

Selbst bei schwachen Lasern können hohe Leistungs- und Energiedichten auftreten, die zu schweren Unfällen am Auge aber auch an der Haut führen können. Die Expositionsgrenzwerte für einen Augenschaden, die im Folgenden beschrieben werden, liegen erstaunlich niedrig. Daher sind für das sichere Arbeiten mit Lasern Gesetze und Verordnungen zu beachten. Es muss ein *Laserbereich* festgelegt und abgegrenzt werden, in dem die Expositionsgrenzwerte überschritten werden können. In diesem Bereich muss eine Laserschutzbrille getragen werden. Weiterhin muss für jede Laseranlage eine *Gefährdungsbeurteilung* erstellt und ein *Laserschutzbeauftragter* benannt werden.

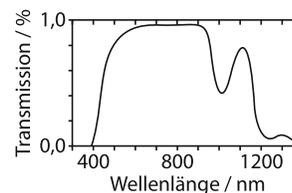
Die gesetzliche Grundlage des Laserstrahlenschutzes ist die *Arbeitsschutzverordnung* zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV). In diesem Gesetz werden die wichtigsten Informationen und Sicherheitsmaßnahmen für den Anwender von Laserstrahlung beschrieben. Zusätzlich sind in der Literaturverzeichnung eine Reihe von Informationsschriften zitiert, die etwas spezieller auf besondere Fälle eingehen. Die technischen Grundlagen für die Lasersicherheit sind in verschiedenen Normen beschrieben, die insbesondere für die Gerätehersteller zu beachten sind. Wichtig ist die Normenreihe Sicherheit von Lasereinrichtungen DIN EN 60 825.

Besondere Gefahren durch Laserstrahlung entstehen für das Auge, worauf im folgenden genauer eingegangen werden soll. Das Auge ist im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 1400 nm transparent, so dass die Laserstrahlung auf der Netzhaut fokussiert wird (Abb. 24.1). Dabei entsteht ein Brennfleck mit etwa 20 μm Durchmesser, und die Leistungsdichte erhöht sich ungefähr um das 120 000-fache ($\approx (\text{Pupillendurchmesser } (7 \text{ mm}) : 20 \mu\text{m})^2$).

In dem Bereich zwischen 400 und 1400 nm ist daher Laserstrahlung sehr gefährlich, so dass schon kleine Leistungen unter 1 mW unter ungünstigen Bedingungen zu einem Netzhautschaden führen können. Besondere Vorsicht ist im Infraroten A (700 bis 1400 nm) geboten, da die Strahlung nicht sichtbar ist.

Im Infraroten B und C (oberhalb von 1400 nm) wird die Strahlung stark vom Gewebewasser absorbiert, so dass sie nur in die oberen Hornhautschichten eindringt. Die

Abb. 24.1 Durchlässigkeit des menschlichen Auges bis zur Netzhaut in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Der sichtbare Spektralbereich liegt zwischen 400 und 700 nm



Grenzwerte für eine Schädigung des Auges sind hier höher, da die Fokussierung durch das Auge entfällt.

Auch im Ultravioletten findet eine starke Absorption in der Hornhaut statt. Allerdings sind die Grenzwerte relativ niedrig, da aufgrund der hohen Quantenenergie der Photonen photochemische Prozesse stattfinden, die eine krebserregende Wirkung haben können. Der Schaden ist akkumulativ, d. h. auch geringe Bestrahlungen können über größere Zeiträume zu einer Schädigung führen.

24.1 Expositionsgrenzwerte für das Auge

Die Expositionsgrenzwerte (maximal zulässige Bestrahlung (MZB)) hängen von der Wellenlänge und der Bestrahlungszeit ab. Oberhalb dieser Grenzwerte kann das Auge geschädigt werden. In Tab. 24.1 sind vereinfachte Werte für das Auge im Fall von Einzelpulsen dargestellt. Genauere Angaben entnimmt man Abb. 24.2.

