



Damit nichts ins Auge geht ...

Schutz vor Laserstrahlung



Damit nichts ins Auge geht ...

Schutz vor Laserstrahlung

Inhalt

- 3 **Umgang mit Lasern – aber sicher!**
- 4 **Was ist Laserstrahlung?**
- 6 **Laseranwendungen**
- 8 **Wirkung auf den Menschen**
- 9 Gefährdung des Auges
- 10 Gefährdung der Haut
- 10 Weitere Gefährdungen
- 12 **Laserklassen**
- 14 Schutzmaßnahmen
- 16 **Schutz vor Laserstrahlung**
- 16 Laser im privaten Bereich
- 16 Laser im Arbeitsumfeld
- 17 **Untersuchungen zum Lidschlussreflex und zu Abwendungsreaktionen
des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung**
- 17 Projekt ›Lidschlussreflex‹
- 18 Projekt ›Abwendungsreaktionen‹
- 22 Auswirkungen der Untersuchungen zum Lidschlussreflex und zu Abwendungsreaktionen
- 24 **Untersuchungen zur Blendung durch sichtbare Laserstrahlung**
- 27 **Verhaltensregeln beim Umgang mit Lasern**
- 28 Literatur

Umgang mit Lasern – aber sicher!

Lasers sind aus der heutigen Welt nicht mehr wegzudenken. Seit der experimentellen Entwicklung des ersten Lasers durch den amerikanischen Physiker Theodore Maiman im Jahre 1960 haben Laser in Forschung und Medizin, in Industrie und Gewerbe, in der Informations- und Kommunikationstechnik und nicht zuletzt in der Unterhaltung Einzug gehalten. Die Zahl der Beschäftigten, die beruflich mit Lasern zu tun haben, nimmt ständig zu. Aber auch im Privathaushalt finden sich immer mehr Laser. Laserdrucker, CD- und DVD-Player werden seit Jahren benutzt, aber auch Laserentfernungsmesser und -nivelliergeräte gehören mittlerweile zum »Arsenal« vieler Heimwerker. Laserpointer stecken in mancher Schultasche und werden leider nicht nur als moderner Zeigestock benutzt. Mit der Verbreitung von Laseranwendungen wird es für Profis wie Privatanwender immer wichtiger, über den sicheren Umgang mit Lasern umfassend informiert zu sein.

Neben allgemeinen Informationen über Laserstrahlung, Anwendungen von Lasern und deren Wirkung auf den Menschen enthält diese Broschüre die derzeit gültige Laserklassifizierung. Die Klassifizierung gibt den Benutzern wichtige Informationen über mögliche Gefährdungen und Schutzmaßnahmen.

Im zweiten Teil dieser Broschüre werden einige von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) initiierte Forschungsprojekte vorgestellt. In den ersten zwei Projekten wurde untersucht, inwieweit der Mensch durch seine natürlichen Reflexe und Reaktionen beim Umgang mit Lasern geringer Leistung geschützt ist. Im dritten Projekt wurden durch Blendung verursachte Störungen des Sehvermögens untersucht. Die Untersuchungen zu Lidschlussreflex, Abwendungsreaktionen und Blendung wurden im Auftrag der BAuA an der Fachhochschule Köln, Forschungsbereich Medizintechnik und Nicht-ionisierende Strahlung, unter der Leitung von Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach durchgeführt. Sie leisten einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit beim Umgang mit Lasern.

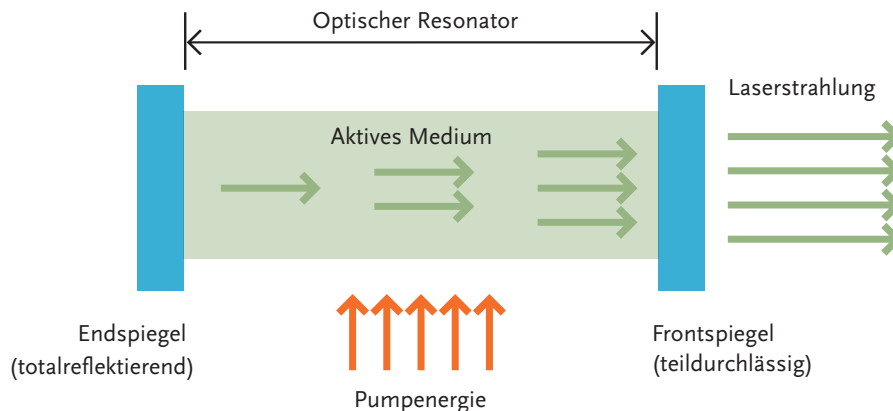
Was ist Laserstrahlung?

¹ Atome, Moleküle oder Ionen; der Kürze halber wird im Folgenden nur von Atomen gesprochen.

Das Wort **Laser** ist ein Akronym und setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der englischen Bezeichnung **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation zusammen, zu Deutsch: ›Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung‹. Dies beschreibt einen physikalischen Vorgang, der zur Erzeugung von Laserstrahlung führt. Dabei werden im ersten Schritt Atome¹ eines Lasermediums (›aktives Medium‹) durch Energiezufuhr angeregt. Diesen Vorgang bezeichnet man als ›Pumpen‹ (Abbildung 1). Als aktives Medium können Gase, Festkörper oder Flüssigkeiten verwendet

werden. Die Energiezufuhr kann, je nach aktivem Medium, durch elektrische Gasentladungen, Blitzlampen, eine angelegte Spannung oder einen anderen Laser erfolgen. Die angeregten Atome geben Lichtteilchen (Photonen) ab und kehren dabei wieder in den nicht angeregten Zustand zurück. Treffen diese Photonen auf andere Atome im angeregten Zustand, so können diese ebenfalls Photonen abgeben, die mit den aufgetroffenen Photonen in Wellenlänge, Phase und Richtung übereinstimmen. Dieser als ›stimulierte Emission‹ bezeichnete Vorgang läuft in einem optischen

Abbildung 1
Das Prinzip eines Lasers



Resonator ab. Solch ein Resonator ist z. B. ein Rohr, an dessen beiden Enden ein Spiegel die Strahlung reflektiert. Diese durchläuft so mehrmals das aktive Medium und regt bei jedem Durchgang weitere Atome zur Abgabe von Photonen an. Einer der beiden Spiegel ist teildurchlässig, so dass ein Teil der Strahlung ausgekoppelt werden kann.

Die Laserstrahlung unterscheidet sich von der Strahlung anderer künstlicher Strahlungsquellen, wie z. B. Glühlampen oder Licht emittierenden Dioden (LED), im Wesentlichen durch die folgenden Eigenschaften:

- **Kohärenz:** die Wellen besitzen eine konstante Phasendifferenz, sie sind zeitlich und räumlich zusammenhängend,
- **Monochromasie:** die Laserstrahlung weist exakt eine Wellenlänge auf,
- **Parallelität:** der Laserstrahl weist eine äußerst geringe Divergenz auf.

In der Praxis bedeutet dies: Laserstrahlen lassen sich sehr stark bündeln. Es ist kein Problem, sie auf kleinste Räume zu fokussieren. Das wird zum Beispiel im CD-Player ausgenutzt, um die mikroskopisch kleinen Strukturen auf der CD auszulesen. Gleichzeitig lassen sich mit Laserstrahlen aber auch enorme Energien auf einen Punkt bündeln, um z. B. Werkstoffe sehr präzise zu schneiden.

Heutige Laser werden für verschiedenartige Zwecke eingesetzt und unterscheiden sich daher in ihrem Aufbau. Die Wellenlängen reichen vom ultravioletten Bereich (UV-Bereich) über die sichtbare optische Strahlung (Licht) bis hin zum Infrarotbereich (IR-Bereich, Tabelle 1). Je nach dem verwendeten aktiven Medium gibt es verschiedene Laser-Typen: Gas-, Festkörper- oder Flüssigkeits-

bzw. Farbstofflaser (Tabelle 2). Man kann Laser auch danach unterteilen, ob sie die Strahlung kontinuierlich aussenden oder gepulst arbeiten. Laser, die mit einer Strahlungsdauer von mehr als 0,25 Sekunden strahlen, werden als Dauerstrichlaser bezeichnet. Gepulste Laser senden z. B. in regelmäßigen Zeitabständen Strahlungsimpulse aus, die eine Dauer im Bereich von Femtosekunden bis 0,25 Sekunden haben können.

