrübungen möglich, ab einer Wellenlänge von ca. 2 500 nm ist jedoch nur noch die Hornhaut betroffen (Tabelle 4).



3.2 Gefährdungen der Haut

Der Haut fehlt die Eigenschaft, Licht zu bündeln, und sie reflektiert bzw. streut optische Strahlung stärker als das Auge. Daher ist sie unempfindlicher gegenüber optischer Strahlung. Im sichtbaren und nahen IR-Bereich hat die Haut ein hohes Reflexionsvermögen und streut die entsprechenden Wellenlängen mehr oder weniger stark, im UV- und fernen IR-Bereich wird die Strahlung dagegen sehr stark absorbiert, wobei die Eindringtiefe von der Wellenlänge abhängt. Entsprechend der Eindringtiefe sind Hautschichten unterschiedlich stark betroffen (Abbildung 3). In Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke können Hautrötungen (Erytheme), Verbrennungen, starke Blasenbildung und spätere Vernarbung die Folge sein.

■ Bei UV- und IR-Strahlung können abhängig von der Bestrahlungsstärke Hautrötungen, Verbrennungen und starke Blasenbildung auftreten.

Tabelle 4 zeigt mögliche Auswirkungen von Laserstrahlung auf Auge und Haut.

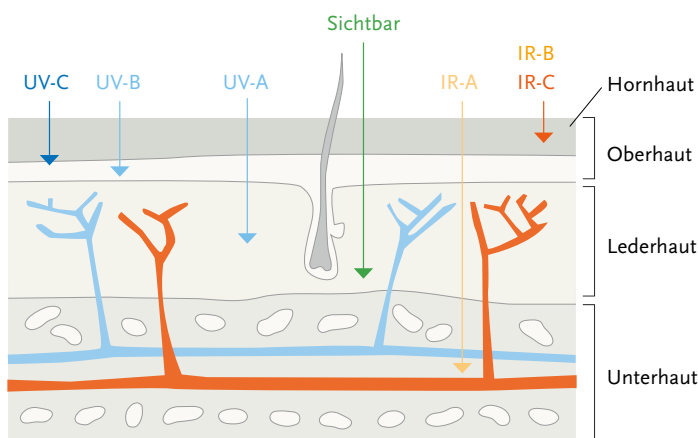


Abb. 3 Die Haut und die Eindringtiefen optischer Strahlung im UV-, sichtbaren und IR-Spektralbereich.

3.3 Weitere Gefährdungen

Neben der Gefährdung von Auge und Haut kann es durch Laserstrahlung jedoch noch zu weiteren Gefährdungen kommen. Blendung kann eine vorübergehende Störung des Sehvermögens verursachen und bei Tätigkeiten wie dem Führen eines Fahr- oder Flugzeugs, beim Bedienen einer Maschine, bei Installations- oder Reparaturarbeiten zu einem erhöhten Unfallrisiko führen. Brand- und Explosionsgefahr drohen immer dann, wenn die Strahlung auf brennbares Material oder eine explosionsfähige Atmosphäre trifft. Bei der Materialbearbeitung können gesundheitsschädliche Materialzersetzungsprodukte und schädigende UV-Strahlung entstehen.

■ Bei Laserstrahlung drohen auch Unfallrisiken durch Blendung, Brand- und Explosionsgefahr, schädigende Zersetzungsprodukte oder Kontakt mit toxischen Stoffen.

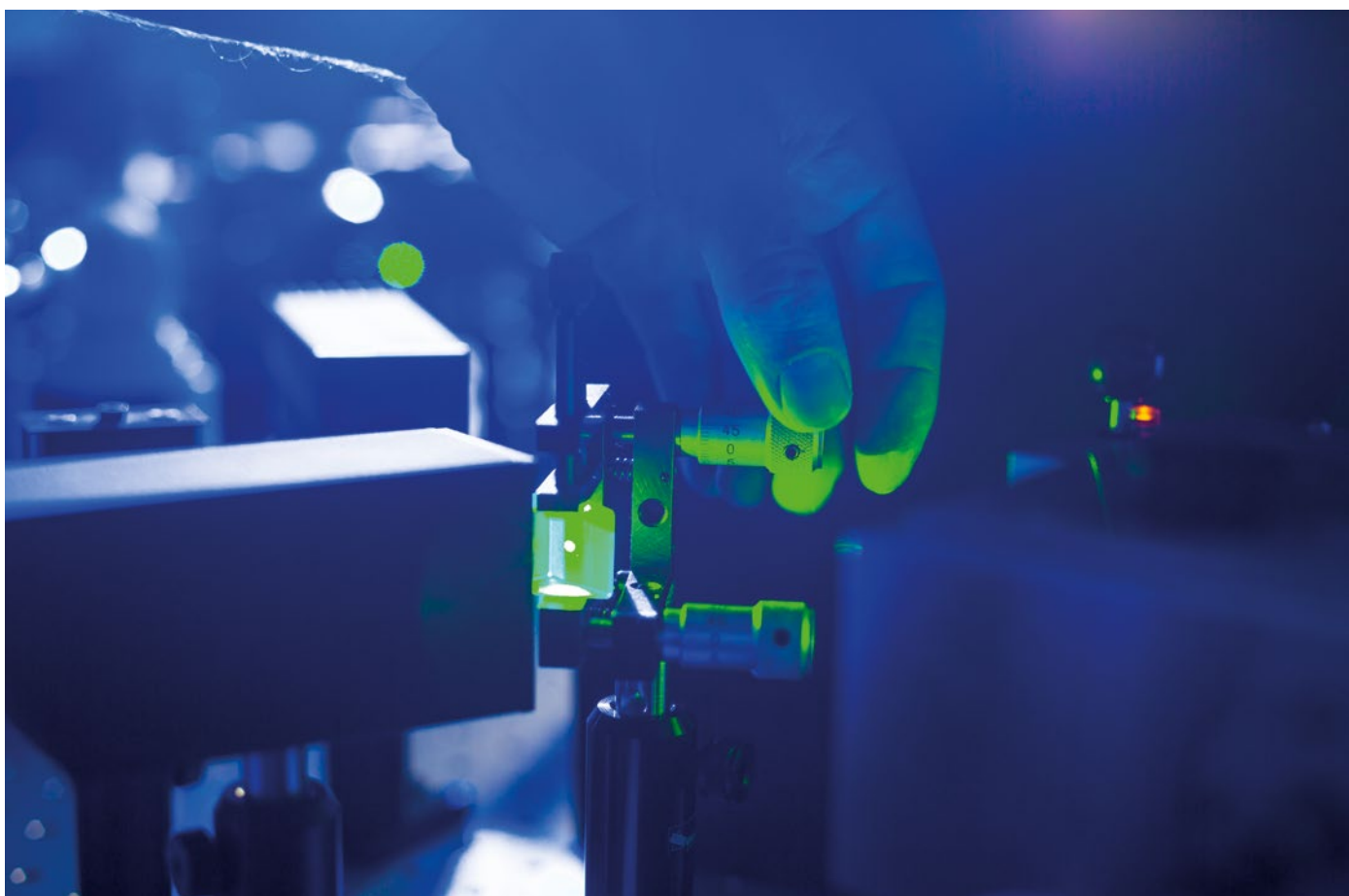
Aber auch die Technik des Lasers selbst birgt ein Gefährdungsrisiko, wenn es z. B. zum Kontakt mit toxischen Stoffen (Gasen, Flüssigkeiten) des aktiven Mediums kommt. Da jeder Laser elektrische Energie zum Betrieb benötigt, muss auch die elektrische Sicherheit beachtet werden.

Tab. 4 Mögliche Auswirkungen optischer Strahlung auf Auge und Haut

Wellenlängenbereich	Auge	Haut
UV-C	Hornhautentzündung Bindehautentzündung	Hautrötung Präkanzerosen Karzinome
UV-B	Hornhautentzündung Bindehautentzündung Linsentrübung	Verstärkte Pigmentierung Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Hautrötung Präkanzerosen Karzinome
UV-A	Linsentrübung	Bräunung Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Verbrennung der Haut Karzinome
Sichtbare optische Strahlung	Fotochemische und fothermische Schädigung der Netzhaut	Fotosensitive Reaktionen Verbrennung der Haut
IR-A	Linsentrübung Verbrennung der Netzhaut	Verbrennung der Haut
IR-B	Linsentrübung Verbrennung der Hornhaut	Verbrennung der Haut Blasenbildung auf der Haut
IR-C	Verbrennung der Hornhaut	Verbrennung der Haut

4

Laserklassen



Für Laser besteht seit vielen Jahren die **Verpflichtung zur Klassifizierung nach der Lasernorm DIN EN 60825-1**. Laser werden hier entsprechend ihrer potenziellen Gefährlichkeit für den Menschen in Klassen eingeteilt. Die Zuordnung zu einer bestimmten Laserklasse soll für Benutzerinnen und Benutzer eine mögliche Gefährdung sofort erkennbar machen und auf geeignete Schutzmaßnahmen hinweisen. Im Wesentlichen steigt das Potenzial der Gefährdung mit steigender Laserklasse: Je höher ein Laser klassifiziert ist, desto größer ist die Gefahr, die von ihm ausgeht. Diese Regel gilt jedoch nicht immer, z. B. bei der Laserklasse 1C (siehe Beschreibung dieser Laserklasse weiter unten). Für die Zuordnung eines Lasers zu einer bestimmten Laserklasse ist der Hersteller verantwortlich.

