

Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung

TROS Laserstrahlung Teil 2: Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung

Stand: April 2015
(GMBl. Nr. 12–15 vom 05.05.15, S. 249)

Inhaltsverzeichnis dieses Ausdrucks

Titel	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Begriffsbestimmungen	3
3 Vorgehen bei Messungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung	3
3.1 Grundsätzliches	3
3.2 Vorprüfung	4
3.3 Analyse der Arbeitsaufgaben und Expositionsbedingungen	7
3.4 Messungen	8
3.4.1 Planung	8
3.4.2 Messgeräte	8
3.4.3 Messblenden und Messabstände	9
3.4.4 Grenz-Empfangswinkel γ_P	10
3.4.5 Messung der Impulsdauer und Impulsfrequenz	10
3.4.6 Durchführung der Messung	11
3.4.7 Auswertung der Messergebnisse	11
3.4.8 Beurteilung der Exposition	11
3.5 Anwendung von Schutzmaßnahmen	12
3.6 Wiederholung von Messungen und Bewertung	12
3.7 Messbericht	12
4 Einflussfaktoren bei der Ermittlung der Expositionsgrenzwerte	13
4.1 Relevante Expositionsdauern	13
4.2 Strahlung mehrerer Wellenlängen	14
4.3 Ermittlung des Korrekturfaktors CE ausgedehnter Quellen	14
5 Beispiele zur Berechnung von Expositionen und Expositionsgrenzwerten	15
5.1 Kollimierte Laserstrahlung	15
5.2 Fokussierung von Laserstrahlung mit einer Linse	16
5.3 Laserstrahlung aus einem Lichtwellenleiter	18
5.4 Ausgedehnte Quellen bei vollkommen diffuser Reflexion	19
5.5 Exposition durch Laserstrahlung mit verschiedenen Wellenlängen	20
5.6 Abschätzung der Gefährdung durch einen einfachen Laserscanner	22
5.7 Beispiel zur Bewertung eines Linienlasers	23
Anhang 6 Literaturhinweise	27
Anlage 1 - Messgrößen und Parameter zur Charakterisierung von Laserstrahlung	28
Anlage 2 - Messgrößen und Parameter für die Berechnung oder die Messung von Laserstrahlung	30
A2.1 Kenngrößen eines (Gauß'schen) Laserstrahls	30
A2.1.1 Strahldurchmesser und Divergenz	31
A2.1.2 Leistungsdichteverteilung	32
A2.1.3 Leistung durch eine Blende	33
A2.2 Größen zur zeitlichen Charakterisierung von Laserstrahlen	33
A2.3 Winkelausdehnung α einer scheinbaren Quelle	34
A2.4 Grenz-Empfangswinkel γ_P bei fotochemischer Gefährdung	35
A2.5 Augensicherheitsabstand NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance)	36
A2.5.1 Direkter Laserstrahl	36
A2.5.2 Erweiterter Augensicherheitsabstand ENOHD bei Verwendung optischer Instrumente	38
A2.6 Emission aus Lichtwellenleitern – Durchmesser des divergenten Strahls	40
Anlage 3 - Beschreibung von Messgeräten	41
A3.1 Detektoren für Laserstrahlung	41
A3.2 Messverfahren zur Bestimmung der Strahlcharakteristik von Laserstrahlen	42
Anlage 4 - Expositionsgrenzwerte	44
A4.1 Expositionsgrenzwerte für Laserstrahlung	44
A4.2 Vereinfachte Expositionsgrenzwerte zur Auswahl von Laser-Schutz- und -Justierbrillen	52

Die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Laserstrahlung) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Laserstrahlung wieder.

Sie werden vom **Ausschuss für Betriebssicherheit** unter Beteiligung des Ausschusses für Arbeitsmedizin ermittelt bzw. angepasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt bekannt gemacht.

Diese TROS Laserstrahlung, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung“, konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs die Anforderungen der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung und der Verordnung zur Arbeitsmedizinischen Vorsorge. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnungen erfüllt sind. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, muss er damit mindestens die gleiche Sicherheit und den gleichen Gesundheitsschutz für die Beschäftigten erreichen.

1 Anwendungsbereich

Die TROS Laserstrahlung, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung“ beschreibt das Vorgehen bei der Planung, der Beauftragung, der Durchführung und Auswertung von Messungen und Berechnungen zur Exposition am Arbeitsplatz nach dem Stand der Technik und den Vergleich der Messergebnisse mit den Expositionsgrenzwerten. Die Dokumentation der Expositionsmessungen von Laserstrahlung ist Teil der Gefährdungsbeurteilung (siehe auch Teil 1 „Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung“ der TROS Laserstrahlung).

2 Begriffsbestimmungen

In diesem Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung“ werden Begriffe so verwendet, wie sie im Teil „Allgemeines“ der TROS Laserstrahlung definiert und erläutert sind.

3 Vorgehen bei Messungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung

3.1 Grundsätzliches

(1) Nach § 3 Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) hat der Arbeitgeber im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung die auftretenden Expositionen durch Laserstrahlung an Arbeitsplätzen zu ermitteln und zu bewerten. Er kann sich die notwendigen Informationen beim Wirtschaftsakteur (Hersteller, Bevollmächtigter, Einführer und Händler) oder mit Hilfe anderer zugänglicher Quellen beschaffen. Dazu gehören z. B. Angaben der Strahlungsemissionen der Laserstrahlungsquellen in Bedienungsanleitungen und technischen Unterlagen. Im Fall von Laser-Einrichtungen kann davon ausgegangen werden, dass in vielen Fällen aufgrund der Klassifizierung der Laser-Einrichtungen nach DIN EN 60825-1 (4) die notwendigen Unterlagen zur Verfügung stehen.