Tabelle 1
Wellenlängenbereiche
der optischen Strahlung

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

Vorsatz	Wert	Abkürzung
Femto	10^{-15}	f
Piko	10^{-12}	p
Nano	10^{-9}	n
Mikro	10^{-6}	μ
Mega	10^6	M
Giga	10^9	G
Tera	10^{12}	T

Dezimalvorsätze, die in dieser Broschüre verwendet werden

Lasieranwendungen

Lasere finden heute in vielen beruflichen Bereichen Anwendung (Tabelle 2). Schnelle Datenübertragung per optischen Wellenleiter (auch Lichtleiter genannt) wäre ohne Laser ebenso wenig vorstellbar wie die Speicherung immer größerer Datenmengen auf CD-ROM und DVD. In der Forschung werden Laser z. B. in den verschiedenen spektroskopischen Verfahren oder in der Dünnschichttechnologie verwendet. Laser sorgen in der Materialbearbeitung für höchste Präzision beim Schneiden, Bohren, Schweißen und Lötten von Werkstücken. In der Mess- und Prüftechnik werden sie für hochgenaues, berührungsloses Messen eingesetzt, etwa bei der Messung von Entfernungen, Geschwindigkeiten, Materialdicken und Oberflächenprofilen. Dies hilft unter anderem beim Tunnelbau, wo mit Hilfe des Lasers ein exakter Tunnelvortrieb oder das genaue Aufeinandertreffen zweier Tunnelröhren kein Problem mehr ist. Laserlicht wird auch zur Herstellung von Hologrammen etwa auf EC- und Kreditkarten sowie in den Strichcode-Lesegeräten an den Kassen der Supermärkte eingesetzt.

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich von Lasern ist die Medizin. Diagnostik und Therapie haben dadurch in vielen Bereichen profitiert. Beispielsweise werden Laser bei der Zertrümmerung von Nieren- und Gallensteinen oder in der Chirurgie

als Skalpell benutzt. Auch bei der Korrektur von Fehlsichtigkeit und bei der Entfernung von Pigmentflecken und Narben leisten Laser gute Dienste.

Natürlich ist der Laser auch Bestandteil vieler Geräte im privaten Bereich: CD- und DVD-Player, Laserdrucker und Scanner, Laserwasserwaage und Laserentfernungsmesser sind heute eher die Regel als die Ausnahme. In Diskotheken und Bühnenshows sorgen Laser für tolle Lichteffekte. Dass aber die schöne neue Laserwelt auch ihre Schattenseiten hat, wenn Laser unsachgemäß verwendet werden, zeigt sich, wenn Jugendliche sich und andere mit Laserpointern anstrahlen, dabei blenden und eventuell sogar das Augenlicht gefährden. Gefährdungen gehen auch von falsch klassifizierten Lasern aus!

Tabelle 2
Lasertypen mit Anwendungs-
beispielen

Lasertyp	Aktives Medium	Wichtigste Wellenlängen	Anwendungsbeispiele
Gaslaser	Helium-Neon (He:Ne)	632,8 nm	Messtechnik
	Argon (Ar ⁺)	488 nm, 514,5 nm	Medizin, Spektroskopie, Messtechnik, Holographie
	Kohlendioxid (CO ₂)	10,6 μm	Materialbearbeitung, Medizin
Festkörperlaser	Rubin (Cr ³⁺ :Al ₂ O ₃)	694,3 nm	Medizin
	Neodym: Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG)	1064 nm	Materialbearbeitung, Medizin
	Halbleiter (z.B. Gallium-Aluminium-Arsenid (GaAlAs) und andere Laserdioden)	660 nm – 1550 nm	Optische Datenübertragung, Optische Plattenspeicher (CD-ROM, DVD), Laserdrucker, Medizin
Flüssigkeitslaser	Farbstoffe	einstellbar von UV- bis IR-Bereich	Medizin, Spektroskopie

Wirkung auf den Menschen

² Als Bestrahlungsstärke bezeichnet man die Strahlungsleistung pro Flächeneinheit, d.h. die Leistungsdichte.

Laserstrahlung und Strahlung aus konventionellen optischen Strahlungsquellen unterscheiden sich nicht grundsätzlich in ihren biologischen Wirkungen. Den Unterschied macht die starke Bündelung der Laserstrahlung. Durch sie können hohe Bestrahlungsstärken² erreicht werden. Die Folge können verschiedene Gewebeveränderungen sein. Dabei ist die Wirkung der Laserstrahlung auf biologisches Gewebe abhängig von dessen optischen Eigenschaften, also seinem Absorptions-, Reflexions- und Streuvermögen. Aber auch Wellenlänge, Bestrahlungsstärke und Bestrahlungsdauer entscheiden über die Wirkung auf das bestrahlte Gewebe.

Die Abhängigkeit der Absorption von der Wellenlänge hängt mit den unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Gewebebestandteile zusammen. Biologisches Gewebe enthält in der Regel sehr viel Wasser, das die optische Strahlung am stärksten im fernen IR-Bereich (IR-B und IR-C) absorbiert. Im UV-, sichtbaren und nahen IR-Bereich (IR-A) wird die Absorption dagegen durch die biologischen Moleküle Hämoglobin (Blutfarbstoff, der die Atmung und die Stoffwechselforgänge regelt) bzw. Melanin (Farbpigment, das für die Bräunung der Haut verantwortlich ist) ermöglicht.

Vornehmlich bei einer relativ langen Bestrahlungsdauer im Minutenbereich sowie geringen

Bestrahlungsstärken ($< 50 \text{ mW/cm}^2$) können photochemische Wirkungen im Gewebe ausgelöst werden. Bestimmte biologische Moleküle absorbieren dabei die auftreffende Laserstrahlung, werden dadurch angeregt und geben ihre Energie z. B. an Sauerstoff-Moleküle ab, wodurch hochreaktive Radikale entstehen, die die Erbsubstanz Desoxyribonukleinsäure (DNS) schädigen können. Laserstrahlung im UV-Bereich kann auch eine direkte Schädigung der DNS hervorrufen. Derartige Schädigungen der DNS können krebsauslösend wirken.

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

Bei weiter erhöhter Bestrahlungsstärke bis 1 GW/cm^2 und Verkürzung der Impulsdauer auf Mikro- bis Nanosekunden »verdampft« das Gewebe, es wird praktisch explosionsartig abgetragen (Photoablation). Bei noch weiterer Verkürzung der

Impulsdauer auf Werte im Nano- bis Pikosekunden-Bereich und gleichzeitiger Erhöhung der Bestrahlungsstärken auf 1 TW/cm^2 entsteht Plasma, d. h. freie Elektronen, Ionen und neutrale Atome bzw. Moleküle. Dieser Prozess wird begleitet von einer akustischen Stoßwelle, die sich ausbreitet und das Gewebe mechanisch zerstört. In diesem Fall spricht man von Photodisruption.

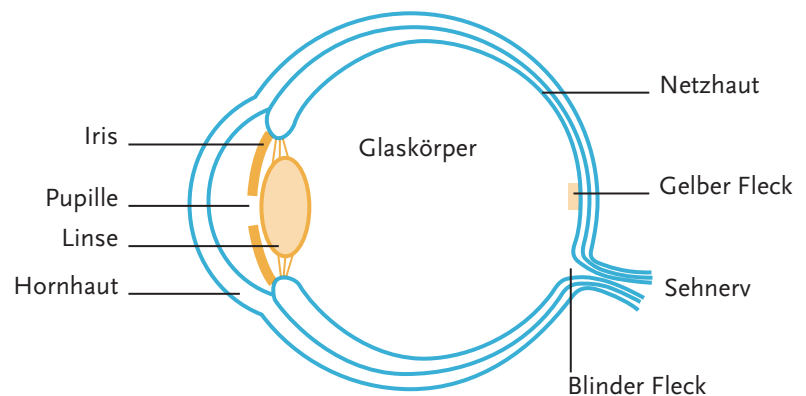
Gefährdung des Auges

Das Auge (Abbildung 2) besitzt die Eigenschaft, Licht – also Strahlung im sichtbaren Bereich – stark zu bündeln. Durch den Linseneffekt des Auges wird die Leistungsdichte auf dem Weg von der Hornhaut zur Netzhaut bis zu etwa 100 000fach verstärkt. Dies erklärt, warum bereits relativ geringe Leistungen für das Auge gefährlich sein können. Schäden an der Netzhaut, wie z. B. Verbrennungen, können zu erheblichen Beeinträchtigungen des Sehvermögens führen. Kleinere Verbrennungen der Netzhaut bleiben meist unbemerkt, soweit sie außerhalb des Flecks des schärfsten Sehens (der gelbe Fleck) liegen, größere geschädigte Stellen können jedoch zu Ausfällen im Gesichtsfeld führen. Darüber hinaus kann es zu Schädigungen der Netzhaut bis hin zu massiven Blutungen kommen. Bei einer Schädigung an der Stelle des schärfsten Sehens, kann das Scharfsehen und das Farbsehvermögen stark verringert werden. Wird gar die Einmündung des Sehnervs in die Netzhaut, der sogenannte blinde Fleck, getroffen, droht die völlige Erblindung.

