

Bitte wenden Sie sich in allen Fragen des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit bei der Arbeit an den Unfallverhütungsdienst der für Sie zuständigen Landesstelle:

Wien, Niederösterreich und Burgenland:

UVD der Landesstelle Wien
Webergasse 4, 1203 Wien
Telefon +43 1 33 1 33-252

UVD der Außenstelle St. Pölten
Kremser Landstraße 8, 3100 St. Pölten
Telefon +43 2742 25 89 50-0

UVD der Außenstelle Oberwart
Hauptplatz 11, 7400 Oberwart
Telefon +43 3352 353 56-300

Steiermark und Kärnten:

UVD der Landesstelle Graz
Göstinger Straße 26, 8021 Graz
Telefon +43 316 505-2604

UVD der Außenstelle Klagenfurt
Waidmannsdorfer Straße 35,
9021 Klagenfurt am Wörthersee
Telefon +43 463 58 90-5000

Oberösterreich:

UVD der Landesstelle Linz
Garnisonstraße 5, 4017 Linz
Telefon +43 732 23 33-8405

Salzburg, Tirol und Vorarlberg:

UVD der Landesstelle Salzburg
Dr.-Franz-Rehrl-Platz 5, 5010 Salzburg
Telefon +43 662 21 20-4442

UVD der Außenstelle Innsbruck
Ing.-Etzel-Straße 17, 6020 Innsbruck
Telefon +43 512 520 56-0

UVD der Außenstelle Dornbirn
Eisengasse 12, 6850 Dornbirn
Telefon +43 5572 269 42-21

www.auva.at



Grundlagen der Lasersicherheit

www.auva.at



Inhalt

1 Vorbemerkung	2
2 Einleitung	3
3 Was ist Licht?	4
3.1 Das elektromagnetische Spektrum	4
3.2 Eigenschaften der Laserstrahlung	5
4 Aufbau und Funktion von Laser	7
4.1 Lasertypen	8
4.2 Betriebsarten	10
5 Strahlparameter und -ausbreitung	11
5.1 Energie und Leistung	11
5.2 Reflexion und Transmission	14
5.3 Strahlparameter	16
6 Wechselwirkung Laser - Gewebe	19
6.1 Das menschliche Auge	19
6.2 Biologische Wirkung	20
6.3 Einfluss der Zeit	24
7 Maximal zulässige Bestrahlung (MZB)	26
7.1 Einflussgrößen	26
7.2 Lasergefahrenbereich - Sicherheitsabstand	30
8 Laserklassen	33
9 Sekundärgefahren	39
10 Schutzmaßnahmen seitens des Herstellers	42
10.1 Technische Schutzmaßnahmen (Konstruktionsanforderung)	42
10.2 Warn- und Hinweisschild	44
10.3 Informationen für den Anwender	46
11 Schutzmaßnahmen seitens des Anwenders	47
11.1 Technische und bauliche Schutzmaßnahmen	47
11.2 Organisatorische Schutzmaßnahmen	52
11.3 Laserschutzbeauftragter	52
11.4 Laserschutzbrillen	55
12 Richtlinien, Gesetze und Normen	60
Anhang A	65
Anhang B	67

1 Vorbemerkung

Dieses Merkblatt gilt für alle Laseranwendungen und soll auf die Eigenschaften, Wirkungen und Gefahren von Laser-Strahlung aufmerksam machen. Überdies beschreibt das vorliegende Merkblatt praxiserprobte allgemeine Schutzmaßnahmen, da keine laserspezifischen Gesetzesregelungen oder Verordnungen bezüglich Arbeitnehmerschutz existieren. Anwendungsspezifische Gefahren sowie die daraus folgenden geeigneten Schutzmaßnahmen werden in eigenen AUVA-Merkblättern (z.B. M140 - Medizinische Anwendungen des Lasers) beschrieben.

Laserstrahlung, die ins Auge gelangt, kann Netzhautschäden, Hornhautschäden oder Linsentrübung verursachen. Schäden an der Netzhaut sind irreparabel. Im schlimmsten Fall kann ein Laserunfall zur Erblindung führen. Die Haut ist weniger empfindlich als das Auge. Hautschädigungen treten daher erst bei höheren Leistungen auf. Zu den Hautschäden zählt vor allem die Verbrennung der Haut.

Bei Lasern mit entsprechender Leistung ist es daher notwendig, geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Das sichere Anwenden von Lasern setzt somit eine fundierte Ausbildung voraus, falls die Laserstrahlung im Zuge der Arbeit zugänglich und damit gefährlich werden könnte.

2 Einleitung

Das Wort „LASER“ ist eine Abkürzung für den englischen Wortlaut: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - zu Deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Unter dem Begriff „Licht“ wird infrarotes (IR), sichtbares (VIS) und ultraviolettes Licht (UV) verstanden. In Abhängigkeit vom Typ arbeiten Laser in allen drei Spektralbereichen. Laser unterscheiden sich jedoch nicht nur durch die Wellenlänge, sondern auch durch die abgegebene Lichtleistung und die Art, wie sie diese Leistung abgeben. Wellenlänge, Lichtleistung und Betriebsart sind die drei Faktoren, die den Einsatzbereich des Lasers festlegen.

Die stetige Weiterentwicklung der Technologie und der Materialien brachte und bringt Lasergeräte als fein skalierbare Energiequellen hervor, womit die Anwendung von Lasern immer mehr Verbreitung findet:

Fertigungstechnik	Schneiden, Beschriften, Schweißen, ...
Medizin	Laserchirurgie, Laserakupunktur, ...
Unterhaltung	CD-Spieler, Laser-Shows, Laserdisplays, ...
Messtechnik	Längenmessung, Spektroskopie, ...
Handel u. Industrie	Laserdrucker, Laserscanner, ...
Verkehr	Flugwarnsystem, Abstandsmessung, ...
Kommunikation	Telefonsystem, Freiraumübertragung, ...

Was bedeutet LASER?

3 Was ist Licht?

3.1 Das elektromagnetische Spektrum

Licht ist physikalisch gesehen eine elektromagnetische Welle, die durch die Wellenlänge charakterisiert wird. Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen zwei Maxima einer Welle. Sie wird mit dem griechischen Buchstaben „Lambda“ (λ) abgekürzt und in der Einheit Nanometer (nm) angegeben.

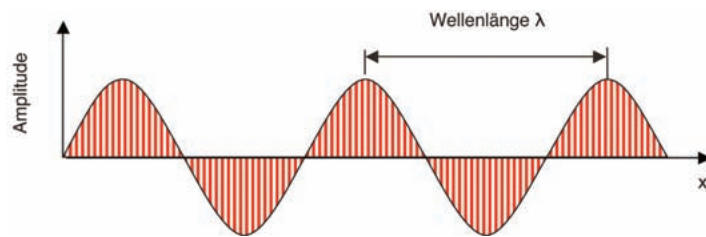


Abb. 1 Eine elektromagnetische Welle setzt sich aus einer elektrischen und einer magnetischen Welle zusammen. Als Bezugsgröße wird die elektrische Welle verwendet, weshalb im Diagramm nur die sinusförmige elektrische Welle eingezeichnet ist.

Werden alle Wellenlängen auf einer Achse dargestellt, dann erhält man das sogenannte elektromagnetische Spektrum (s. Abb. 2). Die Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche hat verschiedene Eigenschaften, die einerseits deren Verwertbarkeit, und andererseits deren Wirkung auf den menschlichen Körper bestimmen. Radiowellen z.B. durchdringen den menschlichen Körper ohne Schädigung, Mikrowellen hingegen dringen in den Körper ein und erhitzen ihn. Als sichtbares „Licht“ empfindet der Mensch nur einen sehr kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums: den Bereich von ungefähr 400 nm bis 700 nm – siehe Anhang A.

A. Verschiedene Wellenlängen des sichtbaren Lichts werden als verschiedene Farben wahrgenommen.

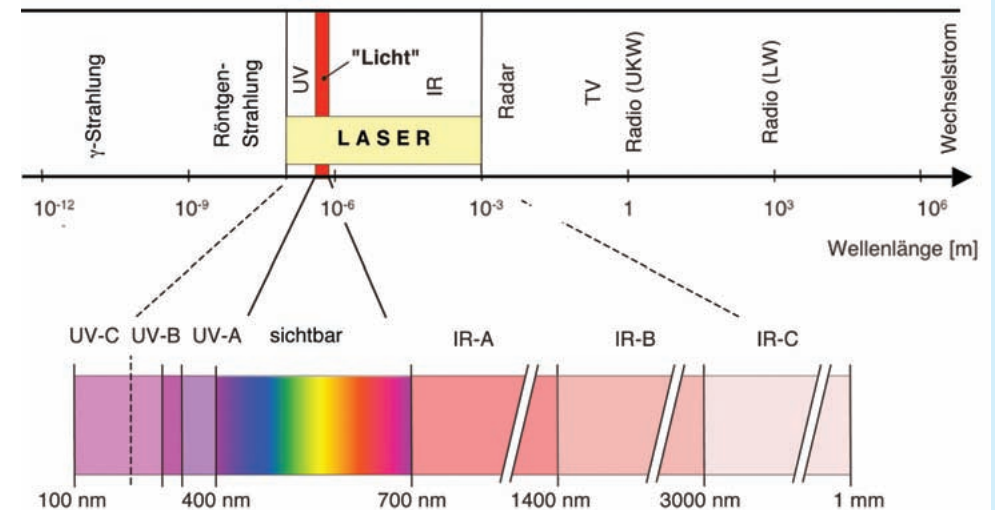


Abb. 2 Wellenlängen des sichtbaren Lichts

3.2 Eigenschaften der Laserstrahlung

Wellenlänge

Ein Charakteristikum der Laserstrahlung ist, dass die Strahlung nur eine einzige Wellenlänge aufweist. Laserlicht wird daher als einfarbig oder monochrom bezeichnet. Lasermedium und Justage bestimmen, auf welcher der möglichen Wellenlängen der Laser tatsächlich anschwingt. Im Gegensatz dazu sendet jede andere Lichtquelle „breitbandige“ Strahlung, dh. ein Gemisch aus sehr vielen Wellenlängen, aus.

Abstrahlcharakteristik

Jede Lichtquelle außer dem Laser strahlt in alle Raumrichtungen ab. Laserlicht wird hingegen nur in eine einzige Rich-

Laserlicht ist

- **einfärbig**
- **parallel**
- **kohärent**

tung abgegeben, man spricht vom „parallelen“ oder „kollimierten“ Licht. Auch einige Meter nach der Austrittsöffnung hat ein gut kollimierter Laserstrahl kaum von seiner Intensität verloren. Diese Eigenschaft führt dazu, dass Laserlicht besser als jede andere Lichtart fokussierbar ist.

Mit Hilfe von Optiken kann der Laserstrahl geformt werden, z.B. kann mit Hilfe einer Zylinderlinse ein kreisrunder Strahl zu einer Linie aufgeweitet werden.

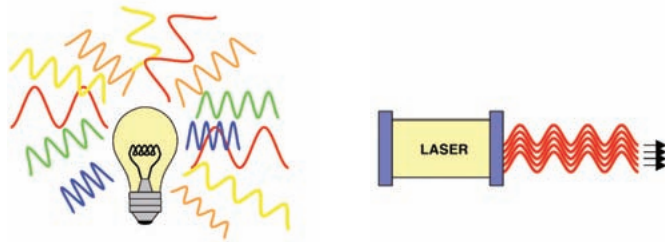


Abb. 3 Unterschied zwischen Licht einer Glühlampe und Laserlicht

Kohärenz

Räumliche bzw. zeitliche Kohärenz des Laserstrahls bedeutet, dass die einzelnen Wellenzüge an verschiedenen Raumpunkten des Strahlungsfeldes bzw. zu verschiedenen Zeiten zueinander in einer festen Beziehung stehen – sie sind daher interferenzfähig. Hingegen liegen die einzelnen Wellenzüge von Breitbandstrahlern (z.B. von natürlichem Licht) statistisch gesehen völlig regellos zueinander.

Polarisation

Polarisation liegt vor, wenn ein Großteil der Lichtwellen in einer Vorzugsebene schwingt. Es hängt vom Lasertyp und von der Bauart des Lasers ab, ob sein Strahl polarisiert ist.

² Es gibt Ausnahmen: z.B. Weißlichtlaser oder Argon-Ionen Laser emittieren Strahlung mit mehreren Wellenlängen gleichzeitig.

4 Aufbau und Funktion von Laser

Der Prozess der stimulierten Emission bildet die elementare Lichtverstärkung. Um diesen Vorgang gezielt auszunutzen, muss ein Lasermedium durch Energiezufuhr in einen angeregten Zustand gebracht und für die Strahlungsdauer gehalten werden. Um einen Lichtverstärker zu bauen, reicht es jedoch nicht aus, dem Medium Energie zuzuführen. Wie bei elektrischen Verstärkern wird das Prinzip der Rückkopplung angewandt. Darunter versteht man, dass ein Teil der Ausgangsleistung in das System zurückgeführt wird - der Verstärker wird damit zum Oszillator, womit das System nach dem Einschalten selbsttätig anschwingt.

Abb. 4 zeigt die Basiselemente, aus denen ein Laser aufgebaut ist. Das 'Herz' eines Lasergeräts ist der Laserresonator, der aus dem Lasermedium und Spiegeln besteht. Das Lasermedium bestimmt die Wellenlänge ('Farbe') des Lichtes, das ein Laser abstrahlt und gibt dem Laser auch seinen Namen. Die Energiezufuhr erfolgt auf elektrischem, optischem oder chemischem Weg.

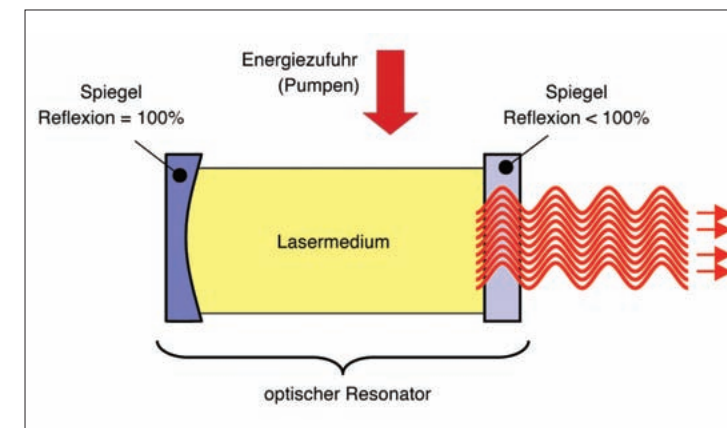


Abb. 4 Schematischer Laseraufbau

Die Rückkopplung des Lichts wird durch zwei parallel angeordnete Spiegel erzielt, die das Lasermedium einschließen. Der Endspiegel reflektiert 100% der axial verlaufenden Lichtwelle in das Lasermedium zurück. Der Auskoppelspiegel lässt jedoch je nach Konstruktion 5 - 40% der auftretenden Lichtleistung durch. Diese 5 - 40% Lichtleistung bilden in Folge den Laserstrahl, mit dem gearbeitet wird.