(2) Lässt sich jedoch mit den vorhandenen Informationen nicht sicher feststellen, ob die Expositionsgrenzwerte nach Anlage 4, Abschnitt A4.1 dieser TROS Laserstrahlung beim vorgesehenen Gebrauch eingehalten werden, ist der Umfang der Expositionen durch Messungen oder Berechnungen nach § 4 OStrV festzustellen. Messungen und Berechnungen müssen nach dem Stand der Technik fachkundig (siehe Teil 1 „Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung“ der TROS Laserstrahlung) geplant und durchgeführt werden. Die eingesetzten Messverfahren und Messgeräte sowie eventuell erforderliche Berechnungsverfahren müssen den vorhandenen Arbeitsplatz- und Expositionsbedingungen hinsichtlich der betreffenden Laserstrahlung angepasst und geeignet sein, die jeweiligen physikalischen Größen zu bestimmen. Die Messergebnisse müssen die Entscheidung erlauben, ob die jeweiligen Expositionsgrenzwerte eingehalten werden oder nicht.

(3) Das Messen der Expositionen durch Laserstrahlung ist eine komplexe Aufgabe und erfordert entsprechende Fachkenntnisse und Erfahrungen. Der Arbeitgeber kann damit fachkundige Personen beauftragen, falls er nicht selbst über die ausreichenden Kenntnisse und die notwendige Messtechnik verfügt (siehe § 5 OStrV).

3.2 Vorprüfung

(1) In einer Vorprüfung ist zunächst festzustellen, ob zur Ermittlung der Exposition eine Messung oder Berechnung notwendig ist, oder ob nicht bereits genügend Informationen vorhanden sind, um die Exposition auch ohne eine Messung ausreichend genau bestimmen zu können.

(2) Bei Laser-Einrichtungen, in denen eine Strahlungsquelle verwendet wird, deren Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) einer höheren Laserklasse entspricht als der gesamten Laser-Einrichtung (typischerweise eingehauste Laserstrahlungsquellen), kann es beim Entfernen der Einhausung oder der Überbrückung der Sicherheitsschaltung (z. B. bei Service oder Wartung, Definition siehe Teil „Allgemeines“) zu einer Überschreitung der Expositionsgrenzwerte bzw. zu einer weiteren Erhöhung der Gefährdung kommen, da Laserstrahlung der eigentlich eingehausten Strahlungsquelle zugänglich ist.

(3) Das Ablaufschema (Abbildungen 1a und 1b) soll Hinweise geben, ob Messungen und Berechnungen notwendig sind. Ein weiteres vereinfachtes Schema ist in Abbildung 2 zu finden. Parameter, wie z. B. Wellenlänge, Laserklasse, Laserleistung, Impulsenergie, Strahldurchmesser, Strahldivergenz, Impulsdauer, Impulsfolgefrequenz und gegebenenfalls der Augensicherheitsabstand (NOHD) bzw. der erweiterte Augensicherheitsabstand (ENOH) unter Berücksichtigung der Verwendung von optischen Geräten mit sammelnder Wirkung, werden in der Regel vom Wirtschaftsakteur (Hersteller, Bevollmächtigter, Einführer und Händler) mitgeliefert. Der Umfang der mitzuliefernden Unterlagen und Informationen sollte detailliert schriftlich mit dem jeweiligen Wirtschaftsakteur (z. B. im Rahmen des Kaufvertrages) vereinbart werden.

(4) Beispiele für Fälle, in denen keine Expositionsmessungen notwendig sind:

- wenn die Expositionsgrenzwerte nach Anlage 4, Abschnitt A4.1 offensichtlich unterschritten werden,
- wenn eine Berechnung der zu erwartenden Strahlungsexpositionen möglich ist (siehe Abschnitt 5 dieser TROS Laserstrahlung).

(5) Lässt sich in der Vorprüfung keine eindeutige Entscheidung treffen, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten oder überschritten werden, sind Messungen der Exposition erforderlich.

Abb. 1a Ablaufschema zur Vorgehensweise bei Laser-Einrichtungen der Klasse 1 gemäß DIN EN 60825-1:2008-05 (4)