Das Sehvermögen ist auf den sichtbaren Spektralbereich begrenzt, d. h. diese Strahlung gelangt

durch Hornhaut, Linse und Glaskörper und wird auf der Netzhaut abgebildet. Im Hinblick auf eine potenzielle Augengefährdung muss aber besonders berücksichtigt werden, dass darüber hinaus auch optische Strahlung im nahen IR-Bereich mehr oder weniger stark die Netzhaut erreicht und dort thermische Schädigungen hervorrufen kann. Optische Strahlung im UV- und fernen IR-Bereich wird dagegen bereits von der Hornhaut, Bindehaut und Linse absorbiert und kann somit keine Schädigung auf der Netzhaut hervorrufen. Allerdings können durch UV-Strahlen photochemische Reaktionen ausgelöst werden und zu sehr schmerzhaften Entzündungen der Hornhaut (Photokeratitis) und der Bindehaut (Photokonjunktivitis) führen. Durch hohe Bestrahlungsstärken und wiederholte Einwirkungen über einen längeren Zeitraum können

Abbildung 2
Das Auge



Linsentrübungen (Katarakte) verursacht werden. Im IR-Bereich sind ebenfalls Katarakte möglich, ab einer Wellenlänge von ca. 2 500 nm ist jedoch nur noch die Hornhaut betroffen (Tabelle 3).

Flüssigkeiten) des aktiven Mediums kommt. Da jeder Laser elektrische Energie zum Betrieb benötigt, muss natürlich auch die elektrische Sicherheit beachtet werden.

Gefährdung der Haut

Der Haut fehlt die Eigenschaft, Licht zu bündeln, und sie reflektiert Strahlung stärker als das Auge. Daher ist sie unempfindlicher gegenüber Laserstrahlung. Im sichtbaren und nahen IR-Bereich hat die Haut ein hohes Reflexionsvermögen, im UV- und fernen IR-Bereich absorbiert sie die Strahlung dagegen sehr stark, wobei die Eindringtiefe der Strahlen von der Wellenlänge abhängt. Entsprechend der Eindringtiefe sind Hautschichten unterschiedlich stark betroffen (Tabelle 3).

In Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke können Hautrötungen (Erythem), Verbrennungen, starke Blasenbildung und spätere Vernarbung die Folge sein.

Weitere Gefährdungen

Neben der Gefährdung von Auge und Haut können durch Laserstrahlung weitere Gefährdungen hervorgerufen werden. Brand- und Explosionsgefahr drohen immer dann, wenn die Strahlung auf brennbares Material oder eine explosionsfähige Atmosphäre trifft. Bei der Materialbearbeitung können gesundheitsschädliche Materialzersetzungsprodukte in Dämpfen sowie schädigende UV-Strahlung entstehen. Aber auch die Technik des Lasers selbst kann zu Gefährdungen führen, wenn es z. B. zum Kontakt mit toxischen Stoffen (Gase,

Wellenlängenbereich	Auge	Haut
Ultraviolett C	Photokeratitis Photokonjunktivitis	Erythem Präkanzerosen Karzinome
Ultraviolett B	Photokeratitis Photokonjunktivitis Katarakt	Verstärkte Pigmentierung (Spätpigmentierung) Erythem Präkanzerosen Karzinome
Ultraviolett A	Katarakt	Bräunung (Sofortpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Verbrennung der Haut Karzinome
Sichtbare optische Strahlung	Photochemische und photothermische Schädigung der Netzhaut	Photosensitive Reaktionen Verbrennung der Haut
Infrarot A	Katarakt Verbrennung der Netzhaut	Verbrennung der Haut
Infrarot B	Katarakt Verbrennung der Hornhaut	Verbrennung der Haut
Infrarot C	Verbrennung der Hornhaut	Verbrennung der Haut

Tabelle 3
Mögliche Auswirkungen
der Laserstrahlung auf
Auge und Haut

Laserklassen

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

Welcher Klasse gehört ein Laser an? Um dies zu beurteilen, gilt es zwei Grenzwerte zu beachten. Die »maximal zulässige Bestrahlung« (MZB) stellt einen Grenzwert für die Höhe der Laserbestrahlung dar, der Menschen unter normalen Umständen ausgesetzt werden dürfen, ohne dass schädliche Folgen eintreten. Die MZB-Werte sind abhängig von der Art der exponierten Organe (Auge oder Haut), von der Wellenlänge, der Expositionsdauer und, im Falle des Auges, von der Größe des Bildes auf der Netzhaut. Mit »zugänglicher Strahlung« bezeichnet man die Strahlung, die den Laser verlässt und in einen Bereich gelangt, in dem sie auf Menschen treffen kann. Der »Grenzwert zugäng-

licher Strahlung« (GZS) ist der maximale Wert zugänglicher Strahlung, der innerhalb einer bestimmten Laserklasse zugelassen ist. Über den GZS lässt sich abschätzen, ob die MZB-Werte für Auge oder Haut eingehalten oder bei welcher Bestrahlungsdauer sie überschritten werden können.

In der internationalen Lasernorm IEC 60825-1 aus dem Jahr 2001, die unverändert in die europäische Norm EN 60825-1 und damit auch in die nationale deutsche Norm DIN EN 60825-1 (VDE 0837 Teil 1):2001-11 übernommen wurde, sind die damaligen Laserklassen 1, 2, 3A, 3B und 4 neu geordnet worden. Die neue Einteilung sieht sieben Laserklassen vor – 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B und 4 –, d. h. es wurden drei neue Laserklassen (1M, 2M und 3R) eingeführt sowie eine, die Laserklasse 3A, herausgenommen. Die genauen Definitionen sind in der Norm DIN EN 60825-1 (die neueste Ausgabe erfolgte im Mai 2008) zu finden (siehe auch die Durchführungsanweisungen zur Unfallverhütungsvorschrift BGV B 2 »Laserstrahlung« [2007]).

Klasse 1 Die zugängliche Laserstrahlung ist unter vernünftigerweise vorhersehbarer Bedingungen ungefährlich. Diese Laser verursachen auch bei längerer Bestrahlung keine Schäden am Auge, selbst dann nicht, wenn optische Instrumente

(Lupen, Linsen, Teleskope) in den Strahlengang gehalten werden. Der GZS im sichtbaren Bereich ist wellenlängenabhängig und beträgt von 39 μW im blauen bis 0,39 mW im grünen bis roten Wellenlängenbereich. Klasse 1 umfasst auch Laser mit einem höheren GZS, die aber voll gekapselt sind, so dass keine gefährliche Strahlung zugänglich ist, wie z. B. Laser in CD-Playern, Laserdruckern und Scannern.

Klasse 1M Laser der Klasse 1M senden einen zugänglichen Strahl im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 4 000 nm aus, der entweder divergent verläuft oder aufgeweitet ist. Die zugängliche Laserstrahlung ist für das Auge ungefährlich, solange der Strahlquerschnitt nicht durch optische Instrumente verkleinert wird. Dadurch unterscheidet sich ein Laser der Klasse 1M von einem Laser der Klasse 1. Strichcode-Lesegeräte (Abbildung 3), wie sie an der Supermarktkasse eingesetzt werden, sind Beispiele für die Klasse 1M.