4.1 Lasertypen

Das Lasermedium kann gasförmig oder flüssig sein sowie in Form eines Kristalls vorliegen. Daraus leiten sich folgende Lasertypen ab: Gaslaser, Farbstofflaser sowie Festkörperlaser und Halbleiterlaser. Eine Übersicht der gängigsten Laser gibt folgende Tabelle.

Chemische Laser, Ferninfrarot-Laser (FIR) sowie der Freie-Elektronenstrahl-Laser (FEL) werden aufgrund der geringen Verbreitung hier nicht behandelt.)

Gaslaser (z.B. CO₂-Laser): Aufgrund der guten Kühlbarkeit lassen sich mit Gasen die leistungsstärksten Laser realisieren. Die Energiezufuhr erfolgt meist elektrisch.

Festkörperlaser (z.B. Nd:YAG-Laser): hier besteht das Lasermedium aus einem Kristall, die Energiezufuhr erfolgt durch Licht (Blitzlampen, HL-Laser).

Halbleiter-Laser (z.B. GaAs-Laser): Halbleiter sind zwar auch Festkörper, werden aber aufgrund ihrer anderen Anregungsart (elektrisch) als eigene Lasertypen geführt. Ihre Wellenlängen liegen im sichtbaren und nahen IR-Bereich.

Farbstofflaser: das laseraktive Medium sind Farbstoffe, die in Flüssigkeiten gelöst sind. Bisher wurde Lasertätigkeit in mehr als 100 Farbstoffen in wässrigen und organischen Lösungen nachgewiesen.

	Laser	Typische Wellenlängen [nm]	Betriebsart	Anwendungsbeispiele
Gaslaser	HeNe-Laser	633, 611, 594, 543, ...	cw	Positionierhilfe, div. Messaufgaben
	CO ₂ -Laser	10600	cw, gepulst	Materialbearbeitung, Laserchirurgie
	Excimer-Laser	193 (ArF), 249 (KrF), 308 (XeCl), 351 (XeF)	gepulst	Materialbearbeitung, Gewebeablation (LASIK), ...
	Argon-Ionen-Laser	488/514	cw	Pumpquelle, Holographie, Laserchirurgie, ...
	Metaldampf-Laser	510/578 (Kupfer), 628 (Gold)	gepulst	Pumpquelle, Materialbearbeitung, photodynamische Therapie, ...
	„Weißlicht“-Laser	z.B. Ar/Kr-Mischgas-Laser	cw	Lasershow, Kalibrierzwecke
Festkörperlaser	Rubin-Laser	694	cw, gepulst	Materialbearbeitung, med. Anwendungen, ...
	Alexandrit-Laser	710-820 (Blitzlampen gepumpt)	cw, gepulst	Haar- u. Tattooentfernung, Zahnmedizin, Spektroskopie, ...
	Nd:YAG-Laser	1064	cw, gepulst	Pumpquelle, Materialbearbeitung, Laserchirurgie
	Er:YAG-Laser	2940	gepulst	Medizinische Anwendungen
	Ti:Saphir-Laser	695-950 (Blitzlampen gepumpt) 700-1000 (Ar+ cw-gepumpt)	cw, gepulst	Photochemie, LIDAR, Isotopentrennung, Spektroskopie
HL-Laser	InGaAlP GaAlAs InGaAsP	635 bis 680 670 bis 890 900 bis 1800	cw, gepulst	Laserpointer, Positionierhilfe, Materialbearbeitung (Schweißen), Nachrichtentechnik, CD-Spieler, div. Messaufgaben, ...
Farbstofflaser *)	Coumarin 120 Coumarin 102 Rhodamin 6G Rhodamin 6G	441 (Excimerlaser gepumpt) 495 (Ionenlaser gepumpt) 581 (Excimerlaser gepumpt) 593 (Ionenlaser gepumpt)	cw, gepulst	Spektroskopie, photodynamische Therapie, ...

*) Es ist die Wellenlänge mit der maximalen Fluoreszenz angegeben.

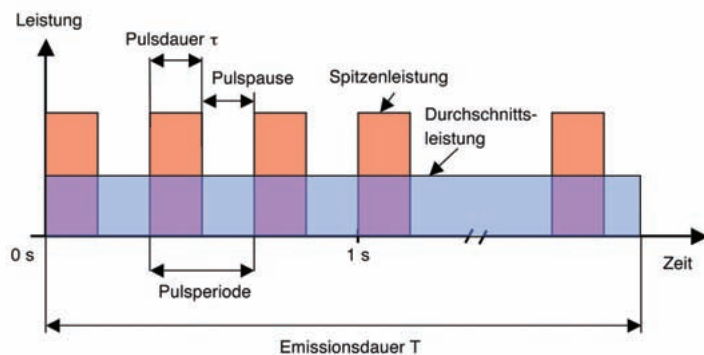
Dauerstrich- und Pulsbetrieb

4.2 Betriebsarten

Laserstrahlung kann kontinuierlich oder in gepulster Form abgegeben werden. Bei permanent ausgesandeter Strahlung spricht man von Dauerstrichlasern (die Abkürzung für Dauerstrichbetrieb ist cw = continuous wave).

Pulse können regelmäßig, unregelmäßig oder in Pulspaketen, abgegeben und auf verschiedenen Wegen erzeugt werden: z.B. durch elektronische Ansteuerung oder durch Lichtblitze. Damit lassen sich Pulsdauern im Mikro- bis Millisekundenbereich erzielen. Durch optische Schalter innerhalb des Resonators erhält man einen sogenannten gütegeschalteten Laser (Q-switch-Modus), der hochenergetische Pulse von extrem kurzer Dauer - im Bereich von wenigen Nanosekunden aussendet. Noch kürzere Pulse im Femto- und Pikosekundenbereich sind mit der Methode des Mode-locking zu erzielen.

Wie oft pro Zeiteinheit ein Puls abgegeben wird, wird durch die Pulsfrequenz f beschrieben und in Hertz (Hz) gemessen. 1 Hertz entspricht 1 Puls pro Sekunde. Pulsfrequenzen bis einige 100 MHz sind zur Zeit möglich.



Unter Emissionsdauer T versteht man jene Zeitspanne, in der der Laserstrahl freigegeben ist. Dies gilt sowohl für kontinuierlich als auch gepulst betriebene Laser. Die Pulsdauer

(Pulslänge) gibt an, wie lange ein einzelner Puls andauert. Sie wird nach der Methode FWHM (Full Width Half Maximum) angegeben.

Abb. 5
Pulsparameter

5 Strahlparameter und -ausbreitung

5.1 Energie und Leistung

Aus dem bekannten Begriff „Sonnenenergie“ lässt sich ableiten, dass Licht eine Form von Energie darstellt. Laser geben Licht und damit Energie ab. Speziell für gepulste Laser wird neben der Leistung auch die Pulsenergie angeführt. Sie wird in Größenordnungen der Einheit Joule (J) angegeben: wird Energie verbraucht, so spielt die Zeit, in der die Energie umgesetzt wird, keine Rolle. Erst wenn die Energieumsetzung auf die dafür benötigte Zeit bezogen wird, gelangt man zum Begriff der Leistung.

Ein Dauerstrichlaser gibt die optische Energie kontinuierlich ab, wobei die pro Zeiteinheit ausgesandte Energie als Leistung P des Lasers bezeichnet wird. Die Leistung wird in Größenordnungen der Einheit Watt (W) angegeben. Die Umrechnung zwischen Leistung (Watt) und Energie (Joule) lautet:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Energie}}{\text{Zeit}}$$

$$1 \text{ Watt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Sekunde}}$$

Bei cw-Lasern gibt man sinnvoller Weise die maximale Strahlleistung als wichtigste Kenngröße neben der Wellenlänge an. Man spricht z. B. von einem 100 W Nd:YAG Laser, d.h. die Leistung des austretenden Laserstrahls beträgt maximal 100 Watt. Dies darf nicht mit der elektrischen Anschlussleistung des Gerätes verwechselt werden - sie ist um ein Vielfaches höher. Bei gepulsten Lasern gibt man üblicherweise die Energie an, die in einem Puls enthalten ist.

Die Bedeutung von Leistung kann jedoch unterschiedlich sein. Während die **Spitzenleistung** eines gepulsten Lasers oft sehr hoch ist, kann die erreichbare **Durchschnittsleistung** relativ klein sein – s. Abb. 5 und Abb. 6. Die Spitzen-

Energie und Leistung

leistung ist die maximal erzielbare Leistung während eines Pulses. Da Leistung gleich Energie pro Zeit ist, hängt die Spitzenleistung von der Pulsenergie und der Pulsdauer ab:

$$\text{Spitzenleistung} = \text{Pulsenergie} / \text{Pulsdauer}$$

Wenn dieselbe Energie in immer kürzeren Pulsen abgegeben wird, so erhöht sich damit die Spitzenleistung. Abb. 6 zeigt dazu ein Beispiel zweier Pulse. Die Energie beider Pulse ist gleich groß, die Spitzenleistung ist aber aufgrund der unterschiedlichen Pulsdauern verschieden hoch. Es ist einsichtig, dass die Wirkung dieser Pulse auf Gewebe oder Material unterschiedlich ist.

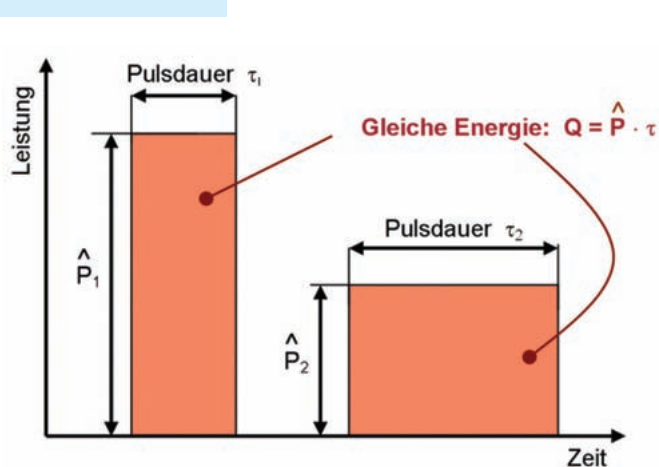


Abb. 6: Pulse mit unterschiedlicher Spitzenleistung, aber gleicher Energie.

Die Durchschnittsleistung ist die über einem längeren Zeitraum im Mittel abgegebene Leistung (siehe Abb. 5, der blaue Balken). Für einen gepulsten Laser sagt sie daher nichts über die Spitzenleistung aus!

Die Durchschnittsleistung kann um Größenordnungen kleiner sein als die Spitzenleistung.

Bei der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie ist die erzielbare Wirkung auch davon abhängig, wie groß die bestrahlte Fläche bei gegebener Energie bzw. Leistung ist.

Es ist einsichtig, dass eine bestimmte Lichtleistung auf einen Quadratmeter verteilt oder durch eine Sammellinse auf einen Brennfleck gebündelt unterschiedliche Wirkung hat.

Je nach dem, ob der Laser gepulst oder kontinuierlich betrieben wird, bezieht man die Energie bzw. die Leistung auf die bestrahlte Fläche. Damit werden die Begriffe **Bestrahlung** H [J/m^2] und **Bestrahlungsstärke** E [W/m^2] definiert. Gebräuchlichere Begriffe dafür sind **Energiedichte** und Dosis bzw. **Leistungsdichte**.

Bei der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Materie ist die erzielbare Wirkung auch davon abhängig, wie groß die bestrahlte Fläche bei gegebener Energie bzw. Leistung ist.

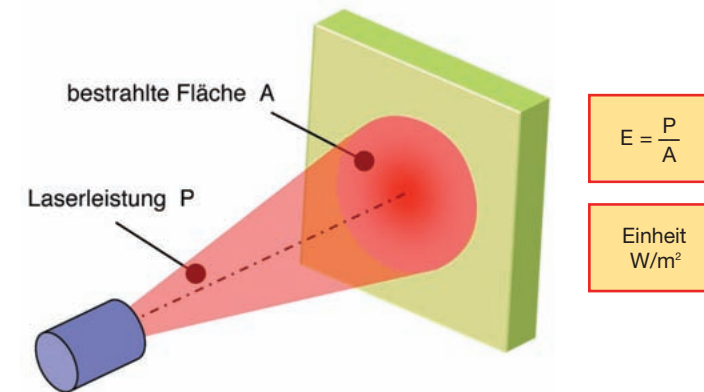


Abb. 7: Definition der Bestrahlungsstärke

³ Die Begriffe „Energiedichte“ und „Leistungsdichte“ werden im Rahmen dieses Merkblattes im Sinne von „Bestrahlung“ und „Bestrahlungsstärke“ verwendet.

5.2 Reflexion und Transmission

Um die potenzielle Gefahr durch den Laserstrahl abschätzen zu können, müssen auch etwaige Reflexionen von Gegenständen oder die Transmission, z. B. durch Fenster im Anwendungsraum, berücksichtigt werden.

Trifft ein Lichtstrahl auf die Oberfläche eines Körpers, dann wird ein Teil der Strahlung vom Körper absorbiert und der Rest zurück in den Raum reflektiert. Besteht dieser Körper aus einem für die auftreffende Wellenlänge transparenten Medium, so wird ein entsprechender Anteil der Lichtwelle durch diesen Körper durchgelassen - transmittiert. Sofern die Oberfläche für die betrachtete Wellenlänge nicht vergütet ist, wird an jeder Oberfläche ein gewisser Teil der auftreffenden Strahlung reflektiert. Als Beispiel sei hier eine Glasscheibe angeführt: 4% der einfallenden Strahlung wird an der Vorderseite reflektiert. Da die Rückseite ebenfalls 4% reflektiert, wird insgesamt ca. 8% des Lichtes reflektiert.