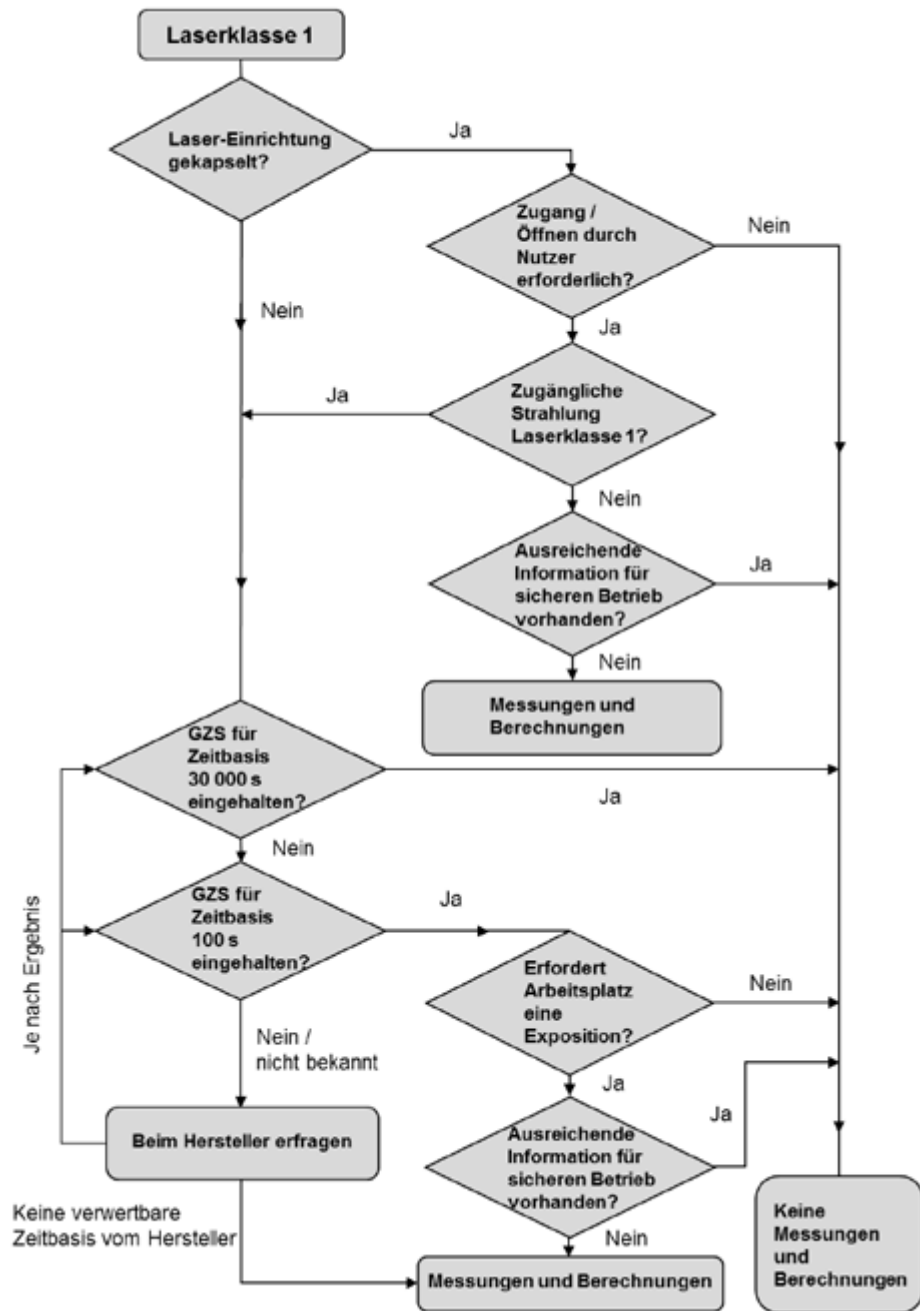


Abb. 1b Ablaufschema zur Vorgehensweise bei Laser-Einrichtungen der Klasse 2 gemäß DIN EN 60825-1:2008-05 (4)

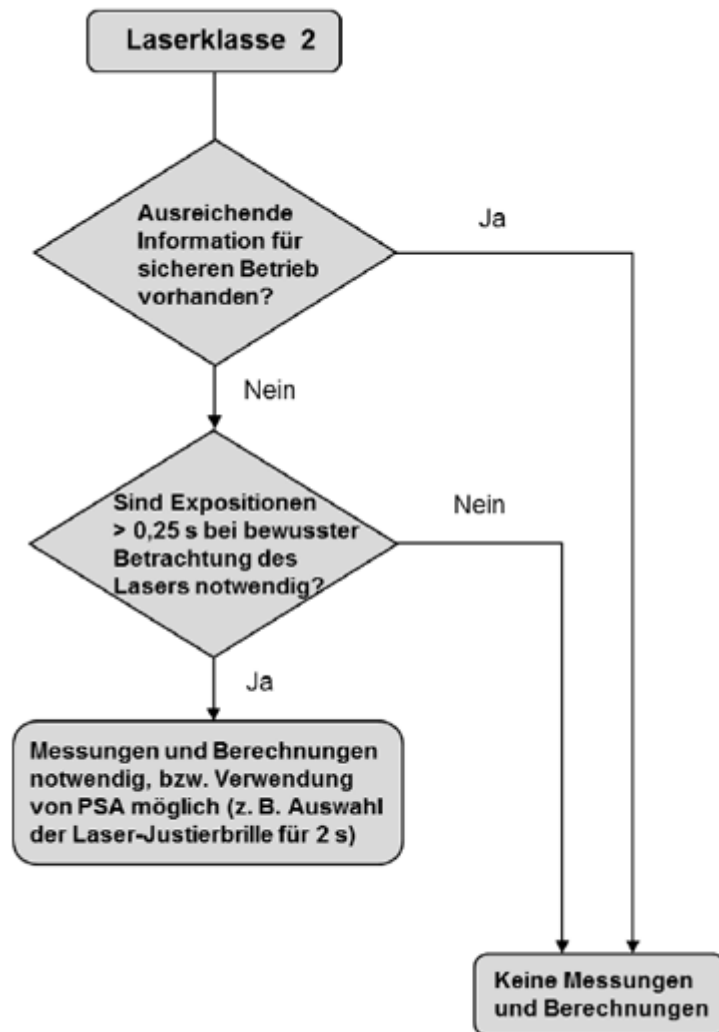
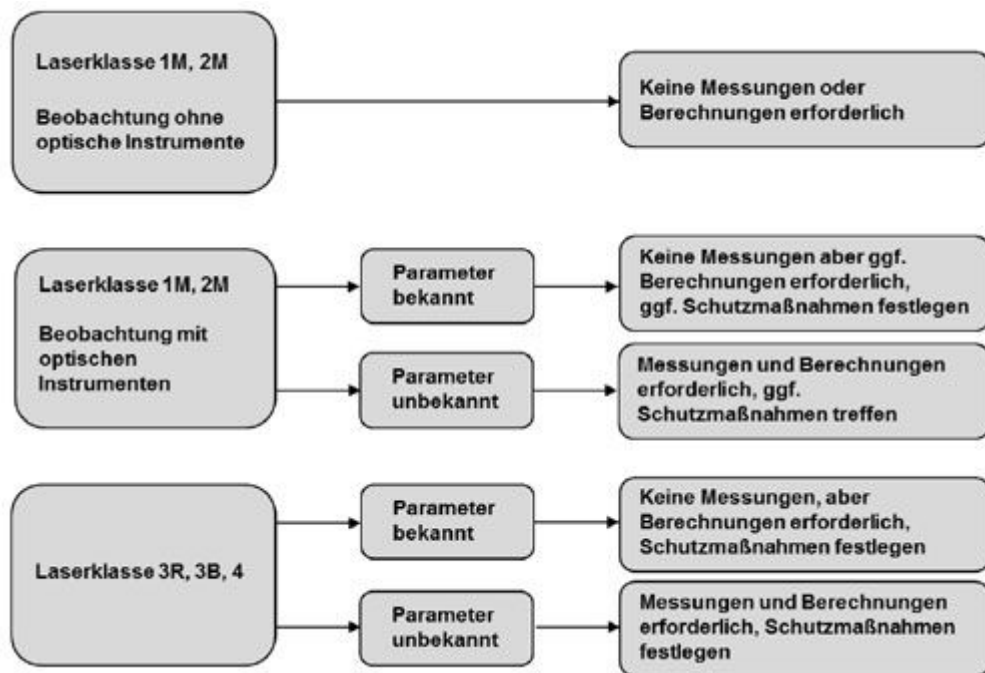