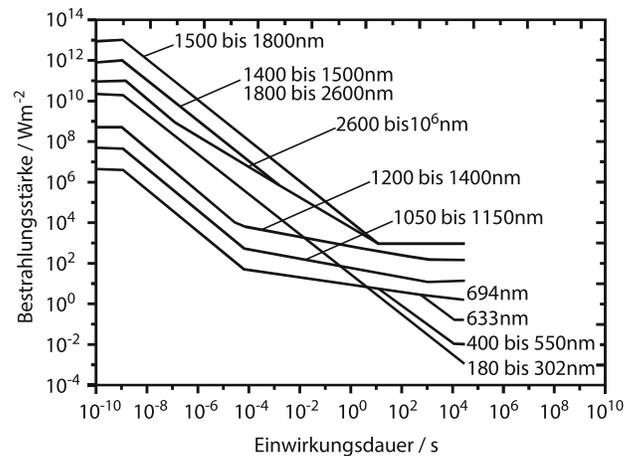
Zahlenwerte und Angaben für wiederholt gepulste Laser können mit Hilfe der Norm DIN EN 60825-1 oder der GV 18.1 berechnet werden. Dort findet man auch die Werte für die Haut.

Bei der Ermittlung der Leistungs- und Energiedichte sind Mittelwerte über Kreisflächen mit folgenden Durchmessern zu bilden: 1 mm (180–400 nm), 7 mm (400–1400 nm), 1 mm (1400– 10^5 nm, $t \leq 3$ s), 3,5 mm (1400– 10^5 nm, $t > 3$ s), 11 mm (10^5 – 10^6 nm).

Tab. 24.1 Expositionsgrenzwerte auf der Hornhaut des Auges (vereinfacht nach BGI 5092, D = Dauerstrichlaser, M = Modengekoppelter Laser, I = Impulslaser, R = Riesenimpulslaser)

Wellenlängen in nm	Bestrahlungsstärke E				Bestrahlung H			
	Betriebsart D		Betriebsart M		Betriebsart M		Betriebsarten I, R	
	Dauer/s	W/m ²	Dauer/s	W/m ²	Dauer/s	J/m ²	Dauer/s	J/m ²
180–315	bis 30 000	0,001	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$	–	–	10^{-9} bis $3 \cdot 10^{-4}$	30
315–1400	$> 5 \cdot 10^{-4}$ bis 10	10	–	–	$< 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	10^{-9} bis $5 \cdot 10^{-4}$	0,005
1400– 10^6	$> 0,1$ bis 10	1000	$< 10^{-9}$	10^{11}	–	–	10^{-9} bis 0,1	100

Abb. 24.2 Expositionsgrenzwert (maximal zulässige Bestrahlung (MZB)) der Hornhaut des Auges für einige ausgewählte Wellenlängen nach DIN EN 60 825-1 (vereinfacht)



Der Raum, in dem die Expositionsgrenzwerte überschritten werden, heißt *Laserbereich*. Er muss durch Laserwarnschilder sowie möglichst durch Warnleuchten über den Eingangstüren gekennzeichnet werden. Bei Lasern der Klassen 3B und 4 (Abschn. 24.3) muss zusätzlich eine Abgrenzung erfolgen. Darunter versteht man, dass Unbefugte nicht unbeabsichtigt in diesen Bereich gelangen können. Es müssen Laserschutzbrillen vorhanden sein, die von den Anwesenden im Laserbereich immer getragen werden müssen.

24.2 Laser-Schutzbrillen

Schutzbrillen für Laser müssen den Normen DIN EN 207 entsprechen. Sie werden in Schutzstufen LB1 bis LB10 eingeteilt, wobei die Ziffer die optische Dichte angibt. Der Zusammenhang zwischen der Schutzstufe und dem Transmissionsgrad ist in Spalte 2 der Tab. 24.2 gezeigt. Die Berechnung der Schutzstufe für Einzelpulse oder kontinuierlichen Betrieb ist mit Hilfe von Tab. 24.2 möglich. Bei der Berechnung der Leistungs- und Energiedichten (E und H) müssen hier die realen Strahldurchmesser berücksichtigt werden, wobei die $1/e$ -Werte benutzt werden.