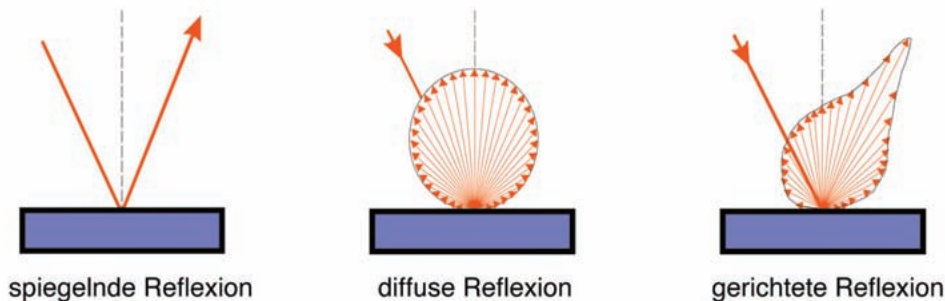


Abb. 8 Reflexionsarten

Körper haben unterschiedliche Oberflächen und Formen. Verschiedene Oberflächenstrukturen reflektieren einfallende Lichtstrahlen in unterschiedlicher Weise - Abb. 8 zeigt dazu die drei Möglichkeiten. Ist die Oberfläche absolut glatt, dann kann es zur spiegelnden Reflexion kommen. Spie-

gelnd reflektierte Laserstrahlen haben das gleiche Gefahrenpotential wie der direkte Laserstrahl. Durch diese Reflexionsart kann die Gefährdung „um die Ecke gehen“. Weist die Oberfläche hingegen eine homogene, raue Oberflächenstruktur auf, so erfolgt die Reflexion gleichmäßig in den gesamten Halbraum. Der Strahl wird diffus reflektiert, d.h. das auch die Lichtleistung in den Halbraum aufgeteilt wird und damit die Leistungsdichte mit zunehmender Entfernung dramatisch sinkt. In vielen Fällen tritt eine Kombination beider Reflexionsarten auf, die als gerichtete Reflexion bezeichnet werden kann. Zu beachten ist auch, dass für Strahlung aus dem fernen Infraroten (z.B. 10,6 μm) auch raue Oberflächen spiegelnd wirken können. Linsen oder Freiformflächen, wie sie z.B. Werkzeuge oder Einspannvorrichtungen aufweisen, können die Strahlung ebenfalls fokussieren oder zerstreuen - s. Abb. 9.

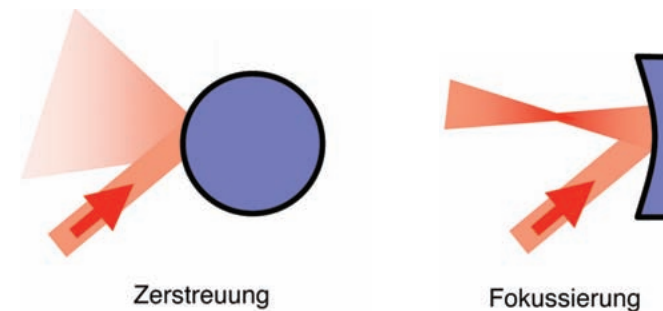


Abb. 9 Streuende und fokussierende Wirkung von konvexen und konkaven Oberflächen

Wie „scharf“
ist ein
Laserstrahl?

5.3 Strahlparameter

5.3.1 Strahlqualität

Die Strahlqualität ist abhängig von der Energieverteilung innerhalb des Laserstrahls. Je nach Resonatoraufbau bilden sich verschiedene Energieverteilungen aus, die Transversale Elektromagnetische Moden, kurz TEM_{pl} -Moden (s. ANHANG B), genannt werden, wobei die Indizes p und l zur Bezeichnung der Mode dienen. Der niederste Mode ist der Grundmode TEM_{00} (auch Gauß-Mode). Ein Strahl mit Grundmode lässt sich auf den kleinsten möglichen Brennfleck bündeln. Damit steigt gleichzeitig die erzielbare Leistungsdichte, die für jede Art von Bearbeitung prozessbestimmend ist. Sie legt fest, wie „scharf“ der Laserstrahl ist.

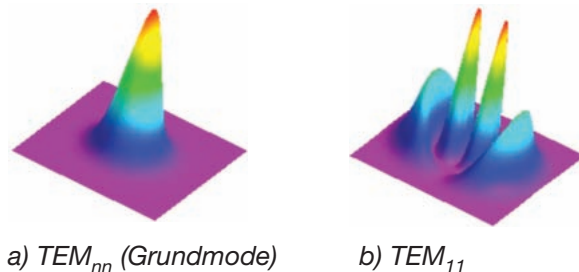


Abb. 10 Zwei Beispiele zu TEM-Moden.

Das Verhältnis zwischen einer gegebenen Energieverteilung und dem idealen Grundmode ist ein Maß für die Strahlqualität und wird mit dem sogenannten K-Faktor beschrieben. Er ist somit ein Maß dafür, wie nahe die betrachtete Strahlqualität vom idealen Grundmode abweicht. Anstatt K wird meist die Größe M^2 (Beugungsmaßzahl) zur Beschreibung der Strahlqualität verwendet. Die beiden Kennziffern können folgendermaßen ineinander umgerechnet werden:

$$K = 1/M^2.$$

Der Wert K liegt zwischen 0 und 1. Im Fall des idealen Gauß'schen Strahls hat K den Wert 1. Wird die Divergenz größer, sinkt die Strahlqualität und K wird kleiner.

5.3.2 Strahlradius

Da ein Strahl keinen „Rand“ hat, muss der Radius mathematisch definiert werden. In Abb. 11 sind zwei Durchmesser (-Radien) definiert. Für Strahlen mit einer Gauß'schen Leistungsverteilung wird für Laseranwendungen meist der $1/e^2$ Abfall von der maximalen Leistungsdichte im Zentrum als Radius benutzt und mit w_{86} bezeichnet, weil sich innerhalb dieses Radius ca. 86 % der Leistung befinden. Im Rahmen der Lasersicherheit greift man hingegen zur Definition des $1/e$ Abfalls. Der Radius wird als w_{63} bezeichnet, da sich ca. 63% der Leistung innerhalb dieses Radius befinden.

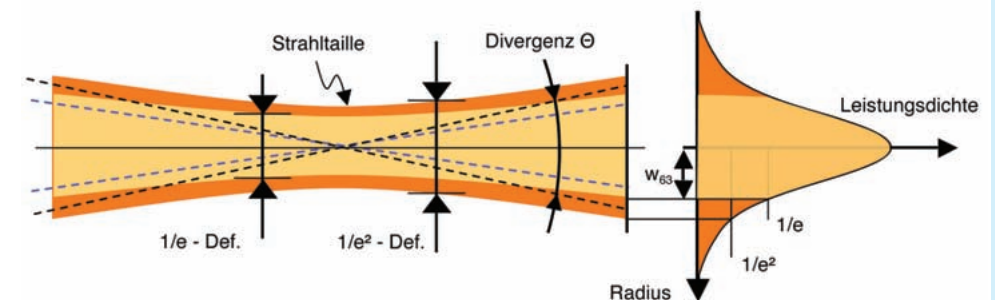


Abb. 11 Radiale Verteilung der Leistung/Energie in einem Gauß'schen Strahl

Für Leistungsverteilungen, die durch Überlagerung einer Vielzahl von Moden ein unstrukturiertes Strahlprofil aufweisen, verwendet man meist die 4σ Methode, die auf dem Zweiten Flächenmoment des Querschnittsprofils der Leistung basiert.

Was bewirkt Strahlaufweitung?

5.3.3 Strahlaufweitung

Bedingt durch Beugung und Konstruktion ist ein Laserstrahl nicht zu 100% parallel, sondern weitet sich von der Strahltaile beginnend mit zunehmender Entfernung auf, s. Abb. 11. Diese Aufweitung wird **Divergenz Θ** genannt und im ebenen Winkelmaß Radiant [rad] angegeben. „Radiant“ ist ein technisches Winkelmaß; Umrechnung von Grad in Radiant:

$$360 [^\circ] = 2\pi [\text{rad}].$$

Die Divergenz von Lasern liegt in der Größenordnung von wenigen Milliradian. Eine kleine Divergenz bedeutet, dass der Laserstrahl auch noch in sehr großer Entfernung vom Lasergerät gefährlich sein kann. Sobald der Rohstrahl jedoch durch eine Glasfaser oder Fokussierlinsen geführt wird, weitet sich der Strahl nach der Optik rasch auf, wodurch der Lasergefahrenbereich kleiner wird und das Gefahrenpotenzial sinkt.

Beispiel:

1 mrad entspricht einer Aufweitung des Strahldurchmessers um 1 mm pro Meter Entfernung!
(1 mrad $\approx 0,057^\circ$)

1 Radiant $\approx 57,3^\circ$ Grad
1° Grad $\approx 0,017$ Radiant

6 Wechselwirkung Laser - Gewebe

6.1 Das menschliche Auge

Das Auge ist das empfindlichste Organ bezüglich Laserstrahlung. Abb. 12 zeigt einen Schnitt durch das menschliche Auge. Beim Sehvorgang wird das Bild von Gegenständen durch die Hornhaut und Linse auf der Netzhaut abgebildet. Die Netzhaut wandelt die Lichtreize in Nervenimpulse um, die über Sehnerven ins Gehirn geleitet werden. Die Hornhaut bildet das optische Fenster für das Auge und wirkt wie eine Sammellinse. Nach der Hornhaut fällt das Licht auf das nächste optische Augenelement - die Iris. Sie lässt eine Öffnung frei, die schwarz erscheinende Pupille, und hat die Funktion einer optischen Blende. Je nach Umgebungshelligkeit verändert sich der Durchmesser der Pupille. Die nächste Komponente im Strahlengang ist die Linse. Die wichtigste Funktion der Linse ist die scharfe Bildeinstellung mit Hilfe der Akkomodation. Damit wird die Fähigkeit des Auges bezeichnet, alle Punkte zwischen Nah- und Fernpunkt durch Änderung der Linsenform auf die Netzhaut zu fokussieren. Den größten Raum des Auges nimmt der Glaskörper ein, der als Stützgerüst für die Netzhaut wirkt.

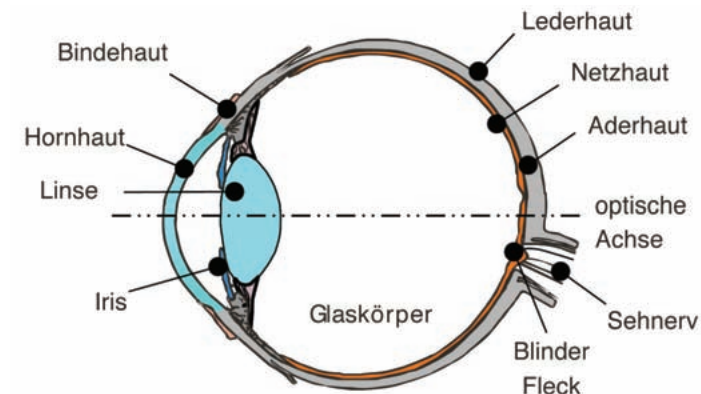


Abb. 12
Aufbau des Auges

Wie wirkt Laserlicht auf das Auge?

6.2 Biologische Wirkung

Welche Wirkung eine bestimmte Wellenlänge auf das bestrahlte Gewebe hat, hängt v.a. von der Eindringtiefe dieser Strahlung ab, die in Abb. 13 und Abb. 14 für das Auge und die Haut schematisch wiedergegeben ist. Da es sich bei Netzhautverletzungen meist um irreparable Schädigungen handelt, ist der Wellenlängenbereich, der auf die Netzhaut fokussiert werden kann, besonders gefährlich. Dieser Bereich beschränkt sich jedoch nicht nur auf den sichtbaren Spektralanteil, sondern reicht von 400 nm bis 1400 nm und schließt damit den nahen Infrarot-Bereich mit ein!

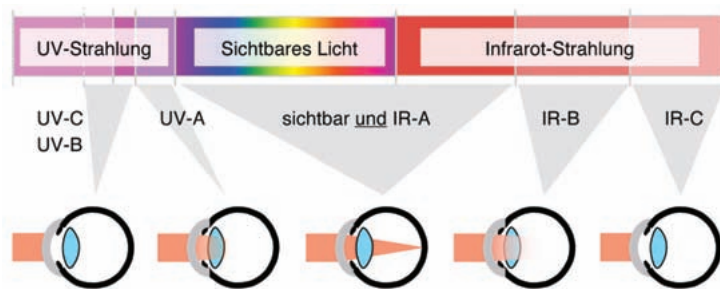


Abb. 13 Augenabsorption von optischer Strahlung

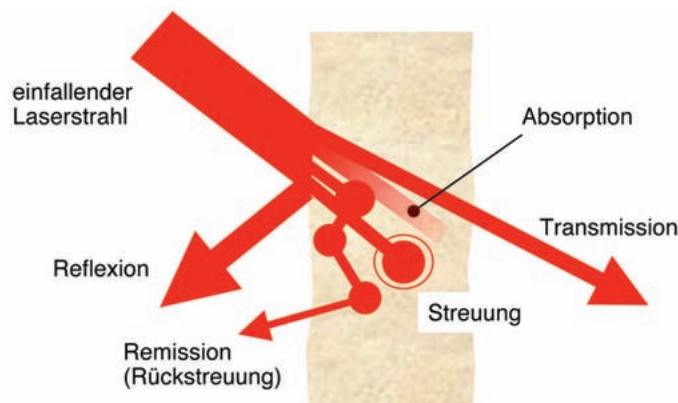


Abb. 14 Hautabsorption von optischer Strahlung

Wirkmechanismen

Hinsichtlich der biologischen Wirkung von Laserstrahlung muss man zwischen zwei Wirkmechanismen unterscheiden. Während im kurzwelligen Bereich (UV, blau) auch **photochemische Prozesse** die Schädigungsgrenze bestimmen, sind es im langwelligeren Teil des Spektrums (rot) vorwiegend **thermische Vorgänge**, die zur Schädigung führen.

Photochemische Schädigung: sie ist das Resultat einer spezifischen Absorption durch Moleküle, wodurch eine chemische Reaktion ausgelöst wird. Vor allem die Haut, die Augenlinse und die Netzhaut können nach einer Bestrahlung mit UV- oder blauem Licht irreversible Veränderungen zeigen. Bei photochemischer Schädigung hat die Größe der bestrahlten Fläche keinen Einfluss auf die Wirkung.

Thermische Schädigung: wird die auftreffende Leistung unspezifisch absorbiert, dann führt dies zur Erwärmung. Im Gegensatz zur photochemischen Schädigung besteht hier eine Abhängigkeit von der Größe der bestrahlten Fläche, da sie die Wärmeableitung mitbestimmt. Welche Auswirkung die Temperaturerhöhung auf das Gewebe hat, hängt von der erreichten Temperatur ab. Bis etwa 45°C sind keine irreversiblen Schäden zu erwarten. Bei einer Temperatur von etwa 60°C setzt Koagulation ein. Ab 150°C kommt es zur Karbonisierung des Gewebes, und über 300°C beginnt das Gewebe zu verdampfen.

Das Ausmaß der Wirkung von Laserstrahlung hängt auch von den optischen und thermischen Eigenschaften des bestrahlten Gewebes selbst ab. Sie bestimmen, wie viel der eingebrachten Energie absorbiert und in welcher Art diese Energie weitergeleitet wird. Einer der wichtigsten Gewebeparameter in diesem Zusammenhang ist der spektrale

Welche Schäden kann Laserlicht verursachen?

Sonnenlicht kann schädigen

Absorptionskoeffizient. Er gibt an, wie viel der eingebrachten Energie beim Durchdringen einer bestimmten Gewebeschicht absorbiert wird.