Abb. 2 Vereinfachtes Schema zur Vorprüfung



3.3 Analyse der Arbeitsaufgaben und Expositionsbedingungen

(1) Vor der Messung ist eine detaillierte Analyse der Arbeitsaufgaben und des Arbeitsablaufs der exponierten Beschäftigten sowie der Expositionsbedingungen durchzuführen. Hierbei müssen sämtliche Tätigkeiten berücksichtigt werden, bei denen Beschäftigte Laserstrahlung ausgesetzt sein können. Dabei ist immer vom ungünstigsten Fall („worst-case“-Szenario) auszugehen. Hierzu gehört u. a. die Ermittlung der höchsten Bestrahlungsstärke bzw. Bestrahlung, die an der Stelle des kleinsten relevanten Strahldurchmessers zu finden ist, der die Beschäftigten ausgesetzt sein könnten.

(2) Die Analyse umfasst insbesondere die Ermittlung

- der Anzahl, Positionen und Arten der Laserstrahlungsquellen,
- der Strahlungsanteile, die an Wänden, Einrichtungen, Materialien usw. reflektiert und/oder gestreut werden,
- des zeitlichen Verlaufs der Laserstrahlungsemission,
- der Positionen und Zeitdauer in denen Beschäftigte durch Laserstrahlung exponiert werden können,
- der zu berücksichtigenden möglichen gesundheitlichen Auswirkungen durch die Exposition auf Beschäftigte unter Einbeziehung besonders gefährdeter Gruppen,
- möglicherweise fotosensibilisierender chemischer oder biologischer Stoffe am Arbeitsplatz,
- der zu berücksichtigenden Expositionsgrenzwerte (Anlage 4, Abschnitt A4.1 dieser TROS Laserstrahlung),
- der Verwendung von Schutzeinrichtungen und Schutzausrüstungen und
- der Expositionsbedingungen im normalen Betrieb von Laserstrahlungsquellen sowie z. B. bei Wartungs- und Servicearbeiten.

(3) Wirkt Laserstrahlung auf mehrere Beschäftigte in vergleichbarer Weise ein, dann kann die Analyse als repräsentativ für die persönlichen Expositionen dieser Beschäftigten angesehen werden. In diesem Fall reicht die Durchführung einer einzigen Expositionsermittlung im Sinne einer Stichprobenerhebung nach § 4 Absatz 2 OStrV.

3.4 Messungen

3.4.1 Planung

- (1) Vor der Messung ist eine sorgfältige Planung durchzuführen. Aus den technischen Parametern des Lasers ergibt sich, welches Messverfahren einzusetzen ist. Aus den örtlichen Gegebenheiten ergeben sich Anzahl und Position der Messpunkte.
- (2) Wenn vor der Messung keine detaillierten Angaben über die Wellenlängen erhältlich sind, dann sollte zuerst eine Messung des optischen Strahlungsspektrums durchgeführt werden. Zusätzliche Wellenlängen, die nicht der Hauptwellenlänge entsprechen, können auftreten (z. B. 1064 nm bei einer Hauptwellenlänge von 532 nm). Zusätzlich auftretende inkohärente optische Strahlung ist gemäß TROS IOS zu bewerten. Hierzu zählt z. B. die Anregungsstrahlung (z. B. Blitzlampe, Vorionisierung (UV-Strahlung) und die Prozessstrahlung (Plasma)).
- (3) Das gemessene Spektrum gibt Auskunft über die Wellenlängen, für die die Expositionsmessungen durchgeführt werden müssen und über die zu erwartenden Gefährdungen.
- (4) Die Messgrößen und Parameter zur Charakterisierung von Laserstrahlung sind in Anlage 1 dieser TROS Laserstrahlung aufgeführt.
- (5) Für die Expositionsermittlung sollte die Anzahl der Messgrößen und Parameter auf das Mindestmaß beschränkt werden, das eine vollständige und sachgerechte Analyse ermöglicht.