■ Mit steigender Laserklasse steigt in der Regel das Potenzial der Gefährdung.

Welcher Klasse gehört ein Laser an? Um dies zu beurteilen, müssen zwei Grenzwerte betrachtet werden. Die **maximal zulässige Bestrahlung (MZB)** ist das maximale Ausmaß der Laserstrahlung, der Menschen unter normalen Umständen ausgesetzt werden dürfen, ohne dass schädliche Folgen eintreten. Die MZB-Werte sind abhängig von der Art der exponierten Organe (Auge oder Haut), von der Wellenlänge, der Bestrahlungsdauer und, im Falle des Auges, von der Größe des Bildes auf der Netzhaut. Der **Grenzwert zugänglicher Strahlung (GZS)** ist der maximale Wert zugänglicher Strahlung, der innerhalb einer bestimmten Laserklasse zugelassen ist. Mit zugänglicher Strahlung bezeichnet man die Strahlung, die den Laser verlässt und in einen Bereich gelangt, in dem sie auf Menschen treffen kann. Über den GZS lässt sich abschätzen, ob die MZB-Werte für Auge oder Haut eingehalten oder bei welcher Bestrahlungsdauer bzw. bis in welche Entfernung zur Laserstrahlquelle sie überschritten werden können.

Das Laserklassifizierungssystem hat sich in der Vergangenheit mehrfach geändert. In der Norm DIN EN 60825-1:2015 wurde zu den bereits bestehenden Laserklassen 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4 die neue Laserklasse 1C hinzugefügt und einige Grenzwerte wurden geändert. Zur Nomenklatur: Das **M** in 1M und 2M ist abgeleitet von *magnifying optical viewing instruments*, d. h. vergrößernde optische Instrumente. Laser der Klasse 1C sind für die Anwendung in direktem Kontakt mit der Haut oder dem Gewebe bestimmt, das **C** steht für *contact*. Das **R** in 3R ist abgeleitet von *reduced* oder *relaxed requirements*, d. h. reduzierten Anforderungen (z. B. werden kein Schalter oder Strahlabschwächer und kein Fernbedienungsanschluss gefordert). Das **B** in 3B hat historische Gründe, da in einer früheren Ausgabe dieser Norm aus dem Jahr 1993 (bis 1997) eine Laserklasse 3A existierte, die eine ähnliche Bedeutung hatte wie die heutigen Klassen 1M und 2M.

■ Die Norm
DIN EN 60825-1:2015
definiert acht Laserklassen:
1, 1M, 1C, 2, 2M, 3R, 3B
und 4.

Es folgt eine kurze Beschreibung der Laserklassen. Die genauen Definitionen sind in der Norm DIN EN 60825-1:2015 zu finden, während deren Bedeutung für den Arbeitsschutz in den Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Laserstrahlung – genauer erläutert wird.

Klasse 1: Klasse 1 ist anwendbar im Wellenlängenbereich von 180 nm bis 1 mm. Die zugängliche Laserstrahlung ist unter vorhersehbaren Bedingungen ungefährlich. Für Wellenlängen zwischen 302,5 nm und 4000 nm verursachen diese Laser auch bei längerer Bestrahlung keine Schäden am Auge, selbst dann nicht, wenn optische Instrumente (Lupen, Linsen, Teleskope) in den Strahlengang gehalten werden. Der GZS im sichtbaren Bereich ist wellenlängenabhängig und reicht von 0,039 mW im blauen bis 0,39 mW im grünen bis roten Wellenlängenbereich. Klasse 1 umfasst auch Laser mit höherer Leistung, die aber voll gekapselt sind, sodass keine gefährliche Strahlung zugänglich ist, wie dies z. B. bei den Lasern in Blu-Ray-Playern, Laserdruckern und in eingehausten Lasermaterialbearbeitungsmaschinen der Fall ist.

■ Laser der Klasse 1 sind bei
bestimmungsgemäßem
Gebrauch sicher für die Augen
und die Haut.

Klasse 1M: Laser der Klasse 1M senden einen Laserstrahl, der entweder stark divergent oder aufgeweitet ist. Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 4000 nm, d. h. in dem Spektralbereich, bei dem die meisten in optischen Instrumenten verwendeten Materialien weitgehend transparent sind. Die Laserstrahlung ist für das Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente, wie z. B. Fernrohre, verkleinert wird. Dadurch unterscheidet sich ein Laser der Klasse 1M von einem Laser der Klasse 1. Strichcode-Lesegeräte (Abbildung 4), wie sie an der Supermarktkasse eingesetzt werden, sind Beispiele für die Klasse 1M.



Abb. 4 Strichcode-Lesegerät.

Klasse 1C: Laser der Klasse 1C sind ausschließlich für die Anwendung in direktem Kontakt an der Haut oder am Gewebe (mit Ausnahme der Augen) bestimmt. Obwohl die Laserstrahlung in den Klassen 3R, 3B oder 4 liegen kann, werden Augengefährdungen durch konstruktive Maßnahmen verhindert, d. h., beim Entfernen des Lasers von der Haut oder dem Gewebe wird die zugängliche Laserstrahlung gestoppt oder auf ein Ausmaß unterhalb der GZS der Klasse 1 verringert. Beispiele für diese Laser sind Geräte, die bei medizinischen, diagnostischen, therapeutischen oder kosmetischen Verfahren, wie z. B. Haarentfernung, Reduzierung von Hautfalten oder Behandlung von Akne, eingesetzt werden.

■ Die Laserstrahlung eines Lasers der Klasse 1C kann in den Klassen 3R, 3B oder 4 liegen.



Abb. 5 Laserpointer.

Klasse 2: Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 700 nm. Bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) ist sie für das Auge ungefährlich. Das gilt auch, wenn sich ein optisches Instrument im Strahlengang befindet. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereichs erfüllen die Bedingungen für die Klasse 1. Für Dauerstrichlaser der Klasse 2 beträgt der GZS 1 mW. Beispiele für Laser der Klasse 2 sind Messlaser, die in der Landvermessung eingesetzt werden, Laserwasserwaagen, Lichtschranken und Laserpointer (Abbildung 5).

Klasse 2M: Laser der Klasse 2M senden einen zugänglichen Strahl im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 700 nm aus, der entweder stark divergent oder aufgeweitet ist. Er ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) für das Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente verkleinert wird. Sofern dies nicht geschieht, besteht bei den Lasern der Klasse 2M eine vergleichbare Gefährdung wie bei den Lasern der Klasse 2. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereiches erfüllen die Bedingungen für die Klasse 1M. Ein Beispiel für die Laser der Klasse 2M sind Motivlaserprojektoren.

Klasse 3R: Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 1 mm und kann für das Auge gefährlich sein. Für Dauerstrichlaser der Klasse 3R beträgt der GZS 5 mW im sichtbaren Wellenlängenbereich (das Fünffache des GZS der Klasse 2) und das Fünffache des GZS der Klasse 1 für alle anderen Wellenlängen. Beispiele für Laser der Klasse 3R sind Nivellierlaser (Abbildung 6) und Ziellaser für militärische Zwecke.

■ Laser der Klassen 1M, 2 und 2M sind sicher für die Augen, wenn nicht länger als 0,25 s in den Laserstrahl geblickt wird oder optische Instrumente, wie Lupen oder Fernrohre, benutzt werden.

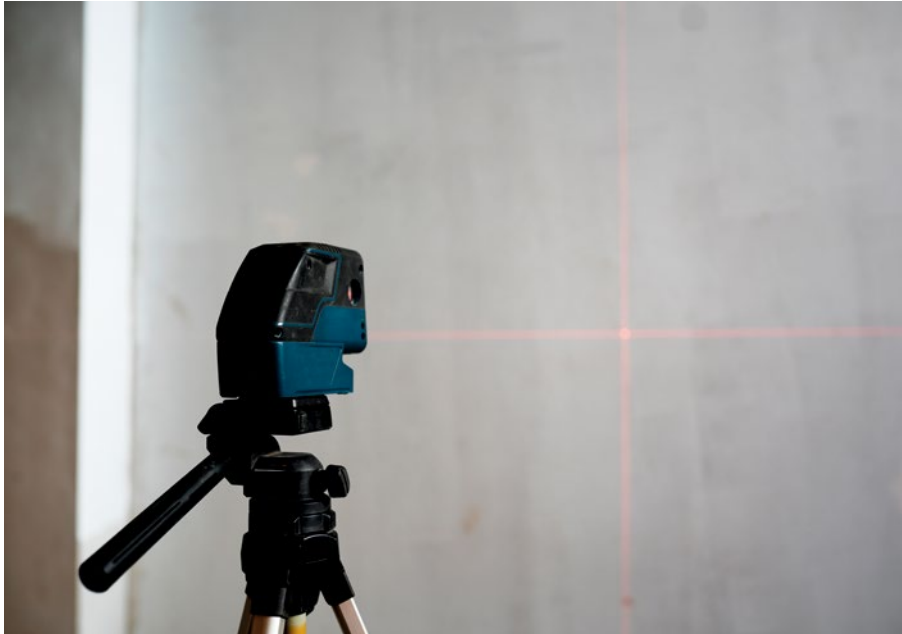


Abb. 6 Nivellierlaser.

Klasse 3B: Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge, häufig auch für die Haut. Laser der Klasse 3B sind typischerweise Dauerstrichlaser mit einem GZS von 5 mW bis 500 mW. Beispiele für Laser der Klasse 3B sind Show- und Discolaser (Abbildung 7) sowie Laser für kosmetische Anwendungen.