Auf den Schutzbrillen müssen die Schutzstufe, der Wellenlängenbereich (in nm) und die Betriebsart (D, I, R, M) angegeben werden. Verwechslungen sind gefährlich, da die Brille natürlich nur für die angegebene Wellenlänge schützt. Die Symbolik ist in Tab. 24.3 erklärt. Die Betriebsart hängt mit der Pulsdauer zusammen (Tab. 24.2).

Die Schutzbrille muss den Laserstrahl 5 s und 50 Pulse standhalten. Bei gepulsten Lasern müssen Korrekturen angebracht werden (BGI 5092).

Für Justierarbeiten am Laser ist es nützlich, wenn der Strahl sichtbar ist. Aus diesem Grund gibt es für sichtbare Strahlung Laser-Justierbrillen, die allerdings keinen vollständigen Schutz bieten (DIN EN 208). Die Leistungsgrenzen und die entsprechende Klassifizierung zeigt Tab. 24.4. Eine Justierbrille schwächt den Strahl entsprechend Klasse 2 ab.

Tab. 24.2 Ermittlung der Schutzstufe aus der Leistungs- oder Energiedichte für verschiedene Wellenlängen und Bestrahlungsdauern (D = Dauerstrich, I = Impulsbetrieb, R = Riesenimpuls, M = Modenkopplung) (aus BGI 5092)

Schutzstufe	Transmissionsgrad	Maximale Energie- bzw. Leistungsdichte im Wellenlängenbereich								
		180–315 nm			315–1400 nm			über 1400 nm		
		Für die Laserbetriebsart/Betriebsdauer in s								
		D	I, R	M	D	I, R	M	D	I, R	M
		$\geq 3 \cdot 10^{-4}$	10^{-9} bis $3 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-9}$	$< 5 \cdot 10^{-4}$	10^{-9} bis $5 \cdot 10^{-4}$	$< 10^{-9}$	$> 0,1$	10^{-9} bis $0,1$	$< 10^{-9}$
<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>E</i>		
W/m ²	J/m ²	W/m ²	W/m ²	J/m ²	J/m ²	W/m ²	J/m ²	W/m ²		
LB 1	10 ⁻¹	0,01	3 · 10 ²	3 · 10 ¹¹	10 ²	0,05	1,5 · 10 ⁻³	10 ⁴	10 ³	10 ¹²
LB 2	10 ⁻²	0,1	3 · 10 ³	3 · 10 ¹²	10 ³	0,5	1,5 · 10 ⁻²	10 ⁵	10 ⁴	10 ¹³
LB 3	10 ⁻³	1	3 · 10 ⁴	3 · 10 ¹³	10 ⁴	5	0,15	10 ⁶	10 ⁵	10 ¹⁴
LB 4	10 ⁻⁴	10	3 · 10 ⁵	3 · 10 ¹⁴	10 ⁵	50	1,5	10 ⁷	10 ⁶	10 ¹⁵
LB 5	10 ⁻⁵	10 ²	3 · 10 ⁶	3 · 10 ¹⁵	10 ⁶	5 · 10 ²	15	10 ⁸	10 ⁷	10 ¹⁶
LB 6	10 ⁻⁶	10 ³	3 · 10 ⁷	3 · 10 ¹⁶	10 ⁷	5 · 10 ³	1,5 · 10 ²	10 ⁹	10 ⁸	10 ¹⁷
LB 7	10 ⁻⁷	10 ⁴	3 · 10 ⁸	3 · 10 ¹⁷	10 ⁸	5 · 10 ⁴	1,5 · 10 ³	10 ¹⁰	10 ⁹	10 ¹⁸
LB 8	10 ⁻⁸	10 ⁵	3 · 10 ⁹	3 · 10 ¹⁸	10 ⁹	5 · 10 ⁵	1,5 · 10 ⁴	10 ¹¹	10 ¹⁰	10 ¹⁹
LB 9	10 ⁻⁹	10 ⁶	3 · 10 ¹⁰	3 · 10 ¹⁹	10 ¹⁰	5 · 10 ⁶	1,5 · 10 ⁵	10 ¹²	10 ¹¹	10 ²⁰
LB 10	10 ⁻¹⁰	10 ⁷	3 · 10 ¹¹	3 · 10 ²⁰	10 ¹¹	5 · 10 ⁷	1,5 · 10 ⁶	10 ¹³	10 ¹²	10 ²¹