3.4.2 Messgeräte

- (1) Bei der Anwendung von Messgeräten ist zu beachten, dass sie entsprechend der vorliegenden Messaufgabe ausgewählt werden. So müssen beispielsweise Laserleistungsmessgeräte für die jeweils vorliegende Wellenlänge, die Höhe der Leistung des Lasers und dessen Zeitverhalten geeignet ausgelegt sein. Die Anlage 3 dieser TROS Laserstrahlung gibt einen Überblick über häufig verwendete Messgeräte zur Charakterisierung von Laserstrahlung.
- (2) Für die Messung von Laserstrahlung eingesetzte Detektoren sind geeignet, wenn deren Messunsicherheit bestimmt wurde und für die Messaufgabe ausreichend ist.

Hauptbeiträge hierzu können z. B. aus folgenden Effekten stammen:

- Änderung der Detektorempfindlichkeit mit der Zeit,
- Inhomogenität der Empfindlichkeit über der Empfängerfläche,
- Änderung der Empfindlichkeit während der Bestrahlung,
- Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit,
- Winkelabhängigkeit der Empfindlichkeit,
- Nichtlinearität des Empfängersystems,
- Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit,
- Polarisationsabhängigkeit der Empfindlichkeit,
- Fehler durch zeitliche Mittelung von wiederholt gepulster Strahlung,
- Drift des Nullpunkts des Instruments,
- Kalibrierunsicherheit.

(3) Die Messunsicherheit des Gerätes ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn der zu ermittelnde Wert der Bestrahlung durch einen Laser im Bereich des Expositionsgrenzwertes liegt. Dann muss die Gesamt-Messunsicherheit klein genug sein, damit entschieden werden kann, ob die Summe aus Messwert und Messunsicherheit ober- oder unterhalb des Expositionsgrenzwertes liegt.

(4) Die Kalibrierung der Empfänger soll durch Laboratorien erfolgen, die eine Rückführung auf international anerkannte Normale gewährleisten können. In Deutschland sind dies die von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditierten Stellen bzw. direkt die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) als technische Oberbehörde für das Messwesen.

Hinweis:

Weitere nützliche Informationen zu Messgeräten sind u. a. in (6) enthalten.

(5) Abhängig von der zu analysierenden Strahlungsleistung kommen als Detektoren zur Bestimmung der Strahldurchmesser sowohl mechanische als auch bildgebende Verfahren zum Einsatz, mit denen die grundlegenden Strahlparameter (z. B. Strahlmessungen, Divergenzwinkel (Strahldivergenz), Beugungsmaßzahlen) bestimmt werden können. Derartige Geräte entsprechen in der Regel den in den Normen DIN EN ISO 11146-1 (8) und DIN EN ISO 11146-2 (9) genannten Verfahren. Einen Überblick über die in diesen Normen genannten Verfahren gibt Anlage 3 dieser TROS Laserstrahlung.

(6) Spektral auflösende Geräte müssen nur in solchen Fällen eingesetzt werden, in denen keine Informationen über die von der Laser-Einrichtung emittierten Wellenlänge(n) vorliegen. Die Ausführung der Geräte reicht von einfacheren Laserspektrometern, die die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit von Detektoren ausnutzen, über weit durchstimmbare Systeme mit optischen Gittern bis zu höchstauflösenden interferometrisch arbeitenden Wave-Metern, mit denen die longitudinale Modenstruktur von Laserlinien bestimmt werden kann.

(7) Ist die absolute Bestimmung eines wellenlängenabhängig breiteren Leistungsspektrums notwendig, so müssen die Geräte sorgfältig hinsichtlich ihrer wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit kalibriert werden. Dies kann mit bezüglich der spektralen Strahldichte kalibrierten Breitbandstrahlern erfolgen.

3.4.3 Messblenden und Messabstände

(1) Bei der Messung von Bestrahlungsstärke und Bestrahlung ist zu berücksichtigen, dass sich die Expositionsgrenzwerte auf die Flächen beziehen, die mit den Grenzblenden in Tabellen A4.3, A4.4 und A4.5 definiert werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass damit bei inhomogenen Leistungsdichteverteilungen eine definierte Mittelwertbildung festgelegt wird und dass Strahlungsanteile außerhalb dieser Flächen unberücksichtigt bleiben.