6.2.1 UV-Bereich

UV-A: 400 nm bis 315 nm. Im Auge wird diese Strahlung vorwiegend in der Linse absorbiert und trägt dort zur Bildung des Grauen Stars bei.

UV-B: 280 bis 315 nm. Dieser Spektralbereich führt zur bekanntesten Schädigungsform - dem „Sonnenbrand“. Gegenüber dem Schwellwert der UV-A Strahlung ist der Schwellwert für Sonnenbrand etwa 200 - 300 mal niedriger. Beim Auge kann die Strahlung zur Entzündung der Hornhaut und der Bindehaut führen.

UV-C: 100 - 280 nm. Aus praktischen Gründen kann als untere Grenze jedoch 180 nm angegeben werden, da sich UV-Strahlung unterhalb dieser Grenze in der Luft nicht mehr ausbreiten kann. Aufgrund der kurzen Wellenlängen ist die UV-C Strahlung die energiereichste Form an UV-Strahlung. Sie beinhaltet das Wirkungsmaximum für Hornhaut- und Bindehautentzündung.

6.2.2 Sichtbares Licht

Im sichtbaren Bereich ist das Auge bis zu Leistungen von etwa 1 mW durch natürliche Abwehrreaktionen geschützt. Diese Abwehrreaktionen beginnen mit einer Verzögerung von etwa 0,25 Sekunden. Eine Schädigung der Netzhaut ist nicht auszuschließen, wenn entweder die Einwirkzeiten über die 0,25 s hinausgehen, oder die Leistung höher als 1 mW ist. Die Netzhaut kann bei kurzzeitigen Einwirkzeiten thermisch und bei längeren Einwirkzeiten auch photochemisch (Blue-Light-Hazard) geschädigt werden.

6.2.3 IR-Bereich

IR-A: 700 bis 1400 nm. IR-A Strahlung ist zwar nicht sichtbar, wird aber trotzdem auf die Netzhaut fokussiert und ist daher besonders gefährlich, da keine natürlichen Abwehrreaktionen eintreten.

IR-B: 1400 bis 3000 nm. Die Eindringtiefe dieser Strahlung nimmt mit zunehmender Wellenlänge drastisch ab. Die Wirkung von IR-B Strahlung ist thermischer Natur und führt bei genügend hohen Leistungsdichten beim Auge als auch bei der Haut zu Verbrennungen.

IR-C: 3 μm - 1 mm. Die Eindringtiefe bleibt über das gesamte Gebiet aufgrund der Wasserabsorption unter 1 mm. Als biologische Wirkung kann auch hier Temperaturerhöhung bzw. Verbrennung angegeben werden. Die Strahlgrenzwerte im ganzen IR-C Bereich sind gleich hoch.

Infrarotstrahlung ist unsichtbar

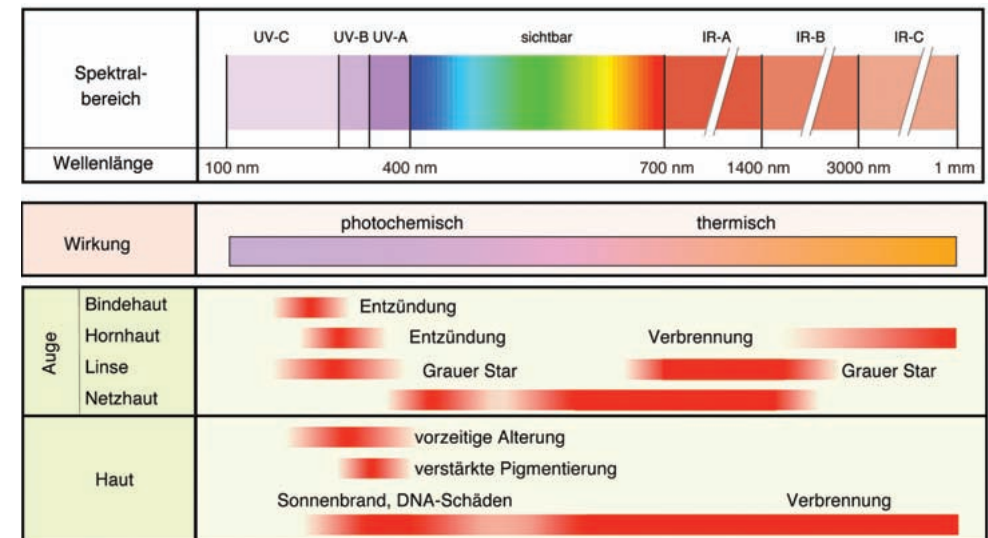


Abb. 15 Gewebeschädigungen

Wie lange darf Laserlicht einwirken?

6.3 Einfluss der Zeit

Neben der Wellenlänge bestimmt die Einwirkzeit die Wirkung der Laserstrahlung. Da sich in Abhängigkeit von der Zeit unterschiedliche Prozesse einstellen, ist die Bewertung biologischer Wirkungen kompliziert. Eine graphische Zusammenfassung der möglichen Gewebeeffekte ist in Abb. 16 zu sehen.

Thermische Wirkungen werden im Zeitbereich von wenigen Mikrosekunden bis zu einigen Minuten erzielt. Wenn die Einwirkzeit groß gegenüber der thermischen Zeitkonstante des bestrahlten Gewebes ist, und zwischen Energieabsorption und -ableitung nur eine geringe Differenz liegt, wird sich das Gewebe proportional zur eingestrahnten Leistung erwärmen. Der zulässige Grenzwert wird demnach als Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte) gemessen und in W/m^2 angegeben. Wenn die Einwirkzeiten kurz gegenüber der thermischen Zeitkonstante sind, dann ist die Wirkung der Strahlung **proportional** zur eingestrahnten Energie.

Im Arbeitsgebiet der Kurzpuls-Laser wird sehr viel Energie in sehr kurzer Zeit (Piko- und Femtosekunden) auf das Gewebe übertragen. Die dabei beobachteten Effekte werden unter dem Begriff **nichtlineare Prozesse (Photoablation, Photodisruption)** zusammengefasst.

Um photochemische Schädigungen zu erzielen, benötigt man gegenüber den thermischen Effekten wesentlich längere Einwirkzeiten. Im UV-Bereich verhält sich die Strahlung überdies kumulativ. Ähnlich wie im Röntgenbereich kann hier von einer Dosis-Beziehung gesprochen werden.

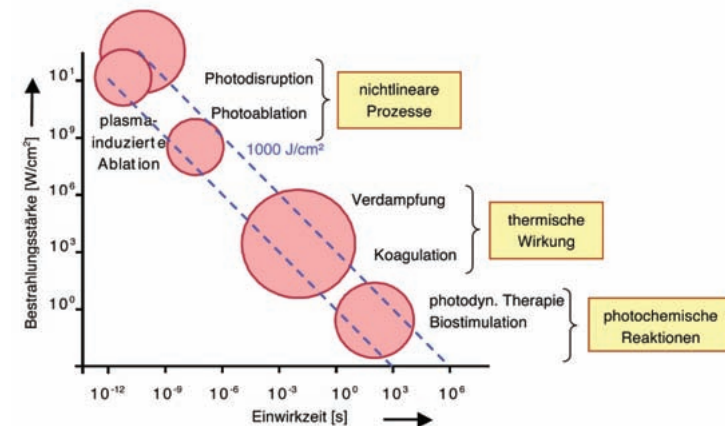


Abb. 16 Gewebeeffekte in Abhängigkeit von der Einwirkzeit und von der Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte).*

Unabhängig von der Einwirkzeit muss die Bestrahlung etwa 1 bis $1000 \text{ J}/\text{cm}^2$ betragen, um einen Gewebeeffekt hervorzurufen.

* Quelle: M.Niemz: Laser-Tissue Interactions; Fundamentals and Applications; 2002; Springer-Verlag

7 Maximal zulässige Bestrahlung (MZB)

So wie bei anderen chemischen und physikalischen Einwirkungen, werden auch für die Laserstrahlung Grenzwerte definiert, Werte für die Maximal Zulässige Bestrahlung, kurz MZB-Werte genannt.

Die MZB-Werte hängen in komplizierter Weise von der Einwirkungsdauer und der Wellenlänge ab und werden in den Einheiten von W/m^2 (Bestrahlungsstärke) oder J/m^2 (Bestrahlung) in der internationalen Norm IEC 60825 1 angegeben. In Österreich trägt die Norm die Bezeichnung ÖVE/ÖNORM EN 60825-1.

Um festzustellen, ob eine vorhandene Strahlung über den MZB-Werten liegt, muss zunächst der anzuwendende MZB-Wert bestimmt und danach die Bestrahlung oder Bestrahlungsstärke an jenem Ort gemessen oder berechnet werden, an dem die mögliche Gefährdung zu beurteilen ist. Dafür muss einerseits die Wellenlänge der Strahlung bestimmt, und andererseits eine realistische Bestrahlungsdauer angenommen werden.

7.1 Einflussgrößen

Zeitbasis

Für eine Analyse der Augengefährdung sind im sichtbaren Bereich 0,25 Sekunden üblich, wenn kein absichtliches Beobachten der Quelle vorgesehen ist. Im unsichtbaren IR-Bereich kann eine Bestrahlungsdauer von 10 Sekunden angenommen werden.

Im UV-Bereich muss sowohl bei den Augen als auch bei der Haut immer eine Bestrahlungsdauer von bis zu 30.000 Sekunden angenommen werden. Bei der Haut im Wellenlängenbereich größer als 400 nm kann man, so wie beim Auge im IR-Bereich von einer Bestrahlungszeit von 10 Sekunden ausgehen.

Messblenden

Für die Energie- oder Leistungsmessungen werden Messblenden mit definiertem Durchmesser verwendet, die den Energie- oder Leistungsdetektoren vorgesetzt werden. Die Durchmesser der Messblenden sind in der Norm ÖVE/ÖNORM EN 60825 1 definiert. Sie hängen von der Wellenlänge des zu messenden Lasers als auch teilweise von der Zeitbasis ab. Einen Überblick dazu bietet Tabelle 2.

Wellenlängenbereich [nm]	Einwirkzeit [s]	Durchmesser der Messblende [mm]	
		Auge	Haut
180 - 400		1	3,5
400 - 1400		7	3,5
1400 - 10^5	$t < 0,35$ $0,35 < t < 10$ $t > 10$	1 $1,5 t^{3/8}$ 3,5	3,5
$10^5 - 10^6$		11	11

Tabelle 2: Durchmesser der Messblenden

Bei der Energie- oder Leistungsmessung wird die Energieverteilung innerhalb des Strahls nicht berücksichtigt. Es wird die gesamte Energie bzw. Leistung, die durch die Messblende auf den Detektor fällt, festgehalten und auf die Fläche der Messblende bezogen, d.h. es wird über die Messblendenfläche gemittelt.

Beispiel:

Angenommen es wird eine Messblende mit 7 mm Durchmesser verwendet. Ob der vermessene Laserstrahl mit z.B. 1 mW Leistung einen Strahldurchmesser von 1 mm oder von 3 mm hat, macht im Ergebnis keinen Unterschied. Beide Strahldurchmesser sind kleiner als 7 mm und es wird in beiden Fällen die gesamte Leistung von 1 mW erfasst und auf die Messblende fläche bezogen.

Gepulste Laserstrahlung

Die Werte in den MZB-Tabellen sind nur für einen einzigen Puls einer bestimmten Dauer oder für kontinuierliche Strahlung direkt anwendbar. Im Fall gepulster Strahlung müssen drei Puls-kriterien erfüllt sein. Die Bestrahlung pro Puls wird mit dem kleinsten errechnete MZB-Wert der drei Kriterien verglichen. Für Wellenlängen unterhalb von 400 nm sind nur die Kriterien a) und b) anzuwenden.

a) Einzelpuls-MZB: Die Bestrahlung (Energiedichte) der Einzelpulse der Dauer τ darf nicht den MZB-Wert für einen Einzelpuls der Dauer τ überschreiten.

b) Mittlere Leistung: Die Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte) gemittelt über die Impulsfolgendauer T darf nicht den MZB-Wert für einen Einzelpuls dieser Bestrahlungsdauer überschreiten.

c) Mehrere Pulse: Im Wellenlängenbereich größer als 400 nm ist das menschliche Auge gegenüber wiederholten Pulsen empfindlicher als gegenüber Einzelimpulsen. Diese erhöhte Empfindlichkeit ist von der Pulsanzahl N innerhalb der Bestrahlungszeit abhängig. Der Grenzwert für Einzelpulse verringert sich daher um den experimentell gefundenen Faktor $N^{-1/4}$.

Punktquelle und ausgedehnte Quelle

Im Wellenlängenbereich 400 – 1400 nm hängen die MZB-Werte auch von der Größe der Abbildung des Laserstrahls auf der Netzhaut und damit von Größe der betrachteten scheinbaren (Licht-)Quelle ab. Als Maß für diese Größe wird der Sehwinkel α herangezogen. Ist α kleiner als 1,5 mrad, entspricht diese scheinbare Quelle einer „Punktquelle“, ist α größer als 1,5 mrad, wird sie als „ausgedehnte Quelle“ bezeichnet. Punktquellen stellen immer den worst case dar. Gut kollimierte Laserstrahlen sind meist als Punktquelle anzusehen.

Mehrere Wellenlängen

Für den Fall, dass die zu beurteilende Laserstrahlung aus verschiedenen Wellenlängen besteht, hängt die MZB-Analyse davon ab, ob sich die biologischen Wirkungen je nach Wellenlänge additiv verhalten, oder ob sie unabhängig voneinander wirken - s. Tabelle 3.

$\lambda_1 \backslash \lambda_2$	180 nm bis 315 nm	315 nm bis 400 nm	400 nm bis 1400 nm	1400 nm bis 1 mm
180 - 315 nm	Auge Haut	---	---	---
315 - 400 nm	---	Auge Haut	Haut	Auge Haut
400 - 1400 nm	---	Haut	Auge Haut	Haut
1400 nm bis 1 mm	---	Auge Haut	Haut	Auge Haut

Tabelle 3: Additivität der verschiedenen Wellenlängenbereiche für die Augen und die Haut

Wie groß ist der Lasergefahrenbereich?

Besteht Additivität, sind die Beiträge der einzelnen Wellenlängen gemeinsam zu beurteilen, falls nicht, sind die einzelnen Bestrahlungsbeiträge getrennt zu beurteilen, und ist der kleinste MZB-Wert anzuwenden.

7.2 Lasergefahrenbereich - Sicherheitsabstand

Unter Lasergefahrenbereich versteht man jenen Bereich, in dem der anzuwendende MZB-Wert überschritten ist. Der Sicherheitsabstand oder NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance) ist jene maximale Entfernung, bei der die Bestrahlungsstärke bzw. Bestrahlung gleich dem MZB-Wert wird. Bei einer geringen Divergenz kann sich diese Distanz über beträchtliche Abstände erstrecken, bei einer großen Divergenz beschränkt sich der Lasergefahrenbereich unter Umständen auf wenige Zentimeter.