Klasse 2 Die zugängliche Laserstrahlung liegt im sichtbaren Wellenlängenbereich. Sie ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) für das Auge ungefährlich. Dies gilt auch, wenn sich ein optisches Instrument im Strahlengang befindet. Zusätzliche Strahlungsanteile außerhalb des Wellenlängenbereichs von 400 nm bis 700 nm erfüllen die Bedingungen für die Klasse 1. Für Dauerstrichlaser der Klasse 2 beträgt der GZS 1 mW. Beispiele für Laser der Klasse 2 sind Messlaser, die in der Landvermessung eingesetzt werden, Laserwasserwaagen, Lichtschranken und Laserpointer (Abbildung 4).



Abbildung 3
Strichcode-Lesegerät

Foto: Honeywell



Abbildung 4
Laserpointer



Abbildung 5
Nivellierlaser

Foto: Bosch



Abbildung 6
Laserschneidanlage

Foto: TRUMPF Gruppe

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

Klasse 3R Die zugängliche Laserstrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 302,5 nm bis 10^6 nm und ist gefährlich für das Auge. Für Dauerstrichlaser der Klasse 3R beträgt der GZS 5 mW im sichtbaren

Wellenlängenbereich und das Fünffache des GZS der Klasse 1 für andere Wellenlängen. Beispiele für Laser der Klasse 3R sind Ziellaser für militärische Zwecke und Nivellierlaser (Abbildung 5).

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

Klasse 4 Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Die Laserstrahlung kann Brand- und Explosionsgefahr verursachen. Lasereinrichtungen der Klasse 4 sind Hochleistungslaser, die GZS im sichtbaren Wellenlängenbereich von mehr als 500 mW haben. Beispiele hierfür sind Materialbearbeitungslaser (z. B. Laserschweiß- oder Laserschneidanlagen, Abbildung 6), Forschungslaser, Laser für medizinische Anwendungen sowie Show- und Disco-Laser. Fast alle Lasersysteme, die in der medizinischen Therapie für die Koagulation, Vaporisation, Ablation und Disruption von Gewebe eingesetzt werden, gehören zur Klasse 4.

Schutzmaßnahmen

Aufgrund der biologischen Wirkungen der Laserstrahlung sind Gefährdungen nicht auszuschließen. Die notwendigen Schutzmaßnahmen hängen sowohl von der Klasse der Lasereinrichtung als auch

von der Anwendung ab. Möglich sind technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen, wobei die technischen Maßnahmen vorrangig sind, weil sie Gefährdungen für Benutzer und Unbeteiligte von vornherein vermeiden können. Verantwortlich für die Einhaltung der Schutzmaßnahmen ist grundsätzlich der Betreiber der Lasereinrichtung.

Technische Schutzmaßnahmen sind z. B.

- der Einbau eines Schlüsselschalters, um die Nutzung nur berechtigten Personen zu gestatten,
- eine Emissionsanzeige, die deutlich anzeigt, wann der Laser in Betrieb ist,
- eine Überwachungseinrichtung, die den Zugang zum gefährdeten Bereich überwacht,
- eine Abschirmung des Laserbereichs,
- eine regelbare Beleuchtung, z. B. bei Justierarbeiten.

Organisatorische Maßnahmen beinhalten z. B.

- die Unterweisung der Mitarbeiter,
- die Benennung eines Laserschutzbeauftragten (für die Laserklassen 3R, 3B und 4),
- die Reglementierung des Zugangs zum Laserbereich.

Zu den **persönlichen Schutzmaßnahmen** gehören

- Laserschutzbrille,
- Schutzhandschuhe,
- Schutzkleidung.

Schutz vor Laserstrahlung

Laser im privaten Bereich

Im privaten Bereich dürfen nur Laserprodukte der Klassen 1 oder 2 verwendet werden. Das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) erlaubt nämlich nur Produkte in den Verkehr zu bringen, die bei bestimmungsgemäßer Verwendung oder bei vorhersehbarer Fehlanwendung die Sicherheit und Gesundheit von Benutzern oder Dritten nicht gefährden (§ 4 Abs. 1 und 2 GPSG). Laser der Klassen 3R, 3B und 4 dürfen daher im privaten Bereich nicht zum Einsatz kommen. Nähere Informationen sind der ›Technischen Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)‹ (2009) zu entnehmen, die auf Initiative der BAuA nach § 12 Abs. 2 des GPSG entstanden ist und sich an den Hersteller, seine Bevollmächtigten und Einführer richtet.

Laser im Arbeitsumfeld

Die EU-Richtlinie 2006/25/EG über Mindestvorschriften zum Schutz der Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) vom April 2006 definiert Expositionsgrenzwerte, um Unfälle oder kurz- und langfristige

Gesundheitsschäden der Augen und der Haut zu verhindern. Diese Grenzwerte dürfen keinesfalls überschritten werden. Der Arbeitgeber muss eine Bewertung und falls erforderlich eine Messung und/oder Berechnung des Ausmaßes der optischen Strahlung vornehmen. Wird im Rahmen einer Risikobewertung festgestellt, dass die Expositionsgrenzwerte möglicherweise überschritten werden können, muss der Arbeitgeber ein Aktionsprogramm mit technischen und/oder organisatorischen Maßnahmen erarbeiten und umsetzen. Die EU-Richtlinie wurde über eine Verordnung nach § 18 des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) in nationales Recht umgesetzt. Die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV) trat am 27. Juli 2010 in Kraft. Die vom Ausschuss für Betriebsicherheit (ABS) unter Beteiligung des Ausschusses für Arbeitsmedizin (AfAMed) zu erarbeitenden Technischen Regeln konkretisieren im Rahmen ihres Anwendungsbereichs die Anforderungen der OStrV. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind.

Untersuchungen zum Lidschlussreflex und zu Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung

Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen sind ein wichtiger Bestandteil des Sicherheitskonzeptes beim Umgang mit Lasern der Klasse 2 und 2M. Beim Einsatz eines Lasers dieser Klassen, deren Dauerstrichleistung auf 1 mW begrenzt ist, wird ein thermischer Schaden der Netzhaut vermieden, wenn die Bestrahlungsdauer des Laserstrahls auf das Auge kürzer als 0,25 s ist. Es wird vorausgesetzt, dass der Augenschutz durch den Lidschlussreflex gewährleistet ist, da dieser innerhalb von 250 ms erfolgt.

Bereits in den 1950er Jahren haben Geratewohl und Strughold (1953) den menschlichen Lidschlussreflex bei sehr grellen Blitzen, wie sie bei einer Atombombenexplosion auftreten können, untersucht. Bei diesen Experimenten ergab sich ein Mittelwert der Lidschlussreflexzeit von 350 ms, wenn die Probanden nicht direkt in die Lichtquelle blickten. Etwa 19% zeigten dabei jedoch keine Reaktion. In weiteren Experimenten beim direkten Blick in die Lichtquelle verkürzten sich die Zeiten auf Mittelwerte um 180 ms bzw. 255 ms.

Die normative Festlegung für Laserstrahlung auf 250 ms als Lidschlussreflexzeit erfolgte später ohne weitere Untersuchungen und wurde nicht in Frage gestellt, bis die Untersuchungen von Reidenbach und Wagner (1999) mit einem kommerziellen Foto-

blitz zeigten, dass zwischen 10% und 20% der Probanden nicht mit einem Lidschlussreflex auf das Anblitzen reagierten. Die Frage, ob der Lidschlussreflex einen ausreichenden Schutz vor Laserstrahlen eines Lasers der Klasse 2 bietet, konnte ohne entsprechende Untersuchungen nicht beantwortet werden.

Projekt ›Lidschlussreflex‹

Im Forschungsprojekt ›Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes‹ sollte untersucht werden, ob der Lidschlussreflex als ausreichender Schutzmechanismus bei Expositionen durch Laserstrahlung entsprechend der Laserklasse-2-Bedingungen angesehen werden kann. Hierfür wurde ein transportabler Messaufbau realisiert, der sowohl im Labor als auch bei Reihenuntersuchungen in Feldversuchen eingesetzt werden konnte. Bei den Untersuchungen wurde der Laserstrahl über einen Spiegel und eine Linse zentral in das Auge des Probanden gelenkt. Der Kopf der Probanden war durch Kinnauflage und angelegte Stirn fixiert (Abbildung 7).