Tab. 1 Anforderungen an die Blendendurchmesser

Wellenlängenbereich in nm		Blendendurchmesser D in mm	
		Auge	Haut
$100 \leq \lambda < 400$	1	für $t \leq 0,35$ s	3,5
	$1,5 \cdot t^{3/8}$	für $0,35$ s < $t < 10$ s	
	3,5	für $t \geq 10$ s	
$400 \leq \lambda < 1400$		7	3,5

$1400 \leq \lambda < 10^5$	1	für $t \leq 0,35 \text{ s}$	3,5
	$1,5 \cdot t^{3/8}$	für $0,35 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$	
	3,5	für $t \geq 10 \text{ s}$	
$10^5 \leq \lambda \leq 10^6$	11		3,5

(2) Allgemeine Hilfestellung zur richtigen Durchführung von Messungen können der Norm DIN EN ISO 11554 (10) entnommen werden.

3.4.4 Grenz-Empfangswinkel γ_P

(1) Aus den Tabellen für die Expositionsgrenzwerte wird ersichtlich, dass für die fotochemische Gefährdung ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 600 \text{ nm}$) ein so genannter Grenz-Empfangswinkel γ_P zu berücksichtigen ist (Definition des Empfangswinkels siehe Teil „Allgemeines“ der TROS Laserstrahlung). Dies ist dem Umstand geschuldet, dass bei längeren Beobachtungsdauern das Bild der Quelle durch die Augenbewegung verwischt und damit die Gefährdung verringert wird.

(2) Das Verwischen des Netzhautbildes bei längeren Beobachtungsdauern wird dadurch berücksichtigt, dass eine Blende vor der Strahlungsquelle (Feldblende) den Empfangswinkel einschränkt (siehe Anlage 2 dieser TROS Laserstrahlung, Abbildung A2.5). Eine weitere Möglichkeit zur Begrenzung des Empfangswinkels wird in Abbildung A2.6 gezeigt.

(3) Der Grenz-Empfangswinkel γ_P hängt von der Expositionsdauer t ab und ist wie folgt definiert:

$t \leq 100 \text{ s}$	$\gamma_P = 11 \text{ mrad}$
$100 \text{ s} < t \leq 10^4 \text{ s}$	$\gamma_P = 1,1 \cdot t^{0,5} \text{ mrad}$
$t > 10^4 \text{ s}$	$\gamma_P = 110 \text{ mrad}$

(4) Der Grenz-Empfangswinkel γ_P hängt biologisch mit den Augenbewegungen zusammen und nicht von der Winkelausdehnung α der Quelle ab. Der Grenz-Empfangswinkel γ_P kann größer oder kleiner als die Winkelausdehnung α der Quelle sein.

- Wenn $\alpha > \gamma_P$, dann wird γ_P verwendet (bei Verwendung eines größeren Grenz-Empfangswinkels würde die Gefährdung zu hoch angesetzt).
- Wenn $\alpha \leq \gamma_P$, dann muss der Grenz-Empfangswinkel die betrachtete Quelle mindestens voll erfassen.

(5) Es ist in jedem Fall korrekt, wenn der errechnete Grenz-Empfangswinkel γ_P verwendet wird.

3.4.5 Messung der Impulsdauer und Impulsfolgefrequenz

(1) Die Messung der Impulsdauer und Impulsfolgefrequenz (Definition siehe Anlage 1 dieser TROS Laserstrahlung) kann mittels eines schnellen Fotodetektors und eines entsprechenden Oszilloskops realisiert werden.

(2) Die Parameter Impulsdauer und Impulsfolgefrequenz können in einigen Fällen auch anhand der elektrischen Ansteuerung berechnet werden, z. B. für Laserstrahlungsimpulse, die durch rotierende Spiegel erzeugt werden.

(3) Auch bei variablen Impulspaketen können die Impulse entsprechend Anlage 4 dieser TROS Laserstrahlung, Tabelle A4.7 aufsummiert werden.

3.4.6 Durchführung der Messung

(1) Bei der Durchführung der Strahlungsmessung ist sicherzustellen, dass keine Personen gefährdet werden. Hierzu sind entsprechende Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung vorkommender Wellenlängen, Strahlrichtungen und Bestrahlungsstärken sowie sekundärer Gefährdungen zu ergreifen.

(2) Die Orte, an denen die Messgeräte aufgestellt werden, und die Richtungen, in die die Empfänger ausgerichtet werden, sind so zu wählen, dass das Messergebnis den denkbar ungünstigsten Fall repräsentiert („worst-case“-Szenario). Hierzu kann es nötig sein, Messungen an verschiedenen Orten und in verschiedene Richtungen durchzuführen.

(3) Ein wichtiger Faktor ist die Dauer der Messung. Sie muss sich am zeitlichen Verlauf der Exposition orientieren und muss repräsentativ für die Exposition sein.

(4) Ferner sind die spezifischen Umgebungsbedingungen an den Arbeitsplätzen, wie z. B. Temperatur, Luftfeuchte sowie elektromagnetische Felder, zu berücksichtigen. So kann die Leistung eines Halbleiterlasers bei niedrigen Temperaturen wesentlich ansteigen.

3.4.7 Auswertung der Messergebnisse

Die Auswertung der Messergebnisse ist so durchzuführen, dass die Endergebnisse in den Strahlungsgrößen und Einheiten der Expositionsgrenzwerte vorliegen. Neben dem Messergebnis selbst ist auch die Messunsicherheit zu berechnen oder zur sicheren Seite abzuschätzen und anzugeben.