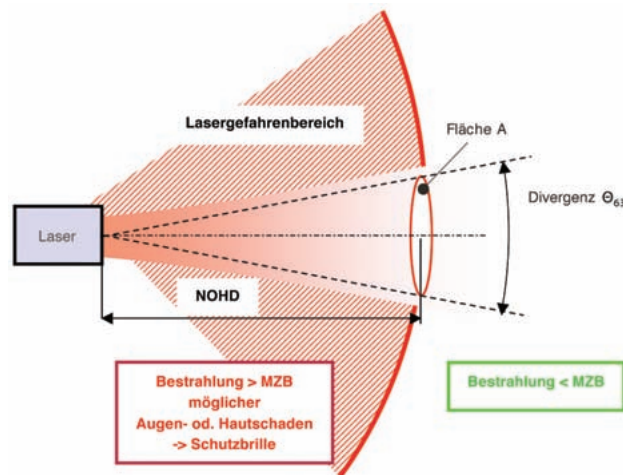


Abb. 17 Sicherheitsabstand (NOHD)

Laser der Klasse 3B oder 4 mit einem kleinen Lasergefahrenbereich (z.B. < 0,5 m) haben ein deutlich geringeres Gefahrenpotenzial als Laser mit einem Gefahrenbereich von einigen 100 m. Die erforderlichen Schutzmaßnahmen sind entsprechend weniger aufwändig.

Da überdies z.B. Fenster und spiegelnde Reflexionen in der Analyse zu berücksichtigen sind, besteht eine mögliche Gefährdung nicht nur in der vorgegebenen Strahlrichtung, sondern auch in den daneben liegenden Bereichen. Der tatsächliche Lasergefahrenbereich hängt daher von der unmittelbaren Umgebung ab. Er kann sich über Fenster auf benachbarte Räume ausdehnen oder sich „um die Ecke“ erstrecken!

**Vorsicht:
Spiegelung!**

Beispiel:

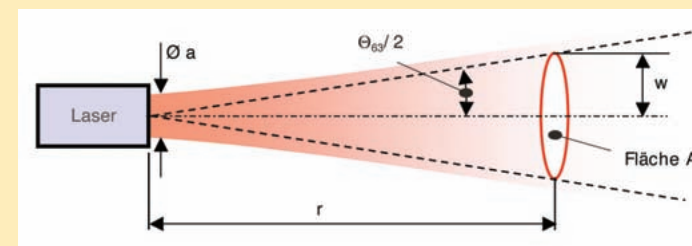
Wie groß ist der Sicherheitsabstand eines CO₂-Lasers mit $P_0 = 600 \text{ W}$ Ausgangsleistung, der eine Strahldivergenz $\Theta_{63} = 3 \text{ mrad}$ und am Ort des Strahlaustritts einen Strahldurchmesser $a = 2 \text{ cm}$ aufweist?

Ausgangspunkt ist die Frage nach der Bestrahlungsstärke E . Sie ergibt sich im Abstand r aus der Laserleistung dividiert durch die bestrahlte Fläche A :

$$E = P_0 / A$$

Für die Berechnung der Fläche A muss zunächst der Strahlradius w ermittelt werden:

$$w = r \tan(\Theta_{63}/2) + \text{Strahlradius } a/2 \text{ beim Austritt}$$



Der Strahlradius beim Austritt kann in den meisten Fällen gegenüber dem ersten Term vernachlässigt werden, und für sehr kleine Winkel, wie bei der Divergenz, kann die

Winkelfunktion ebenfalls vernachlässigt und $\tan\left(\frac{\Theta_{63}}{2}\right)$ durch $\frac{\Theta_{63}}{2}$ ersetzt werden. Die Formel vereinfacht sich damit zu

$$A = w^2 \cdot \pi = \left(r \cdot \tan \frac{\Theta_{63}}{2}\right)^2 \cdot \pi \approx \left(r \cdot \frac{\Theta_{63}}{2}\right)^2 \cdot \pi$$

Daraus resultiert die Bestrahlungsstärke E im Abstand r

$$E = \frac{P_0}{A} = \frac{P_0}{\pi \cdot \left(r \cdot \frac{\Theta_{63}}{2}\right)^2}$$

Wird E durch den MZB Wert E_{MZB} ersetzt, dann erhält r die Bedeutung des Gefahrenabstandes NOHD. Nach NOHD aufgelöst ergibt obige Gleichung

$$\text{NOHD} = \frac{2}{\Theta_{63}} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{E_{MZB} \cdot \pi}}$$

Im fernen IR-Gebiet ist der MZB-Wert für das Auge:

$$E_{MZB} = 1000 \text{ W/m}^2.$$

Einsetzen der Werte ergibt einen Sicherheitsabstand von etwa 291 m!

(Bei Berücksichtigung des Strahldurchmessers a ergibt sich $\text{NOHD} \approx 284 \text{ m}$).

8 Laserklassen

Zur Orientierung des Anwenders bezüglich der Gefährlichkeit von Laserstrahlung sind Hersteller weltweit verpflichtet, Laser in Klassen einzuteilen. Diese Klassifizierung soll die größtmögliche Gefährdung nach dem „worst-case-Prinzip“ durch Laserstrahlung beschreiben. Ungefährliche Laser fallen in die Klasse 1, die potenziell gefährlichsten Laser sind der Klasse 4 zuzuordnen. Die Klassen sind in der Lasersicherheitsnorm IEC 60825 1 definiert, die in Österreich als ÖNORM ÖVE EN 60825-1 identisch veröffentlicht wird. Die **Grenzwerte zugänglicher Strahlung (GZS-Werte)** definieren hierbei die Grenzen zwischen den Laserklassen. Sie sind in gleicher Weise wie die MZB-Werte von der Wellenlänge und der Zeit abhängig.

Klasse 1

Sichere Lasergeräte. Diese sind entweder sicher, weil ihre Leistung so gering ist, oder weil sie ein Schutzgehäuse besitzen, das die Laserstrahlung im bestimmungsgemäßen Normalbetrieb nach außen hin völlig abschirmt. Laserprodukte der Klasse 1 haben daher keinen Gefahrenbereich.
Warnung: keine

Klasse 1M („M“ steht für „Magnifying Instruments“).

Jene Laser, deren Strahlung zwar für das freie Auge sicher ist aber bei Verwendung optischer Hilfsmitteln (Lupen oder Ferngläsern) potenziellen gefährlich werden kann, sind mit Klasse 1M bezeichnet.

Warnung:

Nicht direkt mit optischen Instrumenten betrachten

Klasse 2

Nur für sichtbare Laserstrahlung (400 - 700 nm) definiert. Der Schutz der Augen wird bei niedrigen Leistungen durch natürliche Abwendreaktionen (z.B. Lidschlussreflex) gewährleistet. Für Punktquellen, wie sie die meisten Laserpointer darstellen, beträgt die maximale Leistung 1 mW. Die maximale Dauer dieser Abwendreaktionen wird mit 0,25 s angenommen. Laser der Klasse 2 sind sicher, solange die natürliche Abwendreaktion nicht unterdrückt wird (absichtlich in den Strahl starren) oder durch Medikamente, Drogen etc. beeinträchtigt ist. Laserprodukte der Klasse 2 haben daher keinen Gefahrenbereich.

Warnung:

Nicht direkt in den Strahl blicken

Klasse 2M

Nur für sichtbare Laserstrahlung (400 - 700 nm) definiert. Jene Laser, die zwar mit freiem Auge bei einer Bestrahlungsdauer von 0,25 Sekunden sicher sind, aber bei denen es mit optischen Hilfsmitteln (Lupen oder Ferngläsern) zu einer potenziellen Gefährdung der Augen kommen kann, werden mit Klasse 2M bezeichnet.

Warnung:

Nicht direkt mit optischen Instrumenten betrachten

Klasse 3A (veraltete Klasse)

Das Gefahrenpotenzial ist im Sichtbaren der Klasse 2 gleichzusetzen, für alle anderen Wellenlängenbereich wie bei Klasse 1, solange keine optischen Hilfsmittel verwendet werden.

Bedingung:

Leistung im Sichtbaren bis 5 mW und Bestrahlungsstärke < 25 W/m². In nicht sichtbaren Spektralbereichen darf die Laserleistung fünfmal so hoch sein wie für Klasse 1.

Warnung:

Nicht direkt mit optischen Instrumenten betrachten

Anmerkung: seit 2001 wird die Klasse 3A durch die Klassen 1M und 2M, je nach Wellenlänge des Lasers, abgelöst.

Klasse 3R

Die Klasse 3R könnte im Bezug auf das Risiko für Augenschäden als Übergang zwischen der (praktisch sicheren) Klasse 2 und der „gefährlichen“ Klasse 3B gesehen werden. Obwohl bei Klasse 3R der Grenzwert bis zu einem Faktor 5 überschritten werden kann, ist das Risiko bei kurzzeitiger unabsichtlicher Bestrahlung gering, da in den MZB-Werten Sicherheitsfaktoren enthaltenen sind. (Die Bezeichnung „R“ kann daher als Kürzel für „reduziertes“ Risiko und reduzierte Sicherheitsmaßnahmen verstanden werden). Eine reelle Schädigungswahrscheinlichkeit ergibt sich nur bei Bestrahlung von mehreren Sekunden Dauer, wie auch entsprechende Studien und Unfallberichte zeigen. Dennoch kann für die Klasse 3R-Produkte ein Gefahrenbereich festgelegt werden. Wichtig ist bei Klasse 3R-Lasern, dass diese nur Personen verwenden, die über das Restrisiko unterwiesen wurden.

Sonstige Schutzmaßnahmen sind im Allgemeinen nicht notwendig.

Bedingung: 5 x Klasse 2 im Sichtbaren (z.B. 5 mW für Punktquellen), 5 x Klasse 1 außerhalb des Sichtbaren.

Warnung:

Nicht in den Strahl blicken

Für Wellenlängen von 400 nm bis 1 400 nm:

Direkte Bestrahlung der Augen vermeiden

Für alle anderen Wellenlängen:

Nicht dem Strahl aussetzen

Sonderklasse „3B**“ (veraltete Klasse)

Die Sonderklasse 3B* erhielt in der Fassung der Norm EN 60825 1 aus 2001 die Bezeichnung „Klasse 3R“.

Klasse 3B

Innerhalb des Gefahrenbereiches besteht Gefahr für das Auge und in Ausnahmefällen für die Haut. Eine Augenschädigung kann bereits nach so kurzer Bestrahlungsdauer eintreten, dass die natürlichen Abwendreaktionen nicht mehr ausreichend schützen. Im Allgemeinen besteht keine Gefahr für die Haut oder für das Auge bei der Betrachtung einer diffusen Reflexion.

Warnung:

Nicht dem Strahl aussetzen

Klasse 4

Gilt für Lasergeräte mit Leistungen über 0,5 W. Es besteht Gefahr für Auge und Haut, wobei nicht nur der direkte Laserstrahl, sondern auch diffuse Streustrahlung ein Gefahrenpotenzial darstellt. Sollte der Laserstrahl auf entzündliche Materialien treffen, besteht sogar Brandgefahr!

Warnung:

Bestrahlung von Haut oder Auge durch direkte oder Streustrahlung vermeiden

Anmerkung zur Klasse 1M und 2M

Die Erhöhung der Gefährdung durch optische Hilfsmittel ergibt sich aus der Tatsache, dass durch sie mehr Lichtleistung in das Auge gelangen kann als ins freie Auge. In der Praxis sind zwei Arten von Laserstrahlen zu beachten: stark divergierende Strahlen und Strahlen mit großem Durchmesser.



Abb. 18 Verwendung einer Lupe bzw. Fernglases

Mit Lupen kann eine Quelle in sehr geringem Abstand betrachtet und auf die Netzhaut scharf abgebildet werden: aufgrund der Nähe wird entsprechend viel Strahlung durch die Lupe aufgefangen, die im größeren Abstand normalerweise am Auge vorbeigestrahlt hätte.

Durch Ferngläser ergibt sich eine Sammelwirkung, die bei großen Strahldurchmessern zum Tragen kommt. Bei Ferngläsern wirkt das Objektiv mit seinem großen Durchmesser als Sammeloptik. Die gesamte Strahlungsleistung, die auf das Objektiv trifft, kann in das Auge treten. Für Laser der Klasse 1M oder 2M, die einen gut kollimierten Laserstrahl emittieren, kann sich dadurch der Lasergefahrenbereich erweitern (ENOH $\dots$ Enhanced Nominal Ocular Hazard Distance).

Tabelle 4: Zusammenfassung über die Gefährdungen bei den einzelnen Laserklassen.

	Direkte Langzeitbestrahlung		Direkte Kurzzeitbestrahlung		Diff. Refl.		Direkte Bestrahlung
	opt. Instr.	freies Auge	opt. Instr.	freies Auge	Auge	Haut	Haut
Klasse 1	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 1M		sicher		sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 2			sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 2M				sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 3R			Geringes Risiko	Geringes Risiko	sicher	sicher	sicher
Klasse 3B					Geringes Risiko	sicher	Geringes Risiko
Klasse 4							

9 Sekundärgefahren

9.1 Gefahren von Laser

Bei der Anwendung von Lasergeräten können verschiedene, so genannte „sekundäre Gefahren“ auftreten, die mit dem Betrieb der Lasergeräte und der Anwendung, aber nicht direkt mit dem Laserstrahl zusammenhängen.

Mechanische Gefahren

Mechanischen Gefahren stellen vor allem maschinell schnell bewegte Teile dar. Dazu zählen Roboter, automatische Türverschlüsse und Koordinatentische bzw. Werkstücke, die bewegt werden.

Spezielle Gefahren sind mit Gasdruck verbunden. Gaszuführungen, z.B. für CO₂ Lasergase oder für Prozessgase, stehen unter Überdruck. Hierbei muss ein geeigneter Gashochdruckschlauch oder eine fixe Verrohrung verwendet werden. Im Gegensatz dazu werden die meisten Gaslaser mit Unterdruck im Resonator betrieben. Auskoppelfenster oder Glasrohre müssen daher sorgfältig eingespannt bzw. fixiert sein, um Spannungen (und die Gefahr einer Implosion) zu vermeiden. Schließlich können mechanische Stöße und Vibrationen zu einer Fehlausrichtung der Strahlachse, und damit zu gefährlichen Situationen führen (z.B. Reflexionen).

Elektrische Gefahren

Jedes leistungsstärkere Lasergerät benötigt eine entsprechend ausgelegte Stromversorgung. Geräteintern liegen manche Kontakte auf Spannungen im kV-Bereich. In gepulsten Lasergeräten können sich Kondensatoren befinden, die auch nach dem Abschalten noch einige Zeit geladen bleiben. Ein geeigneter Entladungsstab sollte beigelegt sein. Bei manchen Lasersystemen kann auch die Steuerelektronik (Masse) auf einem erhöhten Potenzialniveau liegen!