■ Laser der Klassen 3R und 3B sind gefährlich für die Augen und im oberen Leistungsbereich auch für die Haut.



Abb. 7 Showlaser.

Klasse 4: Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahr verursachen. Lasereinrichtungen der Klasse 4 sind Hochleistungslaser, die einen GZS von mehr als 500 mW haben. Beispiele hierfür sind Materialbearbeitungslaser (z. B. Laserschweiß- oder Laserschneidanlagen, Abbildung 8), Forschungslaser sowie Show- und Discolaser. Fast alle Lasersysteme, die in der medizinischen Therapie für die Koagulation, Vaporisation, Ablation und Disruption von Gewebe eingesetzt werden, gehören zur Klasse 4.

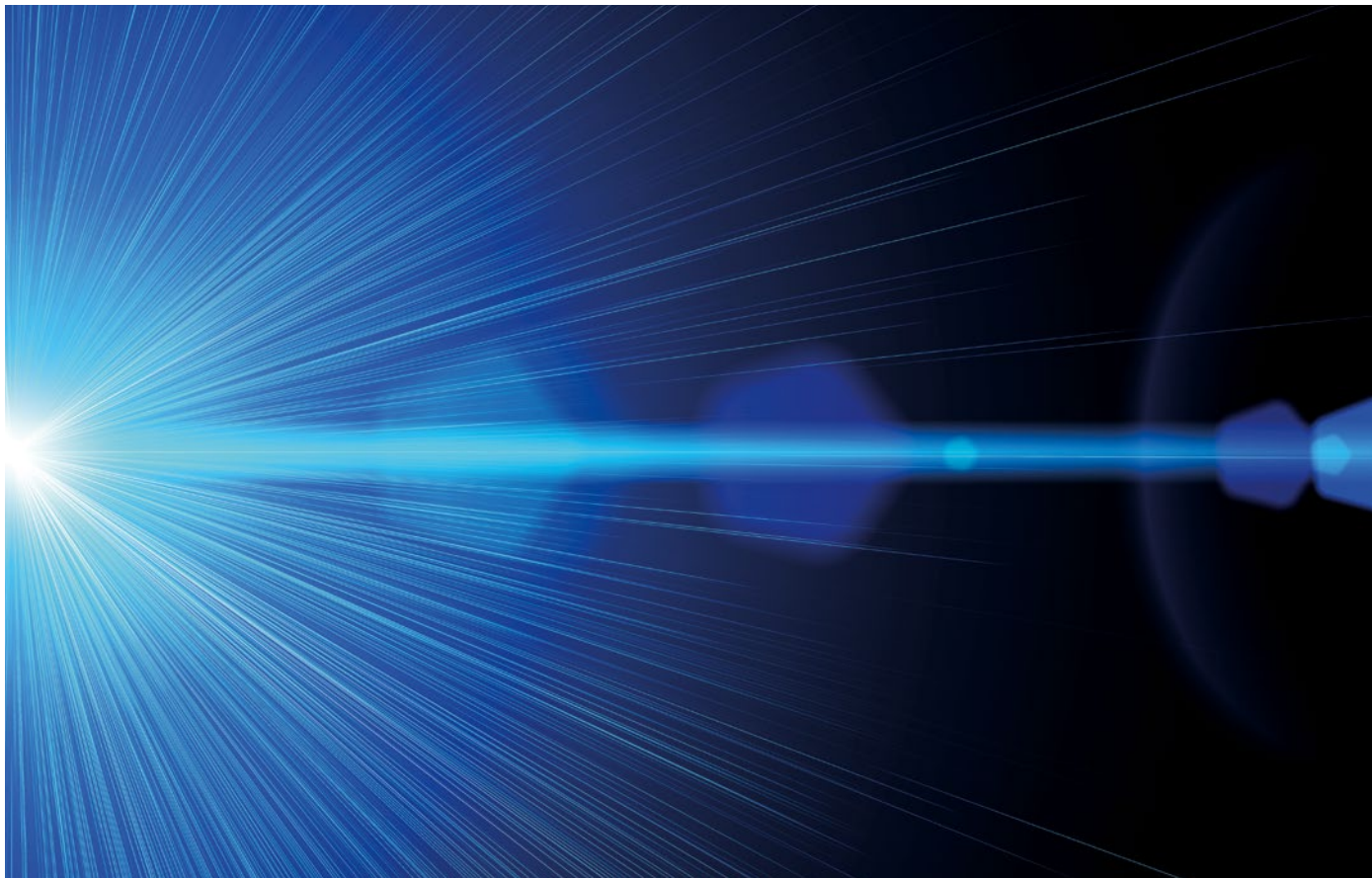
■ Laser der Klasse 4 sind sehr gefährlich für die Augen und die Haut.



Abb. 8 Metall-Laserschneiden.

5

Schutz vor Laserstrahlung



5.1 Laser im Verbraucherbereich

Nach dem Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) darf ein Produkt auf dem Markt bereitgestellt werden, wenn es bei bestimmungsgemäßer oder vorhersehbarer Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährdet. Nach der „Technischen Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)“, die im Jahr 2009 veröffentlicht wurde, dürfen im Verbraucherbereich nur Laserprodukte der Klassen 1, 1M, 2 oder 2M verwendet werden, nicht aber Laser der Klassen 3R, 3B und 4.



Im Jahr 2021 wurde die Norm EN 50689:2021 „Safety of laser products – Particular Requirements for Consumer Laser Products“ veröffentlicht. Mit der deutschen Übersetzung und der Veröffentlichung dieser Norm als DIN EN 50689 ist im Jahr 2022 zu rechnen. Entsprechend dieser Norm sind die Laserprodukte der Klassen 1M, 2M, 3B und 4 nicht als Verbraucherprodukte zulässig, manche Produkte der Klasse 3R aber schon, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. Verbraucher-Laserprodukte der Klasse 1C fallen nicht in den Anwendungsbereich dieser Norm. Es wird erwartet, dass die Norm EN 50689:2021 unter der Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Produktsicherheit harmonisiert wird; unter der Richtlinie 2014/35/EU (Niederspannungsrichtlinie) wurde sie bereits harmonisiert. Bei Produkten, die harmonisierten europäischen Normen entsprechen, wird davon ausgegangen, dass sie die von diesen Normen abgedeckten Richtlinienanforderungen erfüllen. Zum Beispiel legt die Richtlinie 2001/95/EG für den europäischen Binnenmarkt bei zahlreichen Produkten Mindestanforderungen an die Sicherheit fest, die vom Hersteller erfüllt werden müssen. In der Folge entfiel die Notwendigkeit, Sicherheitsaspekte für Verbraucherlaser in der „Technischen Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)“ zu regeln, sodass diese zurückgezogen werden kann.

■ Nach der europäischen Norm EN 50689:2021 sind die Klassen 1 und 2 sowie eine Untergruppe der Klasse 3R im Verbraucherbereich zulässig, sofern sie nicht auf Kinder ansprechend wirken.

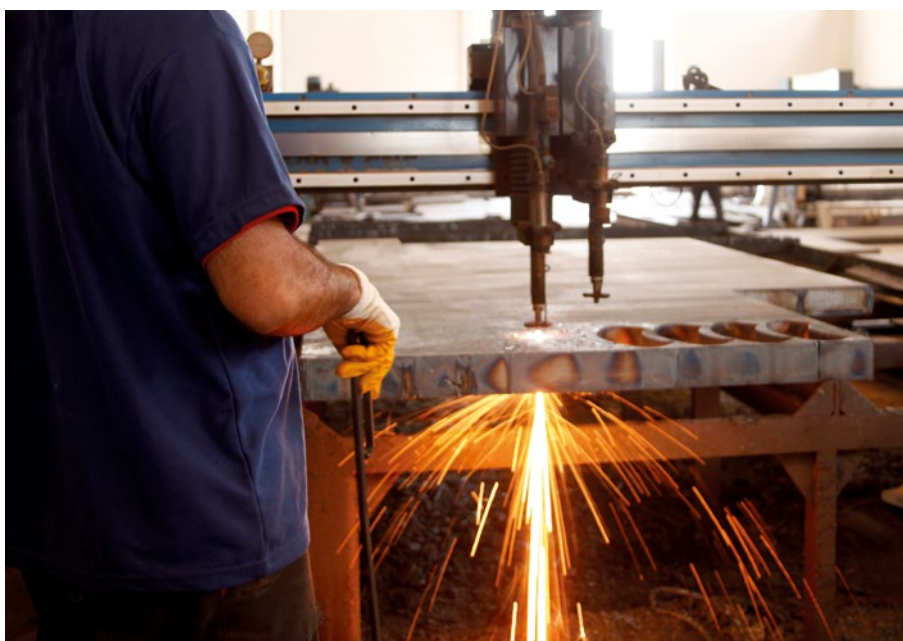
5.2 Laser am Arbeitsplatz

Die europäische Arbeitsschutzrichtlinie 2006/25/EG über Mindestvorschriften zum Schutz der Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) legt **Expositionsgrenzwerte (EGW)** fest, um Schäden der Augen und der Haut zu verhindern. Der Expositionsgrenzwert und die maximal zulässige Bestrahlung (MZB) haben die gleiche Bedeutung. Die EGW für Laserstrahlung werden im Anhang II der Richtlinie angegeben und basieren auf den Leitlinien der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – ICNIRP) aus den Jahren 1996 und 2000.