3.4.8 Beurteilung der Exposition

(1) Das Ergebnis der Messung wird mit dem entsprechenden Expositionsgrenzwert aus Anlage 4, Abschnitt A4.1 dieser TROS Laserstrahlung verglichen. Hierbei ist auch die Messunsicherheit zu berücksichtigen. Dabei wird festgestellt, ob der Expositionsgrenzwert eingehalten ist oder überschritten wird. Ist eine solche klare Feststellung nicht möglich, weil das Messergebnis in der Nähe des Expositionsgrenzwertes liegt und die Messunsicherheit eine eindeutige Aussage nicht zulässt, dann sind zunächst Maßnahmen zur Verminderung der Exposition zu ergreifen und anschließend die Messung zu wiederholen.

(2) Zusätzlich zu dem Ergebnis der Beurteilung sind alle Faktoren festzuhalten, die zur Exposition der Beschäftigten beitragen oder für deren Bewertung von Bedeutung sind. So ist z. B. bei Beschäftigten mit erhöhter Fotosensibilität die Einhaltung der Expositionsgrenzwerte nach Anlage 4, Abschnitt A4.1 dieser TROS Laserstrahlung nicht ausreichend und eine weitergehende Reduzierung der Exposition ggf. notwendig. Gegebenenfalls ist eine arbeitsmedizinische Beratung erforderlich.

(3) Wirkt Laserstrahlung auf mehrere Beschäftigte in gleicher Weise ein, dann kann nach § 4 Absatz 2 OStrV das Ergebnis einer geeigneten Stichprobenmessung als repräsentativ für die persönlichen Expositionen angesehen werden.

3.5 Anwendung von Schutzmaßnahmen

Die Auswahl und Anwendung von Schutzmaßnahmen ist Gegenstand des Teils 3 „Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch Laserstrahlung“ der TROS Laserstrahlung.

3.6 Wiederholung von Messungen und Bewertung

Wiederholungen sind insbesondere dann durchzuführen, wenn:

- sich die Laserstrahlungsquelle(n) oder das Strahlführungssystem (z. B. Optiken) ändern,
- sich die Arbeitsaufgaben verändern,
- sich die Expositionsbedingungen verändern,
- Schutzmaßnahmen in Anwendung sind und diese ggf. verändert werden sollen (z. B. bei geänderten Anforderungen für die Auswahl von Schutzmaßnahmen),
- sich der Stand der Technik hinsichtlich der Messtechnik verändert hat,
- auf Grund veränderter Vorschriften andere Expositionsgrenzwerte anzuwenden sind,
- Hinweise auf Expositionsgrenzwertüberschreitungen vorliegen, z. B. bei Hautrötungen von Beschäftigten.

3.7 Messbericht

(1) Die Ergebnisse von Vorprüfung, Messungen und Bewertung sind in einem Bericht zusammenzufassen. Sofern bereits auf Grundlage der Vorprüfung eine Aussage gemacht werden kann, ob Expositionsgrenzwerte eingehalten oder überschritten werden können, reicht ein Kurzbericht aus. Wird zusätzlich eine Messung und Bewertung der Exposition durchgeführt, ist ein ausführlicher Bericht anzufertigen.

Ein Messbericht enthält insbesondere Angaben zu:

- Anlass und Ziel der Messungen,
- Einzelheiten des Arbeitsplatzes (eventuell Fotografien oder Zeichnungen),
- ggf. den Namen der exponierten Beschäftigten,
- Analyse der Arbeitsaufgabe,
- Art und Typ der Laserstrahlungsquelle,
- verwendeten Schutzausrüstungen,
- der Expositionssituation und den Messorten,
- verwendeten Messeinrichtung(en) und Details zum Messverfahren,
- Expositionsgrenzwerten, die zur Beurteilung herangezogen wurden,
- Ergebnissen der Messung und der Beurteilung,
- Messunsicherheiten,
- Vorschlägen zur Verbesserung der Expositionssituation und der Sicherheit am Arbeitsplatz inklusive geeigneter Schutzmaßnahmen (soweit möglich),
- weiteren Beobachtungen, Erkenntnissen und Empfehlungen, z. B. für ärztliche Maßnahmen.

(2) Der Bericht ist so abzufassen, dass die Expositionssituation nachvollziehbar dargestellt wird. Es muss erkennbar sein, ob Maßnahmen zur Reduzierung der Exposition erforderlich sind.

(3) Der Bericht ist gemäß § 3 Absatz 4 OStrV in einer solchen Form aufzubewahren, dass eine spätere Einsichtnahme möglich ist. Für Expositionen gegenüber UV-Strahlung sind diese Unterlagen mindestens 30 Jahre aufzubewahren.

4 Einflussfaktoren bei der Ermittlung der Expositionsgrenzwerte

(1) Die Expositionsgrenzwerte für Expositionen von Beschäftigten an Arbeitsplätzen gegenüber Laserstrahlung sind in Anlage 4, Abschnitt A4.1 dieser TROS Laserstrahlung aufgeführt.

(2) Die Expositionsgrenzwerte werden in Abhängigkeit von der Wellenlänge, der Expositionsdauer und teilweise der Winkelausdehnung der Quelle angegeben. Die Angabe erfolgt in $W \cdot m^{-2}$ (Bestrahlungsstärke) oder in $J \cdot m^{-2}$ (Bestrahlung).

Hinweis:

Hilfen für die Berechnung von Expositionen durch Laserstrahlung findet man auch in der Reihe DIN EN 60825 mit ihren diversen Teilen. Die Messungen können in Anlehnung an die einschlägigen Normen durchgeführt werden. Spezielle Normen zur Messung von Expositionen durch Laserstrahlung liegen zurzeit noch nicht vor.