Tab. 24.3 Beispiele zur Klassifikation von Laserschutzbrillen. Schutzbrillen, die mit „L“ statt „LB“ klassifiziert wurden, sind auch zulässig

	DI	1060	L 7
	D	630–700	L 8
Laserbetriebsart *	↑				
Wellenlänge (nm)	↑				
Schutzstufe	↑				
Evtl. Zeichen des Herstellers	↑				
Evtl. Prüfzeichen	↑				

*) D = Dauerstrichlaser, I = Impuls laser, R = Riesenimpuls laser, M = Modengekoppelter Impuls laser

Tab. 24.4 Klassifizierung von Laser-Justierbrillen (aus BGI 5092)

Schutzstufe	Maximale Laserleistung für Dauerstrichlaser		Maximale Energie des Einzelimpulses für Impuls laser		Bereich des spektralen Transmissionsgrades
	Zeitbasis 0,25 s	Beobachtung bis 2 s	Zeitbasis 0,25 s	Beobachtung bis 2 s	
RB 1	10 mW	0,6 bis 6 mW	2 · 10 ⁻⁶ J	1,2 · 10 ⁻⁶ J	10 ⁻¹ bis 10 ⁻²
RB 2	100 mW	60 mW	2 · 10 ⁻⁵ J	1,2 · 10 ⁻⁵ J	10 ⁻² bis 10 ⁻³
RB 3	1 W	600 mW	2 · 10 ⁻⁴ J	1,2 · 10 ⁻⁴ J	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁴
RB 4	10 W	6 W	2 · 10 ⁻³ J	1,2 · 10 ⁻³ J	10 ⁻⁴ bis 10 ⁻⁵
RB 5	100 W	60 W	2 · 10 ⁻² J	1,2 · 10 ⁻² J	10 ⁻⁵ bis 10 ⁻⁶

24.3 Laserklassen und Gefährdungspotenzial

Laser werden je nach Gefährdungspotenzial in die Laserklassen 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4 eingeteilt:

- Klasse 1: Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich. (Je nach Wellenlänge ist für cw-Laser im Sichtbaren eine Leistung von $39\ \mu\text{W}$ zulässig.
- Klasse 1M: Die Laserstrahlung ist ungefährlich, sofern keine optischen Instrumente benutzt werden, die den Strahlquerschnitt einengen. Es handelt sich dabei häufig um Laser oder LEDs mit divergenten Strahlen. Es sind auch Systeme mit kollimierten Strahlen mit großem Querschnitt eingeschlossen.
- Klasse 1C: Der Laser strahlt nur, wenn ein direkter Kontakt zu Haut oder Gewebe besteht. Es gibt keine Beschränkung der Leistung oder Energie.
- Klasse 2: Diese Klasse ist nur im Sichtbaren definiert (400–700 nm). Laser dieser Klasse sind bei einer Bestrahlung bis 0,25 s (bewusste Abwehrreaktion) ungefährlich. Die Leistungsgrenze liegt für kontinuierlich strahlende Laser bei 1 mW.
- Klasse 2M: Diese Klasse ist nur im Sichtbaren definiert. Laser dieser Klasse sind bei einer Betrachtung bis 0,25 s ungefährlich, sofern keine optischen Instrumente benutzt werden, die den Strahlquerschnitt einengen.
- Klasse 3R: Im sichtbaren Spektralbereich sind die Ausgangswerte 5 mal höher als bei einem Laser der Klasse 2 (5 mW für Dauerstrichlaser). Im nicht sichtbaren Bereich sind die Ausgangswerte bei einer Bestrahlungszeit bis 100 s bis zu 5 mal höher als die bei einem Laser der Klasse 1.
- Klasse 3B: Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen für die Haut. Für Dauerstrichlaser mit Wellenlängen über 315 nm beträgt die obere Leistungsgrenze 0,5 W.
- Klasse 4: Die Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich werden. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahren hervorrufen. Dauerstrichlaser mit Leistungen über 0,5 W (Wellenlängen über 315 nm) gehören zur Klasse 4.