Die Arbeitsschutzrichtlinie wurde mit einer **Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV)** in deutsches Recht umgesetzt. Mit der Umsetzung durch die OStrV sind die in der Arbeitsschutzrichtlinie festgelegten EGW auch in Deutschland rechtsverbindlich. Die Verordnung verpflichtet Arbeitgeber, vor der Aufnahme einer Tätigkeit an Arbeitsplätzen mit Laserstrahlung eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Bei einer möglichen Überschreitung der EGW sind entsprechende Schutzmaßnahmen festzulegen. Werden im Unternehmen Lasereinrichtungen der Klassen 3R, 3B oder 4 betrieben, so ist eine **Laserschutzbeauftragte** bzw. ein **Laserschutzbeauftragter** schriftlich zu bestellen.

Die vorliegenden **Technischen Regeln zur OStrV (TROS)** konkretisieren die Anforderungen der OStrV. Die Anwendung der TROS gibt dem Arbeitgeber Rechtssicherheit, denn sie löst die sogenannte Vermutungswirkung aus: Bei Anwendung der TROS Laserstrahlung kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass – bezogen auf den Schutz vor Laserstrahlung – die Vorschriften der OStrV eingehalten werden.

■ Die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) verpflichtet Arbeitgeber, vor der Aufnahme einer Tätigkeit an Arbeitsplätzen mit Laserstrahlung eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen.



Bei der Gefährdungsbeurteilung und der Festlegung von Schutzmaßnahmen können die Herstellerdaten, wie z. B. die Einteilung in Laserklassen nach der Lasernorm DIN EN 60825-1:2015, den Arbeitgeber unterstützen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die ICNIRP im Jahr 2013 neue EGW-Empfehlungen veröffentlicht hat, die sich teilweise von den rechtlich bindenden EGW der europäischen Arbeitsschutzrichtlinie 2006/25/EG unterscheiden. Da in der Lasernorm DIN EN 60825-1:2015 bereits Anpassungen an die aktuellen EGW-Empfehlungen vorgenommen wurden, kann dies zu einer Abweichung zwischen der Laserklassifizierung nach DIN EN 60825-1:2015 und anwendungsbezogener Gefährdungsbeurteilung führen. In dem Fall sind in Deutschland die in der europäischen Arbeitsschutzrichtlinie 2006/25/EG festgelegten bzw. in der TROS Laserstrahlung aufgeführten EGW rechtsverbindlich.

■ In Deutschland sind die in der europäischen Arbeitsschutzrichtlinie 2006/25/EG festgelegten Expositionsgrenzwerte rechtsverbindlich.

5.3 Schutzmaßnahmen vor Gefährdungen durch Laserstrahlung

Schutzmaßnahmen bei Laserstrahlung hängen sowohl von der Klasse der Lasereinrichtung als auch von ihrer Anwendung ab. Möglich sind technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen (TOP-Prinzip), wobei die technischen Maßnahmen vorrangig sind, weil sie Gefährdungen für Benutzerinnen, Benutzer und Unbeteiligte von vornherein vermeiden können. Verantwortlich für die Einhaltung der Schutzmaßnahmen ist grundsätzlich der Betreiber der Lasereinrichtung. Einige Beispiele für Schutzmaßnahmen zeigt Tabelle 5.

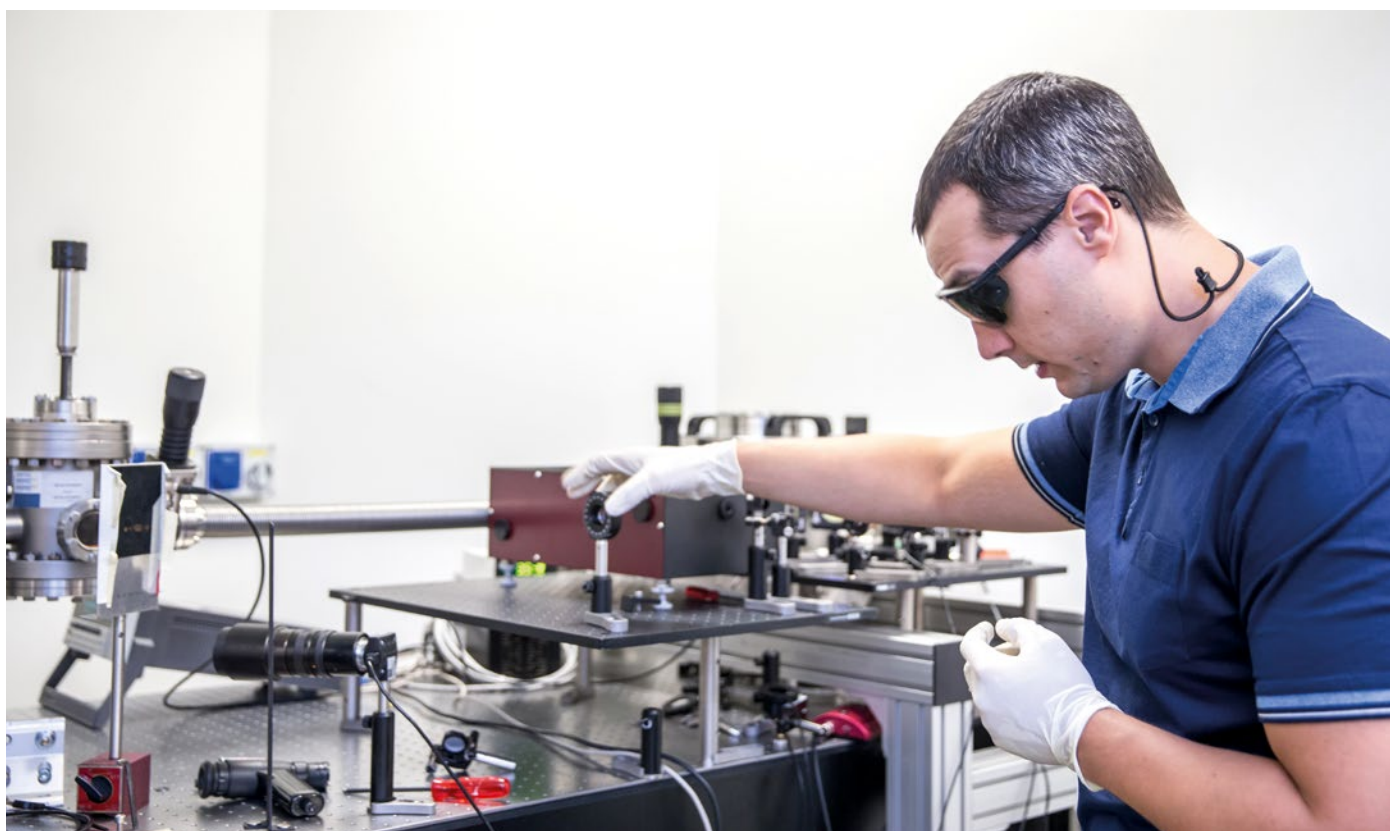
■ Technische Schutzmaßnahmen sind vorrangig, weil sie Gefährdungen für Benutzerinnen, Benutzer und Unbeteiligte von vornherein vermeiden können.

Tab. 5 Beispiele für Schutzmaßnahmen beim Umgang mit Laserstrahlung

Schutzmaßnahmen		
Technische	Organisatorische	Persönliche
Einhausung	Benennung einer bzw. eines Laserschutzbeauftragten (für die Laserklassen 3R, 3B und 4)	Laserschutzbrillen
Schlüsselschalter, um die Nutzung nur berechtigten Personen zu gestatten	Unterweisung der Beschäftigten	Schutzhandschuhe
Emissionsanzeige, die deutlich anzeigt, wann der Laser in Betrieb ist	Reglementierung des Zugangs zum Laserbereich	Schutzkleidung
Überwachungseinrichtung, die den Zugang zum gefährdeten Bereich kontrolliert		
Abschirmung des Laserbereichs		

6

Forschungsergebnisse zum sicheren Umgang mit Lasern



Einige von der BAuA initiierte Forschungsprojekte zum sicheren Umgang mit Lasern werden im Folgenden dargestellt. Ergebnisse mit besonderem Praxisbezug sind hervorgehoben.

6.1 Aktive Schutzreaktionen erhöhen die Sicherheit

Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen sind ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitskonzeptes beim Umgang mit Lasern der Klasse 2 und 2M. Beim Einsatz eines Lasers dieser Klassen, dessen Dauerstrichleistung auf 1 mW begrenzt ist, wird ein Schaden der Netzhaut vermieden, wenn die Bestrahlungsdauer des Laserstrahls auf das Auge kürzer als 0,25 s (250 ms) ist. Es wird vorausgesetzt, dass innerhalb dieser Zeit der Lidschlussreflex erfolgt und dadurch der Augenschutz gewährleistet ist. Der **Lidschlussreflex** äußert sich durch ein rasches Verschließen der Augenlider.

6.1.1 Lidschlussreflex

Im Forschungsprojekt „Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes“ sollte untersucht werden, ob der Lidschlussreflex als ausreichender Schutzmechanismus bei Expositionen durch Laserstrahlung entsprechend den Laserklasse-2-Bedingungen angesehen werden kann. Bei der Studie wurde der Laserstrahl über einen Spiegel und eine Linse zentral in das Auge der Versuchsperson gelenkt, deren Kopf durch Kinnauflage und angelegte Stirn fixiert war. Untersucht wurde außerdem, ob eine Abhängigkeit des Lidschlussreflexes von der Fleckgröße des Bildes auf der Netzhaut besteht. Aus diesem Grund wurden auch Untersuchungen mit LEDs durchgeführt. Weil LEDs im Gegensatz zu typischen Laserquellen sogenannte ausgedehnte Quellen sind, ist ein durch LED-Bestrahlung erzielter Fleck auf der Netzhaut größer als bei der Laserbestrahlung.