4.1 Relevante Expositionsdauern

(1) Die OStrV umfasst Bewertungen je nach Arbeitsplatzanalyse mit Expositionsdauern bis zu 30 000 s pro Tag. Im Folgenden werden zur Orientierung einige wichtige Zeiten genannt, die für bestimmte Expositionsbedingungen typisch sind. Diese Expositionsdauern werden zum Teil auch bei der Klassifizierung vom Hersteller verwendet.

(2) Als typische relevante Expositionsdauern kommen 30 000 s (entspricht einem achtstündigen Arbeitstag), 100 s (typisch für Laserstrahlung mit Wellenlängen größer als 400 nm bei unterstelltem nichtbeabsichtigtem zufälligem Blick), 10 s oder 5 s (typisch für die Auswahl von Laser-Schutzbrillen und Laser-Schutz-Filtern je nach Ausgabedatum der Norm, nach der der Filter geprüft wurde), 2 s (typisch für den bewussten Blick eines unterwiesenen Beschäftigten in einen Laser der Klasse 2 beim Justieren eines feststehenden Lasers) und die Zeitdauer von 0,25 s für den kurzzeitigen, zufälligen Blick (z. B. in den sichtbaren Strahl eines handgehaltenen oder -geführten Laserpointers) zur Anwendung (siehe Tabelle 2).

Tab. 2 Typische Expositionsdauer für verschiedene Anwendungsfälle

Expositionsdauer	Anwendungen
0,25 s	typisch für den kurzzeitigen, zufälligen Blick in den sichtbaren Laserstrahl eines handgehaltenen oder -geführten Laserpointers oder eines anderen Lasers
2 s	typisch für den bewussten Blick eines unterwiesenen Beschäftigten in den Laserstrahl eines Klasse-2-Lasers beim Justieren (feststehender Laser)
5 s	typisch für die Auswahl von Laser-Schutzbrillen und Filtern je nach Ausgabedatum der Norm, nach der der Filter geprüft wurde (seit 2010)

10 s	typisch für die Auswahl von Laser-Schutzbrillen und Filtern je nach Ausgabedatum der Norm, nach der der Filter geprüft wurde (bis 2010)
100 s	typisch für Laserstrahlung mit Wellenlängen größer als 400 nm bei unterstelltem nichtbeabsichtigtem zufälligen Blick
30 000 s	typisch für Laserstrahlung mit unterstelltem beabsichtigtem Blick in Richtung Laserstrahlungsquelle über längere Zeiträume, d. h. länger als 100 s

4.2 Strahlung mehrerer Wellenlängen

(1) Bei Expositionen, die Laserstrahlung mit unterschiedlichen Wellenlängen beinhalten, muss zunächst geprüft werden, ob die zulässigen Expositionsgrenzwerte für die einzelnen Wellenlängen überschritten sind. Daneben ist aber für verschiedene Wellenlängenbereiche eine Additivität der Wirkung der Strahlung zu berücksichtigen. Beispielsweise kann eine Bestrahlung im UV-A-Wellenlängenbereich ebenso zur Ausbildung eines Grauen Stars beitragen wie die Einwirkung von IR-A-Strahlung. Einen Überblick bezüglich der Additivität gibt Tabelle 3.

Tab. 3 Additive Wirkung der Strahlungseinwirkung verschiedener Wellenlängenbereiche für Auge und Haut

Wellenlängenbereich	100 nm bis 315 nm	315 nm bis 400 nm	400 nm bis 1400 nm	1400 nm bis 10 ⁶ nm
100 nm bis 315 nm	Auge/Haut			
315 nm bis 400 nm		Auge/Haut	Haut	Auge/Haut
400 nm bis 1400 nm		Haut	Auge/Haut	Haut
1400 nm bis 10 ⁶ nm		Auge/Haut	Haut	Auge/Haut

(2) Liegt eine additive Wirkung von i verschiedenen Wellenlängen λ_i vor, so muss die Summe der Quotienten aus der Bestrahlungsstärke E_i und der jeweiligen Expositionsgrenzwerte E_{EGW,λ_i} für alle Werte von i gebildet werden. Der Grenzwert ist eingehalten, wenn diese Summe kleiner als 1 ist:

$$\sum_{\lambda_i} \frac{E_i}{E_{EGW,\lambda_i}} \leq 1$$

(3) Entsprechendes gilt für H_i , falls der Expositionsgrenzwert als Bestrahlung angegeben wird.

(4) Liegt keine additive Wirkung vor, so muss jeder einzelne Expositionsgrenzwert eingehalten werden.

4.3 Ermittlung des Korrekturfaktors C_E ausgedehnter Quellen

Beim Betrachten nahezu paralleler Laserstrahlung (direkter Blick in den Laserstrahl) kann auf der Netzhaut ein minimaler Fleck von ca. 25 μm Durchmesser entstehen. Auf diesen ungünstigsten Fall beziehen sich die

Expositionsgrenzwerte. Im Fall des Blicks in eine ausgedehnte Quelle kann der Expositionsgrenzwert um einen Korrekturfaktor C_E angehoben werden. Dieser berücksichtigt die Vergrößerung des Abbilds auf der Netzhaut. Die Größe des Laserstrahlflecks auf der Netzhaut wird durch die Winkelausdehnung α gegeben, unter dem die Quelle erscheint (Anlage 2, Abschnitt A2.3 dieser TROS Laserstrahlung). Der Korrekturfaktor C_E ist Tabelle A4.6 zu entnehmen.

Hinweis:