Abbildung 7
Ein Proband vor dem Messaufbau bei den Lidschlussreflexuntersuchungen.

Im Projekt wurde untersucht, ob die Häufigkeit des Lidschlussreflexes von der Wellenlänge, dem Geschlecht und Alter sowie dem Tragen einer Brille abhängig ist. Es wurde außerdem untersucht, ob eine Abhängigkeit des Lidschlussreflexes von der Fleckgröße des Bildes auf der Netzhaut besteht. Aus diesem Grund wurden auch Untersuchungen mit LED durchgeführt. Weil LED ausgedehnte Quellen sind, ist ein durch LED-Bestrahlung erzielter Fleck auf der Netzhaut erheblich größer als bei der Laserbestrahlung. Zur Fleckgrößenabhängigkeit des Lidschlussreflexes wurden auch Versuche mit einem durch Linsenfokussierung unmittelbar vor der Hornhaut stark divergenten Laserstrahl sowie mit einem aus einem Lichtwellenleiter austretenden Laserstrahl gleicher Wellenlänge und Leistung durchgeführt.

Als Laser wurden ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser (532 nm), ein He:Ne Laser (632,8 nm) sowie zwei Laserdioden, GaAsP:N (635 nm) und GaAlAs (670 nm), verwendet. Bei den zwei verwendeten LED lagen die dominanten Wellenlängen bei 468 nm und 615 nm.

Insgesamt wurden 1 193 Probanden mit Laserstrahlung sowie 261 mit LED bestrahlt. Bei der Laserstrahlung trat nur bei 17% der Probanden der Lidschlussreflex auf; bei LED-Strahlung waren es 23%. Es wurde keine unmittelbare Abhängigkeit von Geschlecht und Alter festgestellt. Ebenso scheint das Tragen einer Brille keinen Einfluss auf das Auftreten des Lidschlussreflexes zu haben. Es ließ sich jedoch eine Abhängigkeit von der Wellenlänge der Laserstrahlung feststellen: Die Häufigkeit des Lidschlussreflexes zeigte einen Anstieg mit abnehmender Wellenlänge im Bereich von 670 nm bis 532 nm.

Bei den Untersuchungen mit LED sowie mit einem divergent austretenden Laserstrahl wurde festgestellt, dass die Häufigkeit des Lidschlussreflexes mit der Fleckgröße auf der Netzhaut zunimmt. Eine mögliche Erklärung könnte darin liegen, dass das größere Bild auf der Netzhaut mehr Sehzellen stimuliert. Ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse bei der LED-Bestrahlung der Netzhaut mit denen der Bestrahlung mit Lasern der Klasse 2 unterstützen diese Erklärung. Das gilt auch für die oben erwähnte Untersuchung von Reidenbach und Wagner (1999), bei der zur Stimulation des Lidschlussreflexes ein konventioneller Fotoblinker benutzt wurde. Dabei fand eine großflächige Stimulation der Sehzellen statt, auf die eine deutlich größere Zahl von Probanden mit dem Lidschlussreflex reagierte.

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

Projekt ›Abwendungsreaktionen‹

Im Folgeprojekt ›Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung‹ sollte geklärt werden, ob die Augensicherheit bei der Exposition durch Laserstrahlung bei Lasern der Klasse 2 über Abwendungsreaktionen gewährleistet ist. Mit Abwendungsreaktionen sind alle natürlichen Reaktionen gemeint, die das Auge vor Gefährdungen durch einen Laser der Klasse 2 innerhalb von 250 ms schützen. Insbesondere geht es dabei

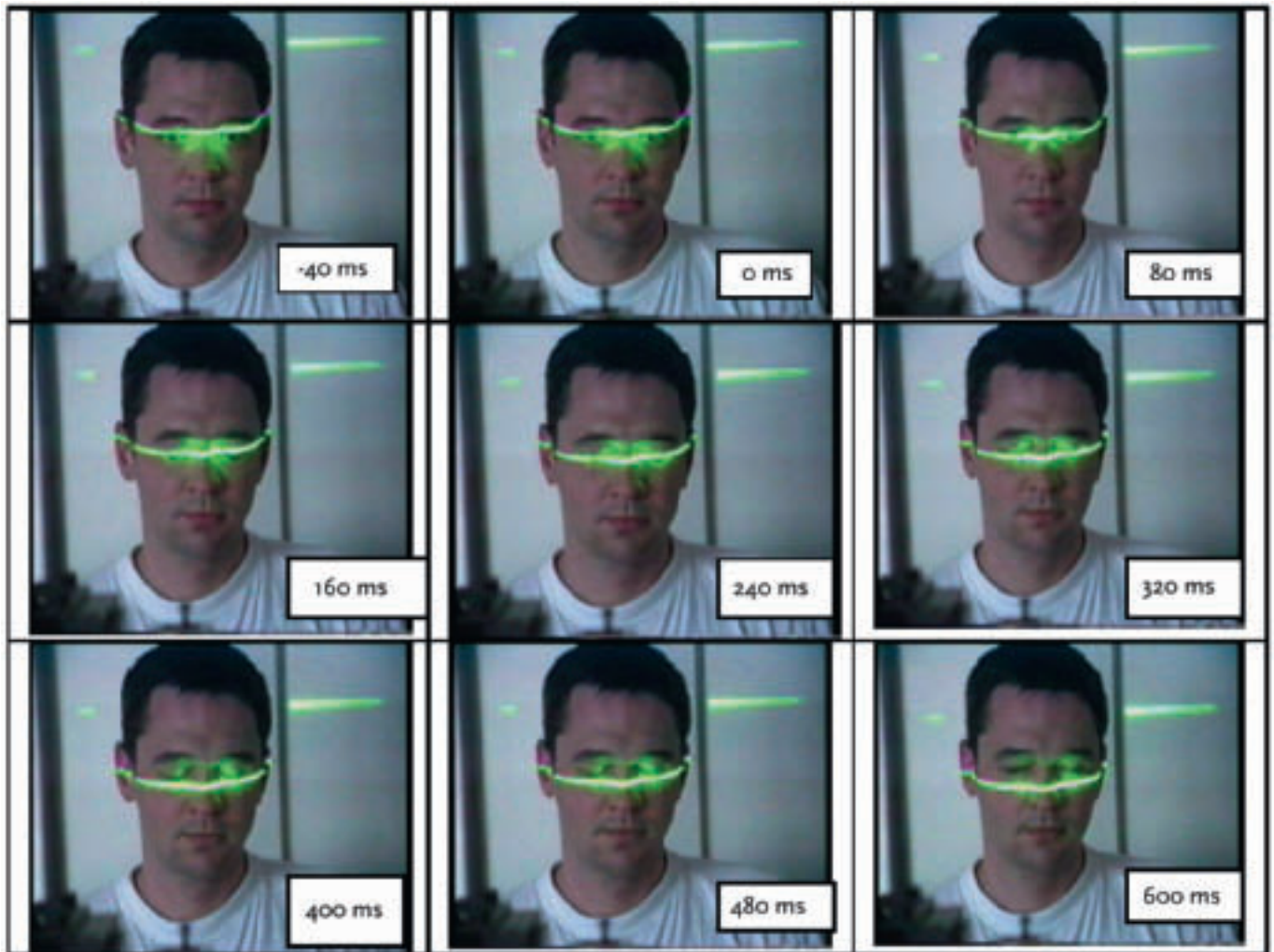


Abbildung 8
 Eine Videobildersequenz bei den Untersuchungen mit dem Laserscanner:
 Beispiel für eine vertikale Scanbewegung der Laserlinie (aus Reidenbach, Hofmann, Dollinger und Ott [2006]).

um Augenbewegungen wie Sakkaden, Augenlidbewegungen, die willkürlich (Lidschluss) oder unwillkürlich (Lidschlussreflex) die Pupille des Auges bedecken, sowie um Kopfbewegungen. Außerdem kann es zum Zucken des Augenlids, d. h. zu einem nicht vollständig ausgeführten Lidschlussreflex kommen. Zur Durchführung der Untersuchungen unter Bedingungen der Laserklasse 2 wurden drei verschiedene Versuchsanordnungen aufgebaut: ein Laserlinien-Scanner, ein Zielsystem mit optischer Bank und Lochblendenjustierung sowie ein Eye-Tracking-System. Anders als bei den Lidschlussreflexuntersuchungen sollte bei diesen Untersuchungen die Bewegung des Kopfes nicht eingeschränkt werden. Die Untersuchungen fanden sowohl im Labor als auch in Reihenuntersuchungen statt und wurden per Videokamera dokumentiert.