Chemische Gefahren

Chemische Gefahren gehen in erster Linie von den im Laserbau verwendeten Materialien aus.

- In Excimer-Lasern wird giftiges Fluor und Chlor verwendet. Gasflaschen für Excimer-Laser müssen daher sicher verwahrt werden. Bei modernen Excimer-Lasern ist das Gasreservoir bereits im Lasergerät eingebaut.
- Die meisten Farbstoffe von Farbstofflasern, wie z. B. Rhodamine und Coumarine, sind nervengiftig. Hautkontakt mit den Flüssigkeiten und das Einatmen der Dämpfe sollte vermieden werden.
- Die Laserröhren von Ar- und Kr-Lasern enthalten hochgiftiges Beryllium. Diese Röhren sind daher mit großer Sorgfalt zu behandeln!
- Der Staub zerbrochener ZnSe-Linsen (Optikmaterial für CO₂-Laser) ist giftig. ZnSe-Staub ist mit Schutzbrille, Handschuhen, Schutzanzug und Atemmaske einzusammeln.

Rauche und Stäube

Rauche und Stäube entstehen, wenn Material verdampft wird. Lasergenerierte Rauche und Stäube beinhalten lungengängige Schwebstoffe. Ob sie lungenbelastend, toxisch oder krebserregend wirken, hängt vom bearbeiteten Material ab. An dieser Stelle sei auf die MAK-Werte (maximale Arbeitsplatzkonzentration) hingewiesen, die am Arbeitsplatz einzuhalten sind.

Begleitstrahlung

Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung wird durch die Wechselwirkung mit extremer Pulsleistung mit Schwermetallen erzeugt.

UV-Strahlung

UV-Strahlung entsteht sowohl in Entladungsrohren von Gaslasern als auch in einem laserinduzierten Plasma. Unter Sekundärstrahlung versteht man die UV-Strahlung als auch blaues Licht, das beim Laserschweißen im Schweißplasma entsteht. Diese Strahlung kann intensiv genug sein, um photochemische Schäden, z.B. Hornhautentzündung („Verblitzen“) herbeizuführen.

Mikrowellenstrahlung und Radiowellen

Mikrowellenstrahlung und Radiowellen werden bei hochfrequenzangeregten Lasern erzeugt und auch abgestrahlt, wenn die Einrichtung nicht geeignet abgeschirmt ist.

Brand- und Explosionsgefahr

Entflammbares Material stellt bei Verwendung leistungsstarker Laser eine Quelle für Brandgefahr dar. Brandgefahr besteht durch brennbares Material im **Strahlführungssystem**, an der **Bearbeitungsstelle** und in der **Umgebung**. Die Brandgefahr ist in sauerstoffangereicherten Atmosphären erhöht (Sauerstoff wird in manchen Laseranwendungen verwendet).

Vorsicht ist auch bei explosionsfähigen Atmosphären geboten. Bereits Leistungen oberhalb von nur 35 mW können bei entsprechender Leistungsdichte (wie sie z.B. bei optischen Single-Mode-Fasern auftreten) zur Zündung ausreichen. Bei Hochleistungslasern kann die Strahlung in Lösungsmitteldämpfen, Rauch, entflammbaren Gasen als Zündquelle dienen, die in weitere Folge zu Explosionen führen können. Elektrische Kondensatoren (wie sie bei gepulsten Systemen verwendet werden) können bei Überlast explodieren.

Pflichten des Herstellers

10 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 Information (unter anderem das Anbringen von Warn- und Hinweisschilder).

10.1 Technische Schutzmaßnahmen (Konstruktionsanforderung)

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 sein 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.

Schlüsselschalter

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

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.

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 und 4 ausgesetzt zu sein.

Beobachtungsoptiken

Sollte das Lasergerät mit einer Beobachtungseinrichtung ausgestattet sein, so ist zu gewährleisten, dass die MZB-Werte 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.



Abb. 19
Warnschild für Laser-
strahlung

10.2 Warn und Hinweisschild

Gemäß 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

LASERSTRAHLUNG
Nicht in den Strahl blicken
LASER KLASSE 2
nach EN 60825-1 (2002)

oder

LASERSTRAHLUNG
Bestrahlung von Auge oder Haut durch direkte
oder Streustrahlung vermeiden
LASER KLASSE 4
nach EN 60825-1 (2002)

Jede Lasereinrichtung ab 1M muss ein Hinweisschild aufgeklebt oder beigelegt haben, das die Laserklasse, den entsprechenden Warntext sowie das Datum der Veröffentlichung der Norm, nach der das Produkt klassifiziert wurde, angibt.

Strahlparameter

Jede Lasereinrichtung außer Klasse 1 muss auf einem Hinweisschild die Angaben über maximale Strahlleistung bzw. Energie, Impulsdauer und Wellenlänge aufweisen.

Abdeckung

Wenn bei Öffnung einer Abdeckung Laserstrahlung austreten kann, die die MZB-Werte für Klasse 1 überschreitet (mit Angabe der entsprechenden Klassen-Warnung):

VORSICHT - LASERSTRAHLUNG KLASSE XX,
Wenn Abdeckung geöffnet ...
+ jeweiliger Warntext

Wenn Sicherheitsverriegelungen zu überbrücken sind:

VORSICHT - LASERSTRAHLUNG KLASSE XX,
Wenn Abdeckung geöffnet und Sicherheitsverriegelung
überbrückt

Strahlaustrittsöffnung

Austrittsöffnung für Laserstrahlung

Zusatzbestimmung

- wenn das Laserprodukt sichtbare Laserstrahlung abgibt, dann kann der Begriff „Laserstrahlung“ durch den Begriff „Laserlicht“ ersetzt werden.
- wenn das Laserprodukt nicht sichtbare Laserstrahlung abgibt, dann muss vor dem Begriff „Laserstrahlung“ das Wort „unsichtbare“ im Warntext eingeschoben werden.

Was müssen Anwender erfahren?

10.3 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, Pulsenergie, Pulsdauer, etc.) einschließlich der Messunsicherheit.
- d) Für gekapselte (eingebauten) Laserprodukte; sind alle notwendigen Hinweise bereitzustellen, um einer schädlichen Strahlungsexposition vorzubeugen.
- e) Wenn es relevant ist, sollte der Lasergefahrenbereich für Laserprodukte der Klasse 3B und 4 angegeben sein (bzw. der erweiterte Gefahrenbereich bei 1M oder 2M).
- f) Hinweise über die geeignete Laserschutzbrille.
- 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. Justiereinrichtung) und Verfahrensweisen, inklusive Warnung vor Fehlbedienung und deren Konsequenzen.
- k) Sofern das Laserprodukt seine Energieversorgung nicht enthält, ist die Art der Energieversorgung zu spezifizieren.

11 Schutzmaßnahmen seitens des Anwenders

Während sich Teil 1 der Normenreihe EN 60825 an den Hersteller richtet, sind in Teil 14 (IEC TR 60825-14) empfohlene Schutzmaßnahmen angeführt, die der Anwender umsetzen kann.

11.1 Technische und bauliche Schutzmaßnahmen

Laserkontrollbereich

Ein Laserkontrollbereich ist überall dort einzurichten, wenn das Risiko einer Verletzung durch Anwendung des Laserstrahl bzw. der Lasereinrichtung vernünftigerweise vorhersehbar ist, z.B. wenn Personen im Lasergefahrenbereich arbeiten müssen. Dies betrifft vor allem Laserprodukte der Klassen 3B und 4. Laserkontrollbereiche sind klar abzugrenzen, zu kennzeichnen und bei Bedarf zu sichern. Der Zutritt ist auf Personen mit entsprechender Sicherheitsunterweisung zu beschränken.

Bei Industrieanwendungen im weitesten Sinn sollte man grundsätzlich danach trachten, den Lasergefahrenbereich mit Hilfe von Abschirmungen möglichst klein zu halten. Je mehr der Lasergefahrenbereich eingeschränkt werden kann, desto geringer ist Aufwand für Abschirmungen und Absicherungsmaßnahmen des Laserkontrollbereichs.

Was müssen Anwender umsetzen?

Tabelle 5: Beispiele möglicher Schutzmaßnahmen

Kennzeichnung	• Bodenmarkierung • Absperrketten • Warnzeichen, Warnlampen, etc.
Abschirmung	• Laserschutzvorhänge • mobilen/festen Laserabschirmwände • unmittelbare Abdeckung der Prozesszone • Strahlengang auf die notwendige Länge begrenzen, etc.
Absicherung	• Sicherheitsschalter (Interlock) • Lichtvorhang • Trittmatten, etc.
Konstruktive Maßnahmen	• Strahlführung (z.B. über Kopf führen, Laser erhöht positionieren). • Auswandern der Strachse verhindern. • Strahlwege bei Lasern der Klasse 4 abschirmen. • Strahlengang nicht auf Türen oder Fenster richten, etc.

Abb. 20 zeigt exemplarisch zwei Möglichkeiten auf, wie der Laserkontrollbereich gestaltet sein kann. Entweder wird der gesamte Raum als Laserkontrollbereich definiert, dann müssen Warnlampe, Warnhinweise außerhalb des Raumes sowie der Sicherheitsschalter an der Eingangstür angebracht werden, oder das Prozessfeld wird im inneren des Raumes entsprechend umschlossen.

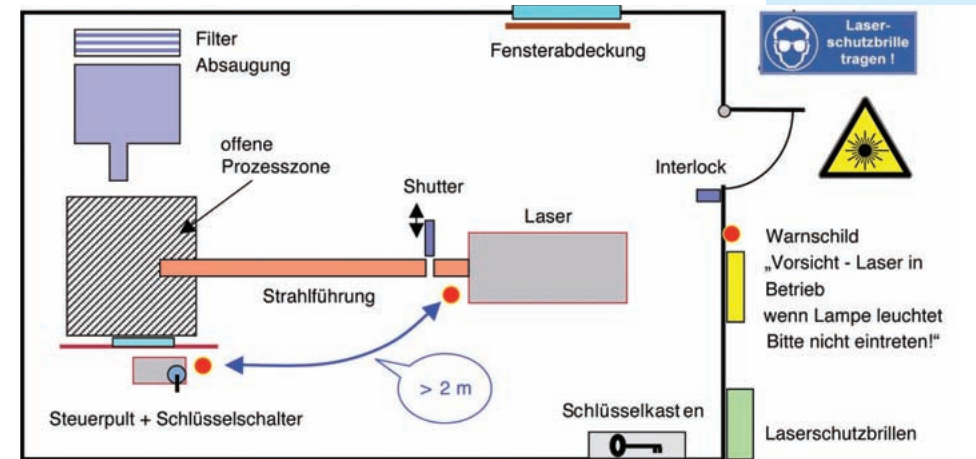


Abb. 20 Kennzeichnung und Absicherung des gesamten Raumes als Laserkontrollbereich für industrielle Anwendungen. Bei medizinischen Anwendungen entfällt der Interlock an der Eingangstür.

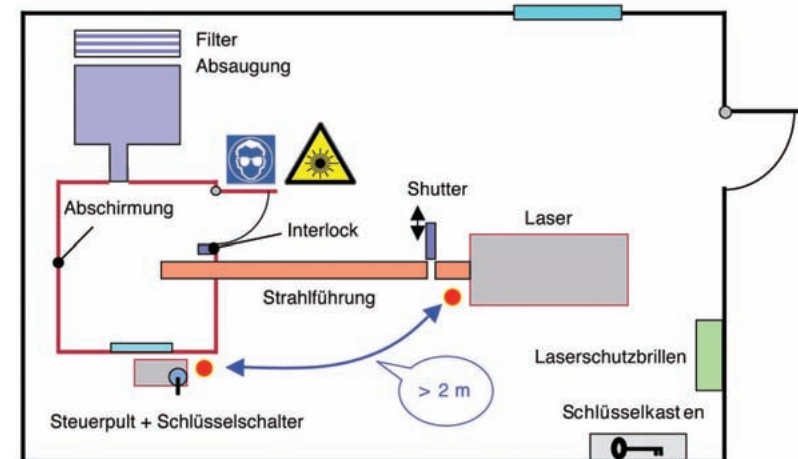


Abb. 21 Kennzeichnung und Absicherung der begehbaren Prozesszone als Laserkontrollbereich für industrielle Anwendungen.

Anmerkung zur Klasse 3B und 4

Das Gefahrenpotenzial, im Sinne einer möglichen Verletzung, von Lasern der Klasse 3B oder 4 wird vor allem durch den Lasergefahrenbereich bestimmt. Durch geeignete Maßnahmen kann dieser Bereich auf ein Minimum beschränkt werden, sodass auch Laserprodukte der Klasse 3B und 4 sicher im Normalbetrieb verwendet werden können. Das Ziel der Schutzmaßnahmen ist es nicht, Laser der Klasse 3B oder 4 in einen Klasse 1 Laser zu verwandeln (dies ist meist nur mit sehr viel technischem Aufwand möglich), sondern einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Laser der Klasse 3B oder 4 sind daher nicht automatisch „gefährlich“, sondern bringen ein entsprechendes Gefahrenpotenzial mit sich, dem mit geeigneten Maßnahmen begegnet werden kann.

Weitere praxisbezogene Schutzmaßnahmen

Folgende Punkte sollten nach Möglichkeit beachtet werden:

- Für gute Raumbelichtung sorgen
- Spiegelnde Oberflächen vermeiden
- Stolperfallen vermeiden
- Alle Optikelemente fixieren
- Mechanische Teile sollten nicht umfallen oder sich lösen können.
- Kein brennbares Material im Arbeitsbereich von Lasern der Klasse 3B und 4 lagern.
- Alle Sicherheitsmaßnahmen müssen regelmäßig überprüft werden.
- Wo es sinnvoll erscheint, sollten Arbeitsanweisungen erstellt werden (z.B für das Reinigen der Fokussiereinheit).

Arbeiten mit dem freien Strahl

Derartige Arbeiten beinhalten das höchste Gefahrenpotenzial. Folgende Maßnahmen sind nach Möglichkeit in Abhängigkeit von der Klasse zu ergreifen:

Ab Klasse 2	• Strahlengang über/unter Augenhöhe verlaufen lassen. • Laserstrahl nicht auf Personen richten. • Gehwege sollen den Strahlengang nicht kreuzen. • Strahlengang nicht auf Türen oder Fenster richten. • Strahlengang auf die notwendige Länge begrenzen.
Ab Klasse 1M u. 2M*) (zusätzlich)	• minimal notwendige Leistung verwenden. • spiegelnde Reflexionen vermeiden.
Ab Klasse 3R (zusätzlich)	• sicherstellen, dass niemand in den Strahl blickt.
Klasse 3B und 4 (zusätzlich)	• Schutzausrüstung innerhalb des Lasergefahrenbereiches verwenden. • Genehmigung der Anwendung durch den LSB. • Kennzeichnung und Absperrung des Lasergefahrenbereichs.