Insgesamt hat man 1193 Versuchspersonen mit Lasern sowie 261 mit LEDs bestrahlt. Bei Laserstrahlung trat bei 17 % von ihnen der Lidschlussreflex auf; bei LED-Strahlung waren es 23 %. Es konnte festgestellt werden, dass die Häufigkeit des Lidschlussreflexes mit der Fleckgröße auf der Netzhaut zunimmt. Eine mögliche Erklärung könnte darin liegen, dass das größere Bild auf der Netzhaut mehr Sehzellen stimuliert.

Die Tatsache, dass in diesen Untersuchungen unter typischen Laserklasse-2-Bedingungen nur 17 % der Versuchspersonen mit einem Lidschlussreflex reagierten, zeigt, dass dieser Reflex als alleiniger Schutzmechanismus bei Expositionen durch Laserstrahlung der Klasse 2 nicht ausreicht.

■ Der Lidschlussreflex reicht als alleiniger Schutz bei Expositionen durch Laserstrahlung der Klasse 2 nicht aus.

6.1.2 Abwendungsreaktionen

Im Folgeprojekt „Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung“ sollte geklärt werden, ob die Augensicherheit bei der Exposition durch Laserstrahlung bei Lasern der Klasse 2 über Abwendungsreaktionen gewährleistet ist. Mit **Abwendungsreaktionen** sind alle natürlichen Reaktionen gemeint, die das Auge vor Gefährdungen durch einen Laser der Klasse 2 innerhalb von 250 ms schützen. Insbesondere geht es dabei um Augenbewegungen wie Sakkaden, Augenlidbewegungen, die willkürlich (Lidschluss) oder unwillkürlich (Lidschlussreflex) die Pupille des Auges bedecken, sowie um Kopfbewegungen. Anders als bei den Lidschlussreflexuntersuchungen wurde bei diesen Untersuchungen die Bewegung des Kopfes der Versuchspersonen nicht eingeschränkt.

■ Abwendungsreaktionen sind natürliche Reaktionen, die das Auge vor Gefährdungen durch einen Laser der Klasse 2 schützen sollen: Lidschluss, Lidschlussreflex oder Kopfbewegungen.

Von insgesamt 2022 Versuchspersonen reagierten erneut etwa 17 % beim Auftreffen eines Laserstrahls der Klasse 2 mit einem Lidschlussreflex oder Lidschluss. Mit anderen Abwendungsreaktionen reagierten nur 6 % von 829 Versuchspersonen. Damit haben diese Untersuchungen bestätigt, dass Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen keine ausreichende Sicherheit des Auges beim Umgang mit Lasern der Klasse 2 gewährleisten können.

Ferner wurde in diesem Forschungsprojekt untersucht, ob eine bewusste, aktive Schutzreaktion infolge einer zuvor erfolgten Unterweisung den nicht automatisch einsetzenden Schutz bei einer Laserklasse-2-Exposition gewährleisten kann. Eine **aktive Schutzreaktion** ist das bewusste, aktive Schließen der Augen und das gleichzeitige Abwenden des Kopfes. Nach einer Unterweisung der Personen vor Versuchsbeginn zeigten 34 % einen Lidschluss sowie 18 % eine andere Abwendungsreaktion, wohingegen es bei denen, die vorab nicht unterwiesen wurden, nur 14 % bzw. 2 % waren. Etwa 75 % der Versuchspersonen waren innerhalb einer Sekunde geschützt. Es konnte somit gezeigt werden, dass der Schutz vor einer Laserstrahlexposition mit Lasern der Klasse 2 durch aktive Schutzreaktionen deutlich gesteigert werden kann.

■ Durch aktive Schutzreaktionen wie das bewusste Schließen der Augen und das Abwenden des Kopfes kann der Schutz vor Laserstrahlung der Klasse 2 deutlich gesteigert werden.

Deswegen wurde ein Konzept der aktiven Schutzreaktionen vorgeschlagen, das eine möglicherweise gefährliche Bestrahlung verhindern sollte. Zukünftig sollte von aktiven Schutzreaktionen ausgegangen werden, statt auf physiologische Reaktionen wie Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen zu setzen.

6.1.3 Aktive Schutzreaktionen in der Praxis

Die beiden vorgestellten Forschungsprojekte brachten überraschende Ergebnisse und hatten verschiedene Auswirkungen. Während das Sicherheitskonzept der Laserklassen 2 und 2M in der Norm DIN EN 60825-1 aus dem Jahr 2001 noch allein auf Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes beruhte, wurde die Beschreibung dieser Klassen in der Ausgabe der Norm DIN EN 60825-1 aus den Jahren 2008 und 2015 ergänzt durch die Aufforderung:

„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 das Vermeiden absichtlichen Blickens in den Strahl.“

■ Aufforderung bei Laserklassen 2 und 2M: nicht in den Strahl blicken, Augen schließen, Kopf wegbewegen.

Bei Lasern der Klasse 3R wurde durch die Aufnahme der folgenden Empfehlung darauf hingewiesen, dass diese Laser dort nicht angewendet werden sollten, wo mit einer Exposition der Augen gerechnet werden kann:

„Laser der Klasse 3R sollten nur dann eingesetzt werden, wenn ein direkter Blick in den Strahl unwahrscheinlich ist.“

In der „Technischen Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)“ wird auch Bezug auf die Erkenntnisse zum Lidschlussreflex und zu anderen Abwendungsreaktionen genommen:

„Beim bewussten Blick in den Strahl eines Lasers der Klassen 2 oder 3A steigt 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. Der Schutz vor einer Laserstrahlexposition mit Lasern der Klasse 2 kann durch aktive Schutzreaktionen deutlich gesteigert werden. Aktive Schutzreaktionen sind das bewusste, aktive Schließen der Augen und das Abwenden des Kopfes.“

6.2 Blendung bei Tätigkeiten vermeiden

Neben direkten Gefährdungen sind bei der Gefährdungsbeurteilung durch den Arbeitgeber auch indirekte Gefährdungen, wie etwa eine vorübergehende Blendung, zu berücksichtigen. Unter **Blendung** versteht man ein Ereignis, das durch eine optische Quelle hervorgerufen wird, deren Intensität groß genug ist, um die Sehfähigkeit einer Person zu verringern oder Belästigungen bzw. Unbehagen zu bewirken.

Eine Störung des Sehvermögens, verursacht durch Blendung, kann bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten, die das Erkennen der Form und Farbe von Anzeigen voraussetzen, zu einem erhöhten Unfallrisiko führen. Dazu gehören u. a. Tätigkeiten wie das Führen eines Fahrzeugs (zu Lande, zu Wasser, in der Luft), das Bedienen einer Maschine sowie Installations- oder Reparaturarbeiten. Nicht zuletzt können auch Schreckreaktionen, die als Folge einer überraschenden Blendung eintreten, unter Umständen ein erhebliches Gefährdungspotenzial am Arbeitsplatz mit sich bringen. Zwischenfälle, bei denen Pilotinnen und Piloten in Zivil- und Militärflugzeugen sowie in Polizei- und Rettungshelikoptern während des Flugs absichtlich von einem Laserstrahl getroffen werden, können ernste Konsequenzen haben.

■ Eine Störung des Sehvermögens, die durch Blendung verursacht wird, kann das Unfallrisiko erhöhen.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) weist in ihrer Empfehlung „Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren“ auf die Blendungsgefahr durch künstliche optische Quellen wie Laser der Klasse 2 und 2M hin und empfiehlt verschiedene **Maßnahmen zu ihrer Vermeidung** bzw. Minimierung. Die „Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)“ weist ebenfalls auf das Potenzial einer Blendung hin:

■ Auch Laser der Klasse 1 können durch ihre Blendwirkung ein hohes Gefahrenpotenzial haben.

„Auch Laser der Klasse 1 können durch ihre Blendwirkung ein hohes sekundäres Gefahrenpotenzial besitzen. Wie nach dem Blick in andere helle Lichtquellen, z. B. 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.“

In der Norm DIN EN 60825-1 werden ebenfalls indirekte Effekte wie Blendung angesprochen. Bei der Beschreibung der Klasse 2 steht folgende Formulierung:

„Es können jedoch durch den Strahl einer Lasereinrichtung der Klasse 2 Irritationen, Blitzblindheit und Nachbilder entstehen, besonders bei niedriger Umfeldhelligkeit. Dies kann allgemeine indirekte Folgen für die Sicherheit haben, die von zeitweiliger Störung des Sehens und von den Blendungsreaktionen herrühren. Diese Sehstörungen könnten bei sicherheitsrelevanten Tätigkeiten zu besonderer Sorge Anlass geben, wie beim Arbeiten mit Maschinen oder in großer Höhe, mit Hochspannung oder beim Fahren.“

Hinweise auf Blendung sind auch bei den Beschreibungen der Klassen 1, 1M, 2M und 3R zu finden.