Beim Laserlinien-Scanner wurde der Laserstrahl über den Kopf des Probanden gescannt, entweder mit vertikalem oder horizontalem Strahlverlauf (Abbildung 8). Es wurde ein frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser (532 nm) benutzt, da sich bei dieser Wellenlänge die größte Häufigkeit bei den Lidschlussreflexen gezeigt hatte. Beim Zielsystem mit der optischen Bank hatte die Testperson die Aufgabe, durch zwei hintereinander positionierte Lochblenden das Zentrum einer Scheibe »einzustellen«. Als Lichtquelle wurde ein Diodenlaser bei 635 nm benutzt. Beim Eye-Tracking-System sollte die Testperson versuchen, über ihre Kopf- und Augenbewegungen ein grünes Kreuz (Reflex von der Netzhaut des Auges) auf dem Bildschirm mit einem an fester Stelle befindlichen roten Kreuz in Deckung zu bringen. So wurde die Person mit

einer Aufgabe beschäftigt, bei der sie sich konzentrieren musste; diese Situation entsprach derjenigen, die bei Messtätigkeiten vorkommt. In dieser Beschäftigungsphase erfolgte die Exposition durch einen Laserstrahl.

Von insgesamt 2 022 Probanden reagierten 17% beim Auftreffen eines Laserstrahls der Klasse 2 mit einem Lidschlussreflex/Lidschluss. Mit anderen Abwendungsreaktionen reagierten von 829 Probanden nur 6%. Damit haben die Untersuchungen gezeigt, dass Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen keine ausreichende Sicherheit des Auges beim Umgang mit Lasern der Klasse 2 gewährleisten können.

Auch in diesem Projekt wurde noch einmal unter LED-Bedingungen bestätigt, dass die Häufigkeit des Lidschlussreflexes mit der Fleckgröße auf der Netzhaut zunimmt. Die LED kamen sowohl als Einzelelemente als auch als LED-Array zum Einsatz, das aus 80 Einzel-LED bestand und eine blitzlichtähnliche Situation schaffen sollte. Mit 29% lag der Anteil der Lidschlussreflex- bzw. Lidschlussreaktionen deutlich höher als bei der Laserstrahlung. Nur 7% der Probanden zeigten Abwendungsreaktionen.

Ferner wurde in diesem Projekt untersucht, ob eine bewusste, aktive Schutzreaktion in Folge einer zuvor erfolgten Unterweisung den nicht auto-

Abbildung 9
Eine Videosequenz, bei der die Probandin eine aktive Schutzreaktion zeigt (aus Reidenbach, Hofmann, Dollinger und Ott [2006]).



matisch einsetzenden Schutz bei einer Laserklasse-2-Exposition gewährleisten kann. Eine aktive Schutzreaktion ist das bewusste, aktive Schließen der Augen und das gleichzeitige Abwenden des Kopfes (Abbildung 9). Nach einer Unterweisung der Probanden vor Versuchsbeginn zeigten 34% einen Lidschluss sowie 18% eine andere Abwendungsreaktion, wohingegen es bei denen, die vorab nicht unterwiesen wurden, nur 14% bzw. 2% waren. Etwa 80% der Probanden waren hierdurch innerhalb einer Sekunde geschützt. Es konnte somit gezeigt werden, dass der Schutz vor einer Laserstrahlexposition mit Lasern der Klasse 2 durch aktive Schutzreaktionen deutlich gesteigert werden kann.

Deswegen schlugen die Autoren der Studie ein Konzept der aktiven Schutzreaktionen vor, das zu einem angemessenen Schutz vor einer möglicherweise gefährlichen Belastung beitragen sollte. Zukünftig sollte von aktiven Schutzreaktionen ausgegangen werden, statt auf physiologische Reaktionen wie Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen zu setzen. In Unterweisungen sollte – als organisatorische Maßnahme – empfohlen werden, die Augen aktiv zu schließen und sich vom Laserstrahl abzuwenden.

Aufgrund der Ergebnisse aus den zwei vorgestellten Projekten hielten es die Autoren für notwendig, die Klassifizierung von Lasern der Klasse 2 und das damit verbundene Sicherheitskonzept, das auf der Existenz von Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes beruht, zu modifizieren, damit ein möglichst hohes Maß an Sicherheit im Umgang mit diesen Lasern sowohl am Arbeitsplatz als auch im privaten Bereich gewährleistet ist.

Auswirkungen der Untersuchungen zum Lidschlussreflex und zu Abwendungsreaktionen

Die beiden vorgestellten Projekte brachten überraschende Ergebnisse und hatten verschiedene Auswirkungen. In der aktualisierten Nachdruckfassung der Durchführungsanweisungen zur Unfallverhütungsvorschrift BGV B 2 ›Laserstrahlung‹ aus dem Jahre 2007 wurde bei der Beschreibung der Laserklasse 2 die folgende Anmerkung aufgenommen: *»Von dem Vorhandensein des Lidschlussreflexes zum Schutz der Augen darf in der Regel nicht ausgegangen werden. Daher sollte man, falls Laserstrahlung der Klasse 2 ins Auge trifft, bewusst die Augen schließen oder sich sofort abwenden«*. Diese Formulierung ist ebenfalls in der Neuauflage des Leitfadens ›Laserstrahlung‹ (2005) vom Fachverband für Strahlenschutz zu finden.

Während das Sicherheitskonzept der Laserklassen 2 und 2M in der Norm DIN EN 60825-1 aus dem Jahre 2001 noch allein auf Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes beruhte, wurde die Beschreibung dieser Laserklassen in der neuen Ausgabe der Norm DIN EN 60825-1 aus dem Jahre 2008 durch die Aufforderung: *»Benutzer werden durch die Kennzeichnung angewiesen, nicht in den Strahl zu blicken, d. h. aktive Schutzreaktionen auszuführen durch Bewegen des Kopfes oder Schließen der Augen und durch das Vermeiden absichtlichen Blickens in den Strahl«* ergänzt bzw. ersetzt. Bei Lasern der Klasse 3R wurde durch die Aufnahme des Textes *»Laser der Klasse 3R sollten nur dann eingesetzt werden, wenn ein direkter Blick in den Strahl unwahrscheinlich ist«*, darauf hinge-

wiesen, dass diese Laser dort nicht zur Anwendung kommen sollten, wo mit einer Exposition der Augen gerechnet werden kann.

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

»Beim bewussten Blick in den Strahl eines Lasers der Klassen 2 oder 3A steigt mit zunehmender Expositionsdauer das Risiko eines Augenschadens. Selbst eine mit einer Exposition verbundene starke Blendung führt nicht unbedingt zu Abwendungsreaktionen und somit nicht zur Verkürzung der Expositionsdauer. Der Schutz vor einer Laserstrahlexposition mit Lasern der Klasse 2 kann durch aktive Schutzreaktionen deutlich gesteigert werden. Aktive Schutzreaktionen sind das bewusste, aktive Schließen der Augen und das Abwenden des Kopfes.«

Untersuchungen zur Blendung durch sichtbare Laserstrahlung

Nach der neuen EU-Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung sind bei der Risikoeermittlung und -bewertung durch den Arbeitgeber auch Sekundäreffekte (indirekte Effekte), wie etwa eine vorübergehende Blendung, zu berücksichtigen. Unter Blendung versteht man ein Ereignis, das durch eine optische Quelle hervorgerufen wird, deren Intensität groß genug ist, um die Sehfähigkeit einer Person zu verringern oder Belästigungen bzw. Unbehagen zu bewirken. Eine Störung des Sehvermögens, verursacht durch Blendung, kann bei Tätigkeiten wie dem Führen eines Fahr- oder Flugzeuges, beim Bedienen einer Maschine, bei Installations- oder Reparaturarbeiten zu einem erhöhten Unfallrisiko führen. Nach einem Bericht der Federal Aviation Administration (Nakagawara et al. 2004) gab es in den letzten Jahren in den USA mehrere hundert Zwischenfälle, auch solche, die ernste Konsequenzen hätten haben können. So wurden Piloten in Zivil- und Militärflugzeugen sowie in Polizei- und Rettungshelikoptern während des Flugs von einem Laserstrahl getroffen. Sie berichteten über Blitzlichtblindheit und die Entstehung von Nachbildern.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) weist in ihrer Empfehlung »Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren«

(2006) auf die Blendungsgefahr durch künstliche optische Quellen wie Laser der Klasse 2 und 2M hin und empfiehlt verschiedene Maßnahmen zu ihrer Vermeidung bzw. Minimierung. Die »Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n)« weist ebenfalls auf das Potenzial einer Blendung hin. Dort heißt es: »Auch Laser der Klasse 1 können durch ihre Blendwirkung ein hohes sekundäres Gefahrenpotenzial besitzen. Wie nach dem Blick in andere helle Lichtquellen, z. B. Sonne oder Scheinwerfer, können temporär eingeschränktes Sehvermögen und Nachbilder je nach Situation zu Irritationen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und sogar zu Unfällen führen. Grad und Abklingzeit sind nicht einfach quantifizierbar. Sie hängen jedoch maßgeblich vom Helligkeitsunterschied zwischen Blendlichtquelle und Umgebung und von den Expositionsparametern wie Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) und Expositionsdauer ab.« In der neuen Ausgabe der Lasernorm DIN EN 60825-1:2008-05 werden ebenfalls indirekte Effekte wie Blendung angesprochen. Bei der Beschreibung der Klasse 2 steht folgende Formulierung: »Es können jedoch durch den Strahl einer Lasereinrichtung der Klasse 2 Irritationen, Blitzblindheit und Nachbilder entstehen, besonders bei niedriger Umfeldhelligkeit. Dies kann allgemeine indirekte Folgen für die Sicher-

heit haben, die von zeitweiliger Störung des Sehens und von der Blendungsreaktionen herrühren.« Hinweise auf Blendung sind auch bei den Beschreibungen der Klassen 1, 1M, 2, 2M und 3R zu finden.

Vor diesem Hintergrund wurde im Forschungsprojekt ›Blendung durch optische Strahlungsquellen‹ die Beeinträchtigung des Sehvermögens durch Blendung mit Laser und LED untersucht. Im Projekt wurden z. B. Ausmaß und Dauer von Nachbildern sowie mit einer Blendung verbundener Beeinträchtigung des Farbsehvermögens ermittelt. Die so gewonnenen Daten sollten eine Grundlage für die Gefährdungsbeurteilung darstellen.

Es wurden Laser mit niedriger Leistung sowie Hochleistungs-LED in verschiedenen speziell entwickelten Testanordnungen eingesetzt und 191 Probanden insgesamt 1 736 Blendversuchen unterzogen.

In Bezug auf die Blendung durch Laserstrahlung wurde zuerst die Abhängigkeit der zeitlichen Dauer eines Nachbildes³ vom Ort des Eintreffens auf der Netzhaut und der Expositionsdauer untersucht. Die Ortsabhängigkeit der Nachbilddauer wurde mittels eines He:Ne-Lasers (632,8 nm) ermittelt, dessen Emissionswerte denjenigen der Laserklasse 1 entsprachen. Das Nachbild wurde mit einem Laserstrahl auf einer horizontalen Ebene, die den Fleck des schärfsten Sehens enthält, unter einem einstellbaren Winkel gegenüber der Augenachse hervorgerufen. Als Kriterium für die Nachbilddauer wurde die Zeit vereinbart, bis das Nachbild für den jeweiligen Probanden verschwunden war und selbst durch Augenzwinkern nicht mehr zurückgeholt werden konnte.

Ein Balkendiagramm in Abbildung 10 zeigt die Abhängigkeit der Nachbilddauer vom Ort der Blendung auf der Netzhaut (der vom Blendwinkel abhängig ist) und der Expositionsdauer. Hinsichtlich der Winkel und der Expositionsdauer sind sehr ähnliche Verläufe für verschiedene Probanden dokumentiert. Hier wird die Bedeutung der zentralen Blendung, d. h. der Blendung im Fleck des schärfsten Sehens, besonders deutlich. Es ist zu erkennen, dass sich bei zentraler Blendung und einer Expositionsdauer von 10 s eine Nachbilddauer von 300 s ergibt. Für eine Expositionsdauer von 5 s beträgt die Nachbilddauer bei zentraler Blendung etwa drei Viertel des Wertes bei 10 s und bei einer Expositionsdauer von 1 s nur noch etwas mehr als die Hälfte. Es ist auch deutlich zu erken-

3 Das Nachbild wird wie folgt definiert: »Visuelle Empfindung, die nach Verschwinden des auslösenden Reizes an der entsprechenden Stelle des Gesichtsfeldes auftritt«.

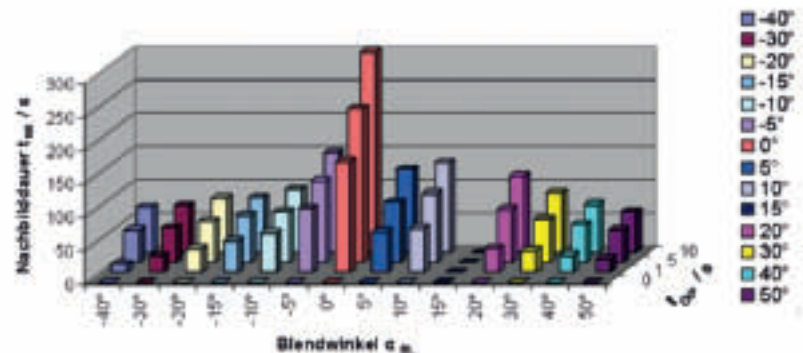


Abbildung 10
Nachbilddauer als Funktion des Blendwinkels und der Expositionsdauer bei einer Laserleistung von $30 \mu\text{W}$ (aus Reidenbach, Dollinger, Ott, Janßen und Brose [2008]).

4 Die Sehschärfe kennzeichnet das Auflösungsvermögen des Auges unter vorgegebenen Bedingungen.

nen, dass sich über den gesamten gemessenen Winkelbereich eine kürzere Nachbilddauer ergibt, wenn die Expositionsdauer verringert wird. Im blinden Fleck sind keine Nachbilder zu erkennen.

Ferner wurden im Anschluss an eine zentrale Blendung mit einem Laserstrahl zwei Tests durchgeführt: ein Test zur Ermittlung der Lesestörzeit und ein weiterer zur Bestimmung der Zeit, in der die Sehschärfe⁴ beeinträchtigt war. Dazu wurde die Nachbilddauer für eine feste Laserstrahlleistung von 30 μW für zwei Expositionszeiträume, 10 s und 20 s, ermittelt. Zu der Ermittlung der Lesestörzeit war ein unbekannter Text unmittelbar nach einer Blendung zu lesen. Das Kriterium für Sehschärfe war die Fähigkeit, einen Text zu lesen, bzw. in einem kreisförmigen Feld, das vom Nachbild überdeckt wurde, einzelne Wörter zu erkennen. Im Ergebnis ließ sich feststellen, dass eine Nachbilddauer zwischen 300 s und 350 s gleichbedeutend mit einer Lesestörzeit von 35 s bis 70 s ist und eine

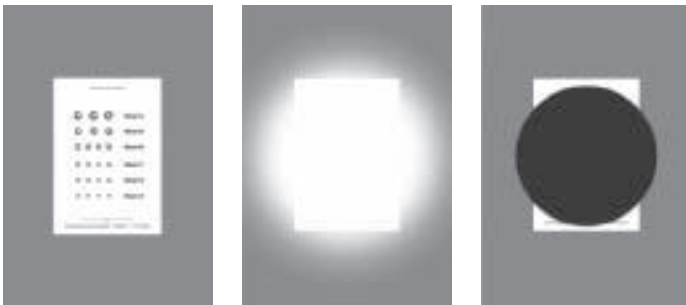
Sehschärfebeeinträchtigung von 60 s bis 90 s bedingt. Dies bedeutet, dass die Dauer der Sehfunktionsbeeinträchtigung ungefähr 10% bis 30% der Nachbilddauer beträgt.