*) Für Klasse 1M und 2M soll zusätzlich sichergestellt werden, dass niemand in den Strahl mit optischen Instrumenten blickt.

Achtung:
freier Laserstrahl

11.2 Organisatorische Schutzmaßnahmen

Bei den organisatorischen Schutzmaßnahmen kann man zwei Arten unterscheiden. Die eine besteht aus empfohlenen Handlungen, wozu u. a. die Bestellung eines Lasersicherheitsbeauftragten gehört. Die zweite Maßnahmenkategorie beinhaltet hinweisende Sicherheitsmaßnahmen wie z. B. Warn- u. Hinweisschilder. Organisatorische Schutzmaßnahmen treten an die Stelle bzw. ergänzen technische Schutzmaßnahmen, falls diese unverhältnismäßig aufwendig (z.B. automatische Personen-Detektion in begehbaren Kabinen) oder nicht zweckdienlich (z.B. Sicherheitsschalter an der Tür bei medizinischen Anwendungen) sind.

Unterweisung der Mitarbeiter

Gemäß IEC TR 60825-14 wird eine Unterweisung der Mitarbeiter bei Verwendung von Lasern der Klasse 1M, 2M und 3R empfohlen. Für Laser der Klasse 3B oder 4 sollte ein Laserschutzbeauftragter (LSB) benannt werden. Da die Aufgaben des LSB besondere Bedeutung haben, sind sie in Kapitel 11.3 näher erläutert.

11.3 Laserschutzbeauftragter

Nach IEC TR 60825-14 sollte für Laser der Klasse 3B oder 4 durch den verantwortlichen Betreiber ein Laserschutzbeauftragter des LSB benannt und sein Verantwortungsbereich definiert werden. Auch für Laserprodukte der Klasse 1M und 2M wird ein LSB empfohlen, falls das Laserprodukt einen gut kollimierten Strahl aufweist. Der LSB muss eine entsprechende Ausbildung haben. Für die Ausbildung zum geprüften Laserschutzbeauftragten gilt in Österreich die ÖNORM S 1100, die Ausbildungsinhalt und -dauer festlegt.

Aufgaben und Pflichten des LSB

Die Aufgabe des LSB ist die Unterstützung und die Beratung des verantwortlichen Betreibers im Hinblick auf die Schutzmaßnahmen und sichere Anwendung von Laserprodukten. Im Einzelnen umfassen die Aufgaben des LSB:

- a) Durchführung von Gefahrenanalysen (Evaluierung - siehe unten).
- b) Beratung des verantwortlichen Betreibers bezüglich Sicherheitsfragen und betrieblicher und arbeitsmedizinischer Schutzmaßnahmen.
- c) Auswahl der persönlichen Schutzausrüstung
- d) Unterweisung von Mitarbeitern, die mit den Lasergeräten oder im Laserkontrollbereich arbeiten.
- e) Regelmäßiges Überprüfen, ob die vorgeschriebenen Schutzmaßnahmen durchgeführt oder eingehalten werden. → **Führen einer Check-Liste.**
- f) Arbeitsanweisungen erstellen für standardisierte Arbeitsmethoden und Abläufe.
- g) Die verantwortlichen Personen über Mängel und Versagen von Lasergeräten verständigen.
- h) Alle Unfälle und Vorfälle, welche mit Lasergeräten zu tun haben, zu untersuchen, und Informationen über vorbeugende Maßnahmen allen involvierten Personen zur Verfügung zu stellen.

Evaluierung

Das ArbeitnehmerInnenschutzgesetz schreibt vor, dass Arbeitsplätze bezüglich möglicher Gefährdungen zu evaluieren sind. Weiterführende Informationen sind z.B. auf der Website www.eval.at zu finden. Ein Schema könnte folgende Punkte beinhalten:

- Definition des Bereiches der Evaluierung (organisatorischer Bereich, Räumlichkeiten)

Keine Unklarheiten dulden

- Beschreibung der Tätigkeiten im Laserüberwachungsreich
- Beschreibung des Lasergerätes
- Beschreibung der Laseranwendung
- Identifizierung der Gefahren und des Risikos (NOHD, ...)
- Festlegung der Schutzmaßnahmen

Die Dokumente der Evaluierung sind laufend zu aktualisieren!

Verhalten bei Zwischenfällen und Unfällen

Zwischenfälle sind Vorkommnisse, bei denen es zwar zu keiner Verletzung oder sonstigen Beschädigungen von Einrichtungen kommt, die aber potenziell dazu hätten führen können.

Zwischenfälle und Unfälle sind dem LSB zu melden. Er sollte auf Basis einer Untersuchung des Unfalles Empfehlungen zur Vermeidung einer Wiederholung erarbeiten. Eine weitere Verwendung des Lasergerätes sollte unterbleiben, bis entsprechende Maßnahmen ergriffen wurden, um weiteren Zwischenfällen und Unfällen vorzubeugen.

Meldungsschema

Für den Fall eines Zwischenfalls oder Unfalls sollte der LSB einen Bericht über die Umstände verfassen. Dieser Bericht sollte zumindest enthalten:

- a) Eine Zusammenfassung der Umstände des Zwischenfalles, die zu einer Verletzung führten:
 - 1) Datum, Ort und Zeit des Zwischenfalles
 - 2) Namen und Funktionen aller involvierten Personen
 - 3) Details des Unfalles, wie durch die verletzte Person beschrieben
 - 4) offensichtliche oder vermutete Art jeglicher Verletzungen.

- 5) Faktoren, die offensichtlich zum Zwischenfall beigetragen haben
- 6) Empfehlungen des LSB zur Vermeidung einer Wiederholung, und
 - b) Gegebenenfalls schriftliche Erklärungen von allen beteiligten Personen.
 - c) Medizinische Berichte über alle verletzten Personen.
 - d) Daten über das Laserprodukt, im Besonderen über den Zustand und Einstellungen des Gerätes sowie des Zubehörs unmittelbar nach dem Zwischenfall.
 - e) Eine Liste von Geräten und Zubehör, welches während des Zwischenfalls verwendet wurde.

11.4 Laserschutzbrillen

Laserschutzbrillen sind im Lasergefahrenbereich zu tragen. Die genauen Anforderungen an Laserschutzbrillen wurden in Europeanormen veröffentlicht, die in Österreich als ÖNORM EN 207 aufliegt. Laserschutzbrillen sind nicht für längeres Blicken in den Laserstrahl gedacht, sondern sollen vor einer zufälligen Bestrahlung schützen!

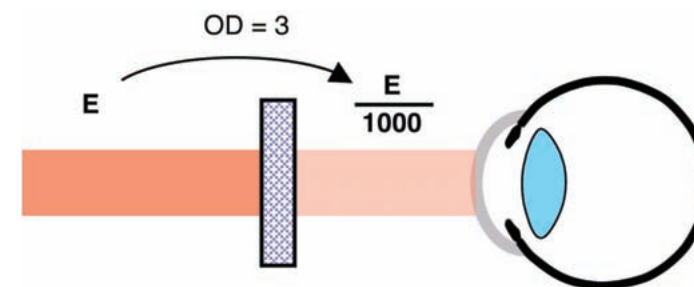


Abb. 22 Optische Dichte

Eine Laserschutzbrille hat die Aufgabe, auftreffende Laserstrahlung auf ein ungefährliches Maß abzuschwächen. Der Transmissionsgrad $T(\lambda)$ der Brille muss bei der betrachteten

Kein Laser ohne Gläser

Laserwellenlänge λ also so klein sein, dass die am Auge auftreffende Bestrahlungsstärke E (W/m^2) unterhalb des MZB Wertes liegt:

$$T(\lambda) \leq \text{MZB}(\lambda)/E.$$

Gegenüber der Norm EN 60825-1 verwendet die EN 207 allerdings ein vereinfachtes MZB-Werte-Schema mit nur drei definierten Wellenlängenbereichen. Zur Beschreibung der Filterwirkung wird im Allgemeinen die optische Dichte (OD) verwendet, die als negativer, dekadischer Logarithmus des Transmissionsgrads definiert ist:

$$\text{OD} = -\log T = -\log E/\text{MZB}$$

Diese Definition bedeutet, dass $\text{OD} = 2$ ist, wenn der Filter ein Hundertstel der Strahlung durchlässt, und $\text{OD} = 3$ ist, wenn er ein Tausendstel der Strahlung durchlässt, u.s.w. - s. Tabelle 6.

Tabelle 6: Optische Dichte und Transmissionsgrad

Optische Dichte	Transmissionsgrad T
OD = 1	0,1
OD = 2	0,01
OD = 3	0,001 etc.

Neben der Filterwirkung muss die Brille gegenüber Laserstrahlung beständig sein. Diese Beständigkeit wird nach einem genormten Test (EN 207) geprüft. Besteht die Brille den Test, dann wird ihr die zur optischen Dichte korrespondierende Schutzstufe zugeordnet; beträgt die optische Dichte 4, dann hat die Brille nach bestandem Test die

Schutzstufe 4. (Die Beständigkeit bezieht sich nicht nur auf das Brillenglas, sondern gilt auch für den Brillenrahmen.)

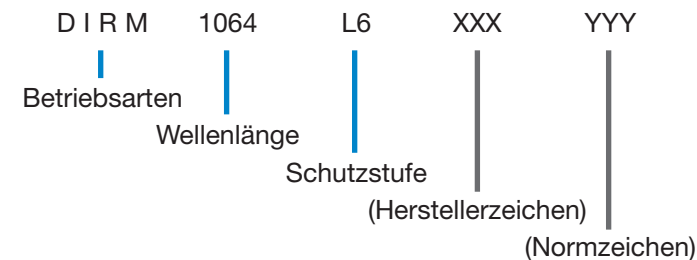
Beispiel:

Der (thermische) MZB-Wert im sichtbaren Bereich ist 25 W/m^2 . Bei einer Schutzstufe 4 dürften demnach $25 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ auf die Laserschutzbrille treffen. Bei einem angenommenen Strahldurchmesser von 2 mm dürfte die Leistung des auftreffenden Strahls rund 0,78 W betragen.

Aufgrund des vereinfachten MZB-Werte-Schemas gemäß EN 207 dürfen bei einer Schutzstufe 4 sogar 105 W/m^2 auf die Schutzbrille treffen.

Kennzeichnung

Die Kennzeichnung der Laserschutzbrillen erfolgt gemäß EN 207 nach folgendem Schema:



Betriebsarten (Abkürzungen)

D	Dauerstrich	ab 0,1 s
I	Impuls laser	10^{-7} bis $5 \cdot 10^{-4}$ s Pulsdauer
R	Riesenimpuls laser (Q-switch)	10^{-9} bis 10^{-7} s Pulsdauer
M	Modengekoppelte Laser	$< 10^{-9}$ s Pulsdauer

Es werden alle Betriebsarten angegeben, für die die Brille geprüft ist. Jede Brille muss auf alle Fälle für den Dauerstrichbetrieb geprüft sein. Ist keine Betriebsart angeführt, gilt die Schutzstufe für Dauerstrichlaser.

Wellenlänge

Die Wellenlängenangabe erfolgt in Nanometer – die Abkürzung 'nm' wird jedoch meist nicht angeschrieben. Auch Bereichsangaben, z.B. 600 - 800, oder die Angabe mehrerer Bereiche – auch mit unterschiedlichen Schutzstufen – sind möglich. Die Wellenlänge des verwendeten Lasers muss in den angegebenen Wellenlängenbereichen der Laserschutzbrille wiederzufinden sein, ansonsten ist kein Schutz gewährleistet!

Schutzstufe

Die Schutzstufe wird mit dem Buchstaben „L“ gekennzeichnet und kann die Werte 1 bis 10 einnehmen. Meistens entspricht die Schutzstufe L der optischen Dichte OD.

Hersteller- und Normzeichen sind Zusatzinformation, die für Sicherheitsbetrachtung irrelevant sind. In Europa verkaufte Laserschutzbrillen müssen natürlich darüber hinaus das CE-Zeichen tragen.

11.4.1.1 Justierbrillen

Beim Arbeiten mit sichtbarer Laserstrahlung kann es notwendig sein, den Laserstrahl ausreichend gut zu sehen. Bei Laserschutzbrillen ist dies oft nicht möglich, da die optische Dichte dafür üblicherweise zu hoch ist. Zu diesem Zweck werden Justierbrillen angeboten. Die Anforderungen für Laserjustierbrillen sind in der Norm EN 208 niedergelegt. Die Kennzeichnung weist neben der maximal erlaubten

Leistung in Watt bzw. der Energie pro Puls in Joule auch die Schutzstufe auf. Die Schutzstufe des Filters wird mit 'R' gekennzeichnet, z. B. 0,01 W 2.10 6J 670 R1 W DIN . Zusätzlich muss die Brille den Wortlaut „Laserjustierbrille“ tragen.

Laserjustierbrillen sind nur zum Beobachten von diffusen Reflexionen, nicht zum Blick in den Laserstrahl konzipiert, da man von einer unabsichtlichen Bestrahlung ausgeht.

11.4.1.2 Fenster

Sichtfenster oder Abschirmungen müssen der Bestrahlung bei der erwarteten Bestrahlungsdauer standhalten. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass Glas für Wellenlängen $\lambda > 4 \mu\text{m}$ absorbierend wirken. Für entsprechend hohe Strahlleistungen sind daher einfache Glasfenster nicht geeignet, da die thermisch induzierten Spannungen das Fenster zum Zerspringen bringen können. Für Wellenlängen kleiner als $4 \mu\text{m}$, wie z.B. im Fall des Nd:YAG Lasers, kann sich der NOHD-Bereich aufgrund von Sichtfenstern, z.B. in Türen, bis in die angrenzenden Räume erstrecken. Aus diesem Grund sind Glasfenster während der Laseranwendung von innen mit (für die benutzte Wellenlänge) undurchsichtigem Material abzudecken.

**Nie in den
Laserstrahl
blicken!**

11 Manche Brillenhersteller geben sowohl die optische Dichte als auch die Schutzstufe an.

12 Die Angabe der Energie von 2.10 6J ist als Hochzahl zu interpretieren und bedeutet $2 \mu\text{J}$.

12 Richtlinien, Gesetze und Normen

EU-Richtlinien

Ein Hauptziel der Europäischen Gemeinschaft war und ist es, einen „Binnenmarkt“ in Europa zu verwirklichen. Dafür war es notwendig, nationale Gesetzgebungen EU-weit anzugleichen, damit keine einzelstaatliche Gesetzgebung den freien Verkehr von Waren behindert. Zu diesem Zweck wurden EU-Richtlinien (im Folgenden RL abgekürzt) erlassen. Die EU-Mitgliedsländer sind verpflichtet, den Inhalt dieser EU-RL in nationales Recht umzusetzen. Beispiele dafür sind:

Tabelle 7: EU-Richtlinie und korrespondierende Gesetze

Richtlinie	RL-Nummer	Gesetz
Niederspannungs-RL	2006/95/EG	Niederspannungsverordnung
Maschinen-RL	98/37/EG	Maschinensicherheitsverordnung
Medizinprodukte-RL	93/42/EWG	Medizinproduktegesetz
.....		