Das Symbol M bei den Klassen 1M und 2M ist eine Abkürzung für Magnifying Instruments, die bei der Beobachtung nicht verwendet werden dürfen. Bei der Klasse 3R steht das R für relaxed – es gelten leicht entspannte Vorschriften. Abschließend sei ergänzend bemerkt, dass die Einteilung eines Lasers in eine Klasse neben der Wellenlänge auch von der Zeit abhängt, in der ein Laser strahlt. Genaue Werte für die Laserklassen findet man in der Norm DIN EN 60825-1.

24.4 Sicherheitsvorschriften

Die OStrV enthält eine Reihe von Regeln, von denen im folgenden einige zusammengefasst werden:

- Für den Betrieb von Lasereinrichtungen der Klassen 3R bis 4 ist ein Laserschutzbeauftragter schriftlich zu bestellen.
- Laserbereiche müssen gekennzeichnet werden. Bei Lasern der Klasse 4 sollen an den Zugängen zum Laserbereich Warnleuchten angebracht werden. Die Laserbereiche müssen abgegrenzt werden.
- Im Laserbereich müssen Schutzbrillen getragen werden.
- Personen, die sich im Laserbereich aufhalten, müssen jährlich über das zu beachtende Verhalten unterrichtet werden.
- Es müssen Schutzmaßnahmen getroffen werden, falls Brand- oder Explosionsgefahr durch Laserstrahlung besteht.
- Für jeden Laserarbeitsplatz ist eine *Gefährdungsbeurteilung* vor der Inbetriebnahme zu erstellen. Diese zeigt die Gefährdungen und die entsprechenden Schutzmaßnahmen auf.

Weiterführende Literatur

Bücher

1. Sutter E., Schreiber P., Ott G. (1989) Handbuch Laser-Strahlenschutz. Springer, Berlin, Heidelberg
2. Sutter, E. (2008) Schutz vor optischer Strahlung, VDE-Schriftenreihe, VDE-Verlag, Berlin
3. Henderson, R., Schulmeister, K. (2004) Laser Savety. Institute of Physics Publ., Bristol

Normen

4. Optische Strahlungssicherheit und Laser. Teil 1 und 2. (2010) DIN-VDE-Taschenbuch, VDE-Verlag
5. Filter- und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung. DIN EN 207
6. Augenschutzgeräte für Justierarbeiten an Lasern und Lasergeräten. DIN EN 208
7. Sicherheit von Lasereinrichtungen. Normenreihe. DIN EN 60825

Gesetze, Richtlinien, Informationen

8. Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV) (2010) GV 18, BG ETEM

-
9. Anhang 1 und 2, Richtlinie 2006/25/EG (Expositionsgrenzwerte künstliche optische Strahlung) (2006) GV 18.1, BG ETEM
 10. Umgang mit Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen (LWKS) (2007) BGI 5031, BG ETEM
 11. Lasereinrichtungen für Show- oder Projektionszwecke, BGI 5007 (2004), BG ETEM
 12. Auswahl und Benutzung von Laser-Schutz und Justierbrillen (2007) BGI 5092, BG ETEM
 13. Künstliche optische Strahlung. Eine Handlungshilfe für die Gefährdungsbeurteilung (2013), Broschüre M16, www.hamburg.de/arbeitsschutzpublikationen
 14. TROS (Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung) – Laserstrahlung (2015). www.baua.de