Um Erfahrungen mit bewegten Blendlichtquellen zu sammeln, wurden Probanden in sitzender Position von einem Linienlaserstrahl überstrichen. Als Laser fand dabei ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser (532 nm) Verwendung. Der Laser wurde als scannender Laser betrieben (siehe Abbildung 8). Die Probanden wurden für 250 ms mit einer maximalen Leistung von 0,8 mW bestrahlt. Die Befragung der Probanden nach der Exposition ergab, dass 64% von ihnen die Exposition als hell empfanden, 51% fühlten sich geblendet und 58% sahen ein Nachbild. Von denjenigen, die ein Nachbild wahrnahmen, wurde dieses überwiegend als grüner Punkt beschrieben.

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

Als Ergebnis dieses Forschungsprojektes wurde vorgeschlagen, die Lichtquellen zur Erleichterung der Gefährdungsanalyse in die Blendgruppen Bo (>praktisch nicht blendend<), B1 (>gering blendend<) und B2 (>stark blendend<) einzuteilen, wobei dies von der Dauer der Sehstörung abhängig gemacht werden soll. Die Blendgruppe Bo entspräche einer Sehbeeinträchtigung bis 2 s, B1 bis 10 s und B2 über 10 s Dauer.

Abbildung 11
Blendungseffekt und
Nachbild



Verhaltensregeln beim Umgang mit Lasern

Laser der Klasse 2 – wie Laserpointer, Laserwasserwaagen und Justierlaser – haben sich im privaten Bereich stark verbreitet. Sie werden von Personen benutzt, die in den meisten Fällen nichts über die biologische Wirkung von Laserstrahlung und die damit verbundenen Gefährdungen wissen. Um so wichtiger ist die Erkenntnis aus den hier vorgestellten Studien, dass es keinen physiologisch bedingten Schutzmechanismus (Abwendungsreaktionen und Lidschlussreflex) gibt, der bei einem direkten Blick in einen Laserstrahl der Klasse 2 sicher vor einem Augenschaden schützen kann und Blendung länger andauernde Sehstörungen hervorrufen kann. Für den privaten Bereich sind in den Gebrauchsanweisungen daher die klassenspezifischen Verhaltensweisen und Handlungsanleitungen entsprechend dem Stand der Technik klar und unmissverständlich zu benennen (Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte[n]). Alle professionellen Benutzer von Lasern der Klassen 1M, 2 und 2M sowie Verwender von Laser-Justierbrillen müssen über die Risiken eines direkten Blicks in den Laserstrahl unterwiesen werden. Laser-Justierbrillen schützen die Augen bei der Positionierung von Lasern, indem sie die jeweilige Laserstrahlung auf Werte der Klasse 2 reduzieren. Damit sind die Benutzer einer Laserstrahlung der

Klasse 2 ausgesetzt, gegen die es keine ausreichende Sicherheit durch Lidschlussreflex und Abwendungsreaktionen gibt. Gerade bei Justierarbeiten ist aber die Wahrscheinlichkeit eines direkten Blicks in den Laserstrahl relativ hoch. Deshalb ist hier, wie auch grundsätzlich, die Beachtung der folgenden Regeln zum Schutz der Gesundheit besonders wichtig:

- **Niemals den Laserstrahl in die Augen anderer Personen richten!**
- **Niemals absichtlich in den direkten Strahl blicken!**
- **Falls Laserstrahlung ins Auge trifft, sind die Augen bewusst zu schließen und der Kopf ist sofort aus dem Strahl zu bewegen.**
- **Bei der Verwendung von Lasern der Klassen 1M und 2M dürfen keine optischen Instrumente zur Betrachtung der Strahlungsquelle verwendet werden.**

Literatur

Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt geändert durch Artikel 6 des Gesetzes vom 30. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2130),
www.bmas.de/coremedia/generator/10848/arbSchg.html

DIN EN 60825-1 (VDE 0837-1):2008-05: Sicherheit von Laser-Einrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2007); Deutsche Fassung EN 60825-1:2007, DIN und VDE, Beuth Verlag, Berlin

Durchführungsanweisungen vom Oktober 1995 zur Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift BGV B 2 ›Laserstrahlung‹ vom 1. April 1988, in der Fassung vom 1. Januar 1993, Aktualisierte Nachdruckfassung, April 2007, Carl Heymanns Verlag KG, Köln

Geratewohl, S. J. and Strughold, H.: ›Motoric response of the eyes when exposed to light flashes of high intensities and short durations‹, Journal of Aviation Medicine 24, 200–207 (1953)

Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) vom 6. Januar 2004 (BGBl. I S. 2 [219]), zuletzt geändert durch Artikel 3 Abs. 33 des Gesetzes vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970),
www.bmas.de/coremedia/generator/14110/gpsg.html

IEC 60825-1 - Ed. 2.0: 2007-03: Safety of laser products – Part 1: Equipment classification and requirements; International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland

Leitfaden ›Nichtionisierende Strahlung: ›Laserstrahlung‹, Fachverband für Strahlenschutz, FS2005-94-AKNIR, Köln (2005)

Maiman, T. H.: ›Stimulated Optical Radiation in Ruby‹, Nature 187, 493–494 (1960)

Nakagawara, V. B., Montgomery, R. W., Dillard, A., McLin, L. and Connor, C. W.: ›The Effects of Laser Illumination on Operational and Visual Performance of Pilots during Final Approach‹, Federal Aviation Administration, Office of Aerospace Medicine. Report Number DOT/FAA/AM-04/09 (2004)

Reidenbach, H.-D. und Wagner, A.: ›Ein Beitrag zum Lidschlussreflex bei inkohärenter optischer Strahlung.‹ In: 31. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, 27. September–1. Oktober 1999, Köln, NIR Band II, 935-938 (1999)

Reidenbach, H.-D., Dollinger, K. und Hofmann, J.: ›Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes‹, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2003)

Reidenbach, H.-D., Hofmann, J., Dollinger, K. und Ott, G.: ›Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung‹, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2006)

Reidenbach, H.-D., Dollinger, K., Ott, G., Janßen, M. und Brose, M.: ›Blendung durch optische Strahlungsquellen‹, Forschungsprojekt F 2185, BAuA (2008)
www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/F2185.html

Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), ABl. EG L 114 vom 27.4.2006, S. 38–59

SSK: Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren – Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 205. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 16./17. Februar 2006

Sutter, E.: ›Schutz vor optischer Strahlung‹, VDE-Verlag, Berlin (2002)

Technische Spezifikation zu Lasern als bzw. in Verbraucherprodukte(n), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin,
www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Optische-Strahlung/Stellungnahme.html

UVV BGV B 2 bzw. GUV-V B 2: Unfallverhütungsvorschrift ›Laserstrahlung‹ vom 1. April 1988 in der Fassung vom 1. Januar 1997 mit Durchführungsanweisungen vom Oktober 1995; Carl Heymanns Verlag KG, Köln

Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV)
<http://bundesrecht.juris.de/ostrv/index.html>

Impressum

Damit nichts ins Auge geht...

Schutz vor Laserstrahlung

Autorin: Dr. Ljiljana Udovicic

Gruppe 2.2: Physikalische Faktoren, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Redaktionelle Mitarbeit: Michael Fiedler (KONTEXT Oster & Fiedler GmbH), Prof. Dr. Hans-Dieter Reidenbach (Fachhochschule Köln), Dr. Erik Romanus, Dr. Rüdiger Pipke, Günter Ott, Marco Janßen (BAuA)

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

Friedrich-Henkel-Weg 1–25, 44149 Dortmund

Telefon 0231 9071-2071

Fax 0231 9071-2070

info-zentrum@baua.bund.de

www.baua.de

Gestaltung: GUD – Helmut Schmidt, Braunschweig

Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur Fox, Lindlar/Köln

Herstellung: DruckVerlag Kettler GmbH, Bönen/Westfalen

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Haftungsansprüche materieller oder ideeller Art gegen die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, die durch die Nutzung oder Nichtnutzung der angebotenen Informationen bzw. durch die Nutzung fehlerhafter und unvollständiger Informationen verursacht werden, sind grundsätzlich ausgeschlossen, es sei denn, sie sind nachweislich auf vorsätzliches oder grob fahrlässiges Verschulden unseres Hauses zurückzuführen.

2. überarbeitete Auflage, Dezember 2010

ISBN 978-3-88261-678-1

ISBN 978-3-88261-678-1

baa:
Bundesanstalt für Arbeitsschutz
und Arbeitsmedizin