6.2.1 Blendung durch optische Strahlungsquellen

Die Beeinträchtigung des Sehvermögens durch Blendung mit Lasern und LEDs war Gegenstand der Untersuchung im Forschungsprojekt „Blendung durch optische Strahlungsquellen“. Es wurden Laser mit niedriger Leistung sowie Hochleistungs-LEDs in verschiedenen speziell entwickelten Testanordnungen eingesetzt. Insgesamt standen 191 Versuchspersonen zur Verfügung, 1736 Blendversuche wurden durchgeführt.

In Bezug auf die Blendung durch Laserstrahlung wurde zunächst die Abhängigkeit der zeitlichen Dauer eines Nachbildes vom Ort des Eintreffens auf der Netzhaut und von der Expositionsdauer untersucht. Das Nachbild wird als eine visuelle Empfindung definiert, die nach Verschwinden des Lichtreizes an der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes auftritt. Es konnte gezeigt werden, dass eine zentralere Blendung (d. h. eine Blendung im Fleck des schärfsten Sehens) mit einer Expositionsdauer von 10 s eine Nachbilddauer von 300 s hervorruft. Im Anschluss an eine zentrale Blendung mit einem Laserstrahl wurden zwei weitere Tests durchgeführt: einer zur Ermittlung der Lesestörzeit und einer zur Bestimmung der Zeit, in der die Sehschärfe beeinträchtigt war. Als Ergebnis ließ sich feststellen, dass eine Nachbilddauer zwischen 300 s und 350 s gleichbedeutend mit einer Lesestörzeit von 35 s bis 70 s ist, die die Sehschärfe zwischen 60 s und 90 s lang beeinträchtigt.

Eine wesentliche Erkenntnis der Untersuchungen mit LEDs war, dass das Farbkontrastsehvermögen durch Blendung für Zeiten von mehr als 2 min, im Einzelfall sogar 3 min, deutlich beeinträchtigt werden kann. Es besteht daher die Möglichkeit, dass bestimmte farbige Objekte in andersfarbiger Umgebung bis zu 3 min nicht korrekt wahrgenommen werden.

Als Ergebnis dieses Forschungsprojekts wurde vorgeschlagen, die Lichtquellen zur Erleichterung der Gefährdungsanalyse in die **Blendgruppen** B0 (praktisch nicht blendend), B1 (gering blendend) und B2 (stark blendend) einzuteilen, wobei dies von der Dauer der Sehstörung abhängig gemacht werden soll. Die Blendgruppe B0 entspricht einer Sehbeeinträchtigung bis 2 s, B1 bis 10 s und B2 mehr als 10 s.

6.2.2 Blendung unter Dämmerungsbedingungen

Mit den Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts „Blendung durch künstliche optische Strahlung unter Dämmerungsbedingungen“ wurde das Ziel verfolgt, eine belastbare Grundlage für eine Gefährdungsbeurteilung zu schaffen, um feststellen zu können, welche Gefährdungen am Arbeitsplatz bei einer Blendung durch künstliche optischen Quellen, wie Laser und LEDs, unter Dämmerungsbedingungen entstehen können.

In Probandenversuchen unter Dämmerungsbedingungen konnte gezeigt werden, dass der Pupillenreflex (die Engstellung der Pupille als Folge eines Lichtreizes) innerhalb von 250 ms nur unwesentlich zum Schutz vor einer möglichen Überexposition beiträgt. Des Weiteren wurde die Lese- und Sehschärfefeeinträchtigung bestimmt. Dabei zeigte sich eine weitgehende Übereinstimmung zwischen der Zeitdauer der Beeinträchtigungen und der Wellenlängenabhängigkeit der spektralen Hellempfindlichkeit. Sie lagen bei einer Expositionsdauer von 100 ms maximal zwischen 3 s im blauen Spektralbereich bei 405 nm und 30 s im grünen Spektralbereich bei 532 nm.

Darüber hinaus wurde eine Analyse potenzieller Gefährdungen durch vorübergehende Blendung bei verschiedenen Tätigkeiten (z. B. Steuern von Flugzeugen und Hubschraubern) durchgeführt und eine Blendung im Cockpit in Simulationseinrichtungen getestet (Abbildung 9). Sowohl beim Pupillenreflex als auch bei Sehbeeinträchtigungen durch vorübergehende Blendung zeigten sich starke individuelle Unterschiede.

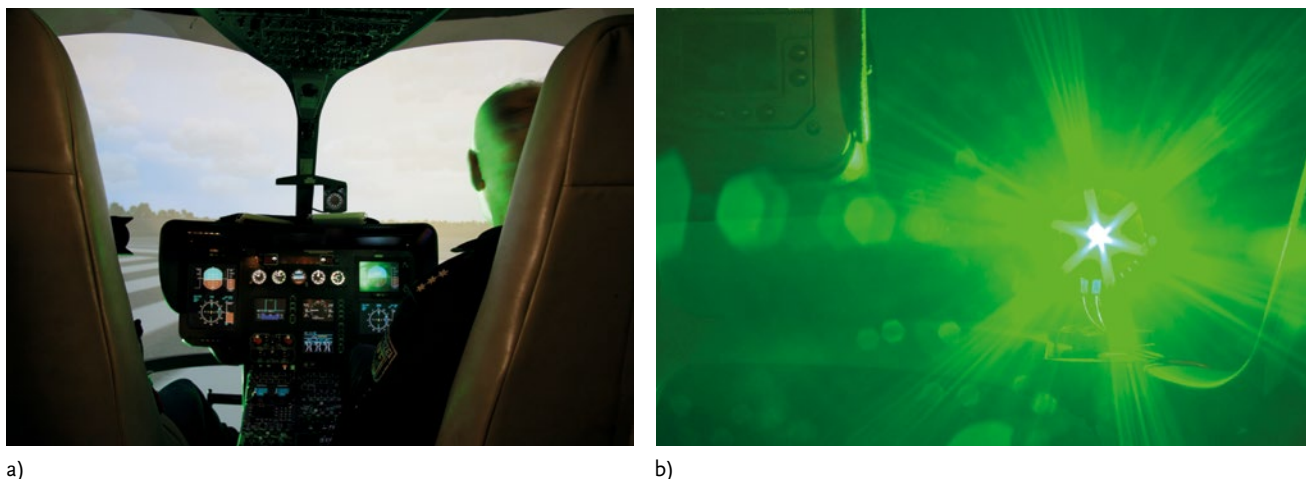


Abb. 9 a) Flugschüler im Hubschrauber-Flugsimulator mit Blendung durch grüne LED-Blendlichtquelle;
b) Blendeindruck durch eine LED-Blendlichtquelle im Flugsimulator.

6.3 Sichere persönliche Schutzausrüstung

Der sichere Betrieb von Lasern höherer Leistung ist nur durch die Anwendung umfangreicher Schutzmaßnahmen zu gewährleisten. Personen, die mit diesen Tätigkeiten beauftragt sind, müssen **persönliche Schutzausrüstung (PSA)**, insbesondere Laserschutzbrillen, tragen. Deren Schutzwirkung wird dabei auf die Wellenlänge und die Leistung des Lasers abgestimmt.

Die persönliche Schutzausrüstung muss auf die Wellenlänge und die Leistung des Lasers abgestimmt sein.



6.3.1 Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern

Die PSA-Produkte müssen vor ihrer Bereitstellung auf dem Markt ein Konformitätsbewertungsverfahren gemäß der EU-PSA-Verordnung 2016/425 durchlaufen. Hersteller und Inverkehrbringer sind nach dieser Verordnung verpflichtet, ein **Mindesthaltbarkeitsdatum** für ihr Produkt anzugeben. Bei Produkten, die mit harmonisierten Normen übereinstimmen, wird die Konformität mit den grundlegenden Gesundheitsschutz- und Sicherheitsanforderungen vermutet. Maßgeblich für die Prüfung von Laserschutzbrillen ist die DIN EN 207 „Persönlicher Augenschutz – Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen)“. Nach der Norm müssen neben der Laserbeständigkeit der spektrale Transmissionsgrad (die Filterwirkung von Filtergläsern) sowie die Beständigkeit gegen UV-Strahlung und erhöhte Temperatur, die Entzündbarkeit und die mechanische Festigkeit geprüft werden. Diese Prüfungen werden jedoch nur an fabrikneuen Laserschutzbrillen vorgenommen.

Anlass des Forschungsprojekts „Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern“ waren Diskussionen aus der betrieblichen Praxis und in Normungsgremien, dass im Laufe der Zeit durch Nutzung oder durch werkstoffbezogene Prozesse innerhalb der Filtermaterialien die Schutzwirkung eingeschränkt wird oder sogar ganz verloren gehen könnte.

Eine Reihe von Laserbelastungsprüfungen wurde an zwei Schutzfiltermaterialien, Polymethylmethacrylat (PMMA) und Polycarbonat (PC), durchgeführt. Dafür wurden einerseits in der Praxis verwendete (natürlich gealterte) Laserschutzbrillen erworben und andererseits parallel dazu fabrikneue, mit UV-Strahlung künstlich gealterte Modelle. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zeigten sowohl die in der Praxis real gealterten Filter als auch die mittels UV-Bestrahlung künstlich gealterten Laserschutzfilter **keine kritische Abnahme ihrer Schutzfunktion**. Lediglich die normativ festgelegten optischen Kenngrößen Streulicht und Transmission sind im Falle künstlich gealterter PMMA-Filter an die in der Norm definierten Grenzen gestoßen.

■ Ältere Laserschutzfilter zeigen keine kritische Abnahme ihrer Schutzfunktion.