Die RL enthalten nur sehr allgemeine und grundlegende Anforderungen. In Ergänzung werden daher **harmonisierte Normen** erstellt, die technische Detailangaben zur Erfüllung dieser allgemeinen Anforderungen enthalten. Technische Normen sind jedoch keine Gesetze! Die Anwendung von Normen ist prinzipiell freiwillig und sie sind als Hilfsmittel anzusehen, um die Anforderungen der Richtlinien/Verordnungen zu erfüllen.

Dem Hersteller bleibt es in den meisten Fällen nicht erspart,

über die harmonisierte Norm hinauszugehen und eine Risikoanalyse zu betreiben. Diese Risikoanalyse dient zur Feststellung der möglichen Gefahren, die vom Produkt ausgehen und wird also solche erwartet bzw. von den Binnenmarkt-RL gefordert.

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die wichtigsten Normen bezüglich Lasersicherheit aufgelistet.

Tabelle 8: Liste harmonisierter Normen für Hersteller

Norm	Titel
ÖVE/ÖNORM EN 60825-1	Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien.
ÖVE/ÖNORM EN 60825-2	Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 2: Sicherheit von Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen.
ÖNORM EN 60825-4	Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 4: Laserschutzwände.
ÖNORM EN ISO 11553-1	Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Sicherheitsanforderungen.
ÖNORM EN 12254/A1	Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung.
ÖNORM EN ISO 11252	Laser und Laseranlagen, Lasergerät; Mindestanforderungen an die Dokumentation.
ÖNORM EN 207	Persönlicher Augenschutz – Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen).
ÖNORM EN 208	Persönlicher Augenschutz – Augenschutzgeräte für Justierarbeiten an Lasern und Laseraufbauten (Laser – Justierbrillen).

ÖVE EN 60601-2-22	Medizinische elektrische Geräte, Teil 2: Besondere Festlegungen für die Sicherheit von diagnostischen und therapeutischen Lasergeräten.
DIN EN ISO 10079-1:	Medizinische Absauggeräte, Teil 1: elektrisch betriebene Absauggeräte - Sicherheitsanforderungen.
ÖNORM EN ISO 11810-1 und -2	Laser und Laseranlagen - Prüfverfahren und Einstufung zur Laserresistenz von Operationstüchern und/oder anderen Abdeckungen zum Schutz des Patienten.
EN ISO 11990	Optik und optische Instrumente – Laser und Laseranlagen – Bestimmung der Laserresistenz des Schaftes von Trachealtuben.
ÖNORM EN ISO 14408	Trachealtuben für die Laserchirurgie - Anforderungen an die Kennzeichnung und die begleitenden Informationen.

Tabelle 9: Normen und AUVA-Merkblätter für den Anwender

ÖNORM S 1105	Strahlenschutztechnische Anforderungen bei der Erzeugung von Lichteffekten mittels Laserstrahlung vor Publikum oder bei der Vorführung von Laser- Einrichtungen.
ÖNORM S 1100	Anforderungen an die Ausbildung von geprüften Laserschutzbeauftragten für bestimmte Laser- anwendungsarten.
ONR 1960825-8	Richtlinie für die sichere Anwendung von medizini- schen Lasergeräten.
IEC TR 60825-14	Safety of laser products – part 14: A user's guide.

ISO/TR 11991	Guidance on airway management during laser surgery of upper airway.
Merkblatt M 140	Medizinische Anwendungen des Lasers.
Merkblatt M 081	Lasersicherheit Teil 3: Optischer Richtfunk.
Merkblatt M 082	Lasersicherheit Teil 2: Lichtwellenleiter- kommunikationssysteme. (LWLKS)

Gesetzlicher Rahmen

Grundsätzlich haben Normen keinen gesetzlichen Charakter, sondern gelten als Mindeststandard der Technik. Normen können aber in Gesetzen und Verordnungen genannt werden, wodurch die Normanforderungen verbindlich werden. Zur Zeit gibt es in Österreich keine Gesetze bzw. keine Verordnungen, die die Lasersicherheit direkt betreffen (Ausnahme: Laserpointer - BGBl. II Nr. 321/1999, und Laserwaffe - BGBl. I Nr. 4/1998), jedoch regeln mehrere Gesetze/-Verordnungen die Arbeitssicherheit (ASchG, Arbeitsmittelverordnung, ...).

Es sei in diesem Zusammenhang betont, dass der Aspekt der Schutzmaßnahmen für den Anwender rechtlich nur für professionelle Anwendungen (im Rahmen des ArbeitnehmerInnenschutzgesetzes) geregelt ist, für private Anwender gibt es keine entsprechende gesetzliche Regelung.

CE-Kennzeichnung

Es dürfen nur Produkte in Verkehr gebracht werden, die die Anforderungen aller RL, die auf das Produkt anzuwenden sind, erfüllen. Erst danach darf der Hersteller das CE-Zeichen anbringen und die Konformitätserklärung ausstellen. Mit dem CE-Zeichen wird Marktüberwachungsbehörden gegenüber angezeigt, dass das Produkt den anzuwendenden RL entspricht.

Status der Normen

Es sei darauf hingewiesen, dass die Produktsicherheits-RL keine CE-Kennzeichnung vorsieht, obwohl sie für den freien Warenverkehr sicherlich eine wichtige Rolle spielt. Sie ist gewissermaßen eine Auffang-RL für Verbraucherprodukte, wenn es keine passende RL gibt und deckt z.B. Laserpointer ab.

Auswirkung auf Laserprodukte

Die Norm ÖVE/ÖNORM EN 60825-1 gibt minimale technische Schutzmaßnahmen vor, die der Hersteller integrieren muss. Die korrekte Klassifizierung eines Laserproduktes macht den Laser in seiner Anwendung jedoch nicht automatisch „sicher“. Ein Laser der Klasse 4 bleibt potenziell gefährlich. Erst weitere Schutzmaßnahmen, wie geeignete Abschirmungen oder eine Zugangsregelung, machen den Laser **sicher im Normalbetrieb**. Diese zusätzlichen Schutzmaßnahmen sind zum Teil auch vom Anwender zu realisieren.

Ziel ist es aber nicht, für alle Lasergeräte/-produkte/-einrichtungen die Laserklasse 1 zu erreichen – die Anwendung im Normalbetrieb muss sicher sein. Daher ist der Umkehrschluss, alle Lasereinrichtungen der Klasse 3B oder 4 seien gefährlich, nicht zulässig.

ANHANG A

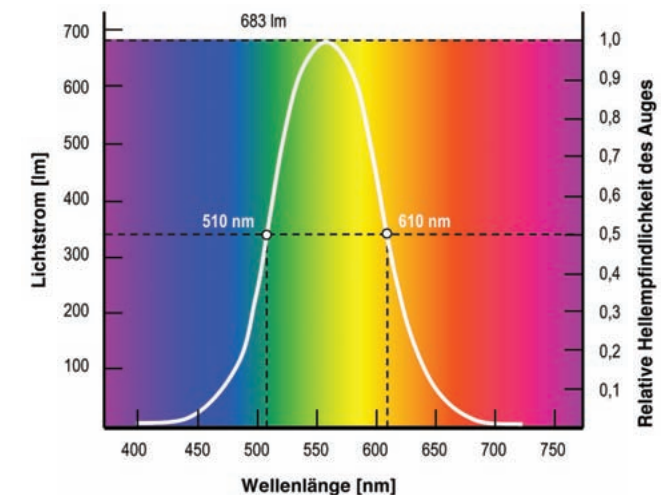
Sichtbares Licht

Licht ist ein kleiner Teil des elektromagnetischen Spektrums, der vom menschlichen Auge wahrgenommen werden kann. Welche Strahlung tatsächlich „sichtbar“ ist, hängt vom einzelnen Menschen ab. Der sichtbare Bereich muss daher definiert werden. Dazu existieren zwei verschiedene Definitionen:

- Definition gemäß CIE*: 380 nm – 780 nm
- Definition gemäß IEC**: 400 nm – 700 nm
(diese Definition wird im Rahmen der Lasersicherheit angewandt.)

Zudem wird nicht jede Farbe als gleich hell empfunden. Grünes Licht wird z.B. etwa 10 Mal heller empfunden als rotes Licht bei gleicher Leistung. Dazu wurden viele Versuche mit Testpersonen durchgeführt, um eine Hellempfindlichkeitskurve zu erhalten, die in weiterer Folge normiert wurde. In Deutschland wurde sie unter DIN 5031 veröffentlicht – siehe Abbildung A.

Abbildung A:
normierte spektrale Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ für das Tagsehen gemäß DIN 5031. Für das Nachtsehen ist diese Kurve um etwa 50 nm in Richtung blauer Bereich parallel verschoben.



**Zwei
Definitionen**

11 Commission Internationale de l'Éclairage, die internationale Beleuchtungskommission
12 International Electrotechnical Commission

Die fotometrische Einheit für den Lichtstrom ist das Lumen (lm). Der Lichtstrom ist ein Maß für die empfundene, gesamte abgestrahlte sichtbare Strahlung, d.h. es wird die Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigt. Der Lichtstrom entspricht der Strahlungsleistung bzw. -fluss in der Radiometrie. Das Verhältnis der physiologischen Größe Lichtstrom zum physikalischen (radiometrischen) Strahlungsfluss wird als fotometrisches Strahlungsäquivalent $K(\lambda)$ bezeichnet. Der Maximalwert liegt bei der Wellenlänge $\lambda = 555 \text{ nm}$, wird als K_m bezeichnet und hat einen Wert von 683 Lumen/Watt (1725 lm/W für das Nachsehen). Das bedeutet, dass eine einfarbige Lichtquelle, die bei $\lambda = 555 \text{ nm}$ eine physikalische Strahlungsleistung von 1 Watt abstrahlt, einen Lichtstrom von 683 Lumen erzeugt.

Mathematisch gesehen ergibt sich der gesamte Strahlungsfluss ϕ aus dem mit der $V(\lambda)$ -Kurve gewichteten spektralen Strahlungsfluss $d\phi(\lambda)/d\lambda$:

$$\phi = K_m \cdot \int_0^\infty \frac{d\phi(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

ANHANG B

TEM-Moden

Die Abkürzung „TEM“ steht für „transversal elektromagnetisch“. Diese Bezeichnung weist darauf hin, dass die Natur der betrachteten Welle elektromagnetisch ist und der Feldvektor der elektrischen Feldstärke quer – d.h. transversal – zur Ausbreitungsrichtung schwingt. (Der elektrische Feldvektor wird als Bezugsgröße verwendet).

Bei Lasern mit zylindrischer Symmetrie werden drei Indizes verwendet, um die TEM-Moden zu bezeichnen: $TEM_{p,q}$, wobei p die Anzahl der Nullstellen in radialer Richtung und l die Anzahl der Nullstellen entlang des Umfangs angibt.

Mit q wird das longitudinale Feld beschrieben; der Index q wird jedoch nicht angeschrieben, da nur der Strahlquerschnitt betrachtet wird. Abbildung B zeigt ein paar Moden-Beispiele.

Bei Lasern mit rechteckiger Symmetrie bilden sich Moden mit rechteckiger Form aus. Die Moden werden mit TEM_{mn} bezeichnet, wobei m die Anzahl der Nullstellen in horizontaler Richtung (x) und n die Anzahl der Nullstellen in vertikaler Richtung (y) angibt.

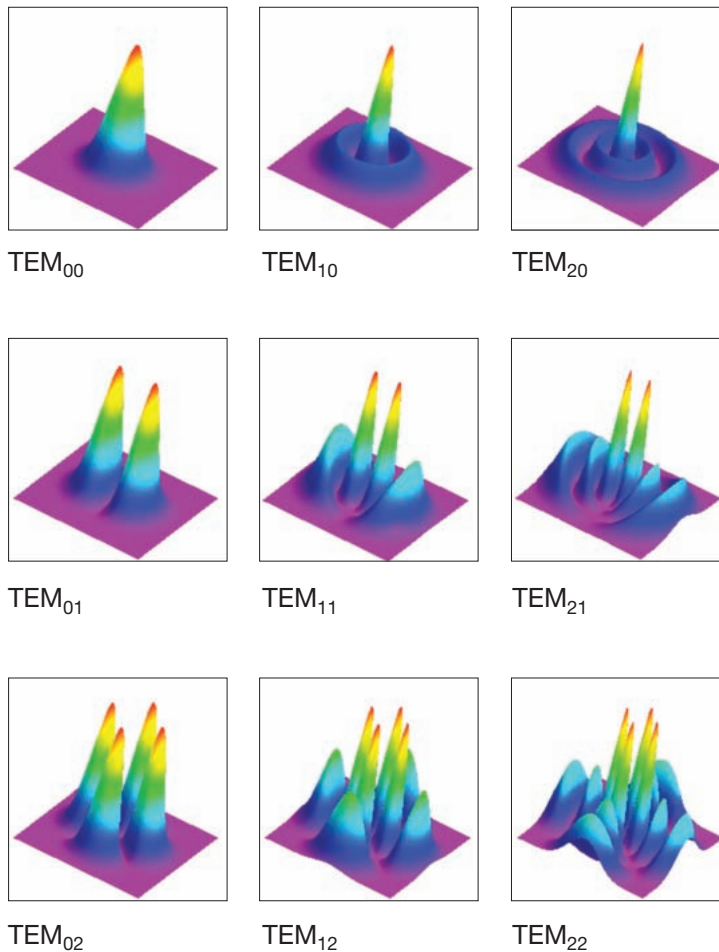


Abbildung B: Beispiele für verschiedene (rotations-symmetrische) TEM_{pl}-Moden.

Diese Broschüre entstand in Zusammenarbeit von



und



Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Helmut Brusl

Tel.: +43 1 33 111-533

E-Mail: helmut.brusl@auva.at

Dr. Karl Schulmeister

Laser und optische Strahlung

Austrian Research Centers GmbH - ARC

Forschungszentrum: 2444 Seibersdorf, Austria

Tel.: +43 (0) 50 550-2533

E-Mail: karl.schulmeister@arcs.ac.at

Autor

Dr. Georg Vees

Laser und optische Strahlung

Austrian Research Centers GmbH - ARC

Forschungszentrum: 2444 Seibersdorf, Austria

Tel.: +43 (0) 50 550-2531

E-Mail: georg.vees@arcs.ac.at