6.3.2 Laserschutzfilter und Laserstrahldurchmesser

Neben der mittleren Laserleistung ist der Durchmesser des Laserstrahls ein entscheidender Faktor für die zeitliche Stabilität (Standzeit) von exponierten Laserschutzfiltern. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Sicherheit von Laserschutzfiltern in Abhängigkeit des Strahldurchmessers“ wurde die Laserbelastungsgrenze zweier Laserschutzfiltermaterialien, Polymethylmethacrylat (PMMA) und Cellulose-Acetat (CA), in Abhängigkeit vom Laserstrahldurchmesser und von der Laserleistung untersucht. Auf Basis der Forschungsergebnisse wurde für Schutzbrillenträgerinnen und -träger eine **Handlungsempfehlung für die Auswahl der erforderlichen Brillenschutzstufe** entwickelt.

6.3.3 Handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Die Verwendung **handgeführter oder handpositionierter Lasermaterialbearbeitungsgeräte (HLG)** ist weit verbreitet. Dabei werden HLG nicht nur im industriellen Umfeld, sondern auch im medizinischen Bereich oder bei der Denkmalpflege zum Schweißen, Schneiden, Auf- oder Abtragen eingesetzt. Aufgrund ihrer Flexibilität bieten sie einige Vorteile gegenüber fest installierten Laseranlagen, wie etwa bei der Bearbeitung geringer Stückzahlen (keine Programmierung nötig) oder bei großen, unbeweglichen Bauteilen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung“ sollte persönliche Schutzausrüstung für die HLG geprüft und qualifiziert werden, um Mindestanforderungen an den Laserschutz zu definieren.

Verschiedene am Markt verfügbare technische Textilien und Leder, die als Hitze- und Flammenschutz-Bekleidung (z. B. für Schweißerinnen und Schweißer oder hitze-exponierte Beschäftigte) Verwendung finden, wurden untersucht. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Schutz von gewöhnlicher Baumwollkleidung gegen Laserstrahlung gering ist (Abbildung 10). Vorteilhaft sind Schutzsysteme aus **Aramidgeweben** und/oder **Geweben, die mit Metall kaschiert oder beschichtet** sind. Bei der Auswahl und Konfektionierung der Schutzsysteme muss auf einen akzeptablen Tragekomfort der Schutzbekleidung und eine ausreichende Fühlbarkeit der Handschuhe geachtet werden.

■ Vorteilhaft ist Schutzkleidung aus Aramidgeweben oder metallisch beschichteten Geweben.

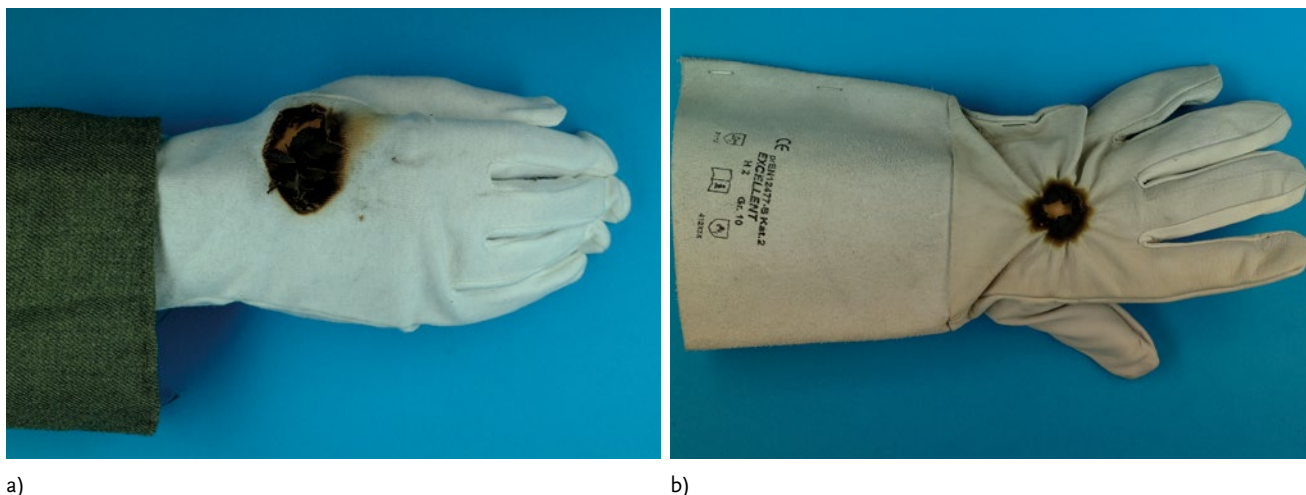


Abb. 10 Aufnahmen von Handschuhen, die mit einem CO₂-Laser bestrahlt wurden:

- a) Leichter Baumwollhandschuh, Bestrahlungsstärke $2,7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$, Flammenbildung 1,5 s, Lochbildung 2 s;
- b) Schweißerschutzhandschuh, Bestrahlungsstärke $3,7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$, Schrumpfen sofort, Lochbildung 5,5 s.

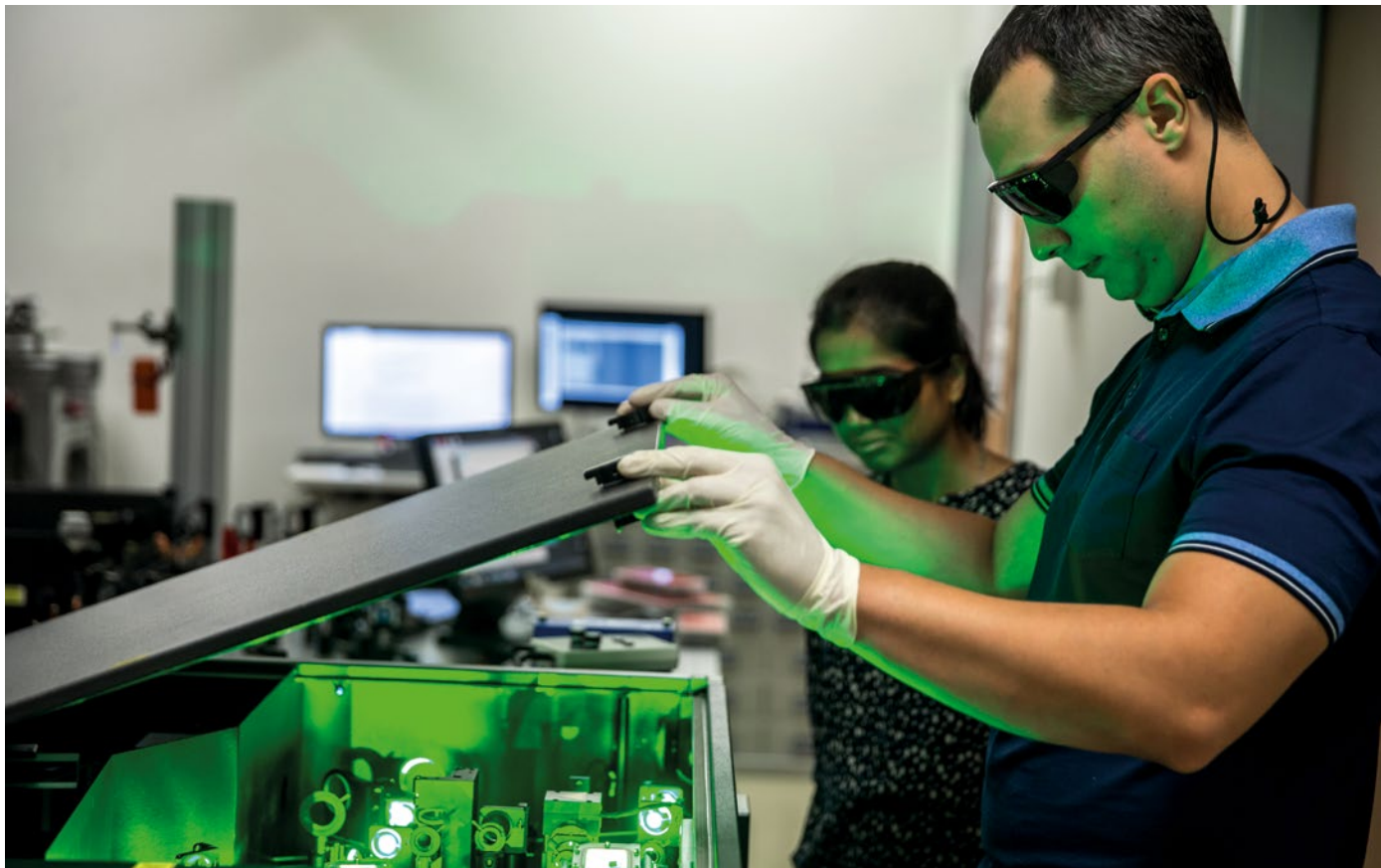
Ausgangspunkt des Forschungsprojekts „Konstruktive Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung“ war eine detaillierte Analyse der bei HLG für die industrielle Materialbearbeitung vorhandenen konstruktiven Sicherheitseinrichtungen. Die Recherche ergab, dass u. a. kaum Herstellerangaben zur Sicherheitssteuerung vorhanden waren, obwohl diese für die realisierbare Sicherheit bei unbeabsichtigter Exposition gegenüber Laserstrahlung entscheidend sind. Defizite betreffen nicht nur den bestimmungsgemäßen Betrieb, der z. B. mit Aufsatzkontrollen überwacht wird, sondern auch Fehlerfälle wie ein Abrutschen des HLG vom Werkstück, verbunden mit der Möglichkeit reflektierter Laserstrahlung.

Eine theoretische Betrachtung möglicher Fehlerbedingungen (z. B. Verkappen des HLG) wurde für eine Reihe von HLG durchgeführt. Daraus konnten Reaktionszeiten zur Deaktivierung des Laserstrahls bestimmt und Anforderungen an konstruktive Sicherheitseinrichtungen und -steuerungen abgeleitet werden. Für einzelne Sicherheitsfunktionen wurden außerdem die **erforderlichen Performance Levels** ermittelt. Ein Performance Level gibt die Fähigkeit von sicherheitsbezogenen Teilen einer Steuerung an, eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Bedingungen auszuführen.

Mit den Projektergebnissen gibt es eine umfangreiche Informationsbasis, wenn es um die Beurteilung von Risiken beim Umgang mit HLG geht. Projektergebnisse sind auch in die Erarbeitung der DIN EN ISO 11553-2:2009-03 „Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“ eingeflossen.

■ Für die Beurteilung von Risiken beim Umgang mit handgeführten Lasern zur Materialbearbeitung gibt es eine umfangreiche Informationsbasis.

Fazit – Verhaltensregeln beim Umgang mit Lasern



Laser der Klasse 2 – wie Laserpointer, Laserwasserwaagen und Justierlaser – haben sich im Verbraucherbereich stark verbreitet. Sie werden von Personen benutzt, die in den meisten Fällen zu wenig über die biologische Wirkung von Laserstrahlung und die damit verbundenen Gefährdungen wissen. Umso wichtiger ist die Erkenntnis aus den vorgestellten BAuA-Forschungsprojekten, dass es keinen physiologisch bedingten Schutzmechanismus (Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen) gibt, der bei einem direkten Blick in einen Laserstrahl der Klasse 2 sicher vor einem Augenschaden schützen kann. Auch eine Blendung mit länger andauernder Sehstörung kann hervorgerufen werden.

Alle gewerblichen Nutzerinnen und Nutzer von Lasern der Klassen 1M, 2 und 2M sowie Benutzerinnen und Benutzer von Laserjustierbrillen müssen über die Risiken eines direkten Blicks in den Laserstrahl unterwiesen werden. **Laserjustierbrillen** schützen die Augen bei der Positionierung von Lasern, indem sie die jeweilige Laserstrahlung auf Werte der Klasse 2 verringern, gegen die es keine ausreichende Sicherheit durch Lidschlussreflex und Abwendungsreaktion gibt. Gerade bei Justierarbeiten ist die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten direkten und unter Umständen längeren Blicks in den Laserstrahl relativ hoch.

■ Alle gewerblichen Nutzerinnen und Nutzer der Laserklassen 1M, 2 und 2M müssen über die Risiken eines direkten Blicks in den Laserstrahl unterwiesen werden.

Zum **Schutz der Gesundheit** ist die Beachtung der folgenden **Regeln** wichtig:

- Niemals den Laserstrahl auf andere Personen richten!
- Niemals absichtlich direkt in den Laserstrahl blicken!
- Möglichst den Kopf nicht in die Ebene des Laserstrahls bewegen!
- Falls Laserstrahlung ins Auge trifft, sind die Augen bewusst zu schließen und der Kopf ist sofort aus dem Strahl zu bewegen (z. B. bei Laserattacken)!
- Bei der Verwendung von Lasern der Klassen 1M und 2M dürfen keine optischen Instrumente zur Betrachtung der Strahlungsquelle verwendet werden!

■ Die wichtigsten Schutzregeln:
Den Laserstrahl nicht auf andere richten, nie in den Strahl blicken, die Augen bewusst schließen, den Kopf aus dem Strahl bewegen.

Für den Verbraucherbereich sind in den Gebrauchsanweisungen die klassenspezifischen Verhaltensweisen und Handlungsanleitungen entsprechend dem Stand der Technik klar und unmissverständlich zu benennen. Gefährdungen gehen auch von falsch klassifizierten Lasern aus.

Weiterführende Informationen

Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung vom 19. Juli 2010

(BGBl. I S. 960), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 6 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist. Verfügbar unter:

www.gesetze-im-internet.de/ostrv/BJNR096010010.html

Bühning, R.; Krauß, H.-J.; Janßen, W.: Alterungsbeständigkeit von Laserschutzfiltern.

1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2020),

F 2442. Verfügbar unter: www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2442.html

DIN EN 207:2017-05: Persönlicher Augenschutz – Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen). Deutsche Fassung von EN 207:2017

DIN EN 60825-1:2015-07 (VDE 0837-1:2015-07): Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2014). Deutsche Fassung von EN 60825-1:2014

DIN EN ISO 11553-2:2009-03: Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte (ISO 11553-2:2007). Deutsche Fassung von EN ISO 11553-2:2008

EN 50689:2021: Safety of laser products – Particular Requirements for Consumer Laser Products

Meier, O.; Püster, Th.; Beier, H.; Wenzel, D.: Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2008), F 2117. Verfügbar unter:

www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2117.html

Produktsicherheitsgesetz vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146, 3147), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert worden ist (ProdSG). Verfügbar unter: www.gesetze-im-internet.de/prodsg_2021/BJNR314700021.html

Püster, Th.; Herzog, D.; Hustedt, M.: Konstruktive Sicherheitseinrichtungen für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2011), F 2158. Verfügbar unter:

www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2158.html

Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Beckmann, D.; Al Ghouz, I.; Ott, G.; Brose, M.: Blendung durch künstliche optische Strahlung unter Dämmerungsbedingungen. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2014), F 2310. Verfügbar unter: www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2310.html

Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Hofmann, J.: Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidchlussreflexes. 1. Auflage. Bremerhaven: Wirtschafts- verlag NW Verlag für neue Wissenschaft (2003), F 1775. (Schriftenreihe der Bundes- anstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht, Fb 985)

Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Ott, G.; Janßen, M.; Brose, M.: Blendung durch optische Strahlungsquellen. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2008), F 2185. Verfügbar unter: www.baua.de/DE/Angebote/ Publikationen/Berichte/F2185.html

Reidenbach, H.-D.; Hofmann, J.; Dollinger, K.; Ott, G.: Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung. 1. Auflage. Bremerhaven: Wirt- schaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft (2006), F 1984. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht, Fb 1069)

Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ TXT/?uri=CELEX:32006L0025>

Strahlenschutzkommission (SSK): Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren – Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006. Verfügbar unter: www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2006/Blendung_ Lichtquellen.pdf?__blob=publicationFile

Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Laserstrahlung GMBL. 2018 S. 962 [Nr. 50–53] (21.11.2018) Änderung: GMBL 2021, S. 1002 [Nr. 46] (23.08.2021). Verfügbar unter: www.baua.de/DE/Angebote/ Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TROS/TROS.html

Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2013). Verfügbar unter: www.baua.de/DE/Themen/Anwendungssichere-Chemikalien-und-Produkte/ Produktsicherheit/Laserprodukte/pdf/Technische-Spezifikation-Laser.html

Urmoneit, U.; Krauß, H.-J.; Ott, G.: Sicherheit von Laserschutzfiltern in Abhängigkeit des Strahldurchmessers. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2016), F 2335. Verfügbar unter: www.baua.de/DE/Angebote/ Publikationen/Berichte/F2335.html

Verordnung (EU) 2016/425 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2016 über persönliche Schutzausrüstungen und zur Aufhebung der Richtlinie 89/686/EWG des Rates. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0425&rid=1>

Impressum**Laser sicher anwenden****Herausgeber**

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
 Friedrich-Henkel-Weg 1–25
 44149 Dortmund
 Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
 Telefon 0231 9071-2071
 Telefax 0231 9071-2070
 E-Mail info-zentrum@baua.bund.de
 Internet www.baua.de

Zitiervorschlag

Udovicic, L. und Janßen, W., 2022. Laser sicher anwenden. Dortmund:
 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. baua: Praxis.

Autorin und Autor

Dr. Ljiljana Udovicic und Winfried Janßen
 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Redaktion

L2 Strategische Kommunikation
 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Verantwortlich

Dr. Andrea Thalmann, Christian Schipke
 Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Gestaltung und Produktion

wbv Media GmbH & Co. KG, Bielefeld

Fotos

iStock.com: Titel Rabizo, S. 3 twilightproductions, S. 5 tiero, S. 7 Techa Tungateja,
 S. 8 FG Trade, S. 9 artimedvedev, S. 11 GoodLifeStudio, S. 13 ViktorCap, S. 15 1933bkk,
 S. 17 oben ittipon2002, S. 17 unten azur13, S. 18 NIKITA ARMYAGOV, S. 19 fotojog,
 S. 20 Dmytro Varavin, S. 21 SafakOguz, S. 23, S. 32 CasarsaGuru, S. 27 Mikhail Spaskov,
 S. 29 djedzura
 Stock.adobe.com: S. 16 Digipic
 S. 31 Thomas Püster, Laser Zentrum Hannover e.V., S. 28 Hans-Dieter Reidenbach, TH Köln

In dieser Broschüre wird eine geschlechtergerechte Sprache verwendet. Dort, wo das nicht möglich ist oder die Lesbarkeit eingeschränkt würde, gelten die personenbezogenen Bezeichnungen für alle Geschlechter.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.



1. Auflage, November 2022
 ISBN 978-3-88261-746-7 (Print)
 doi: 10.21934/baua:praxis20220901 (online)

[https://doi.org/10.21934/
 baua:praxis20220901](https://doi.org/10.21934/baua:praxis20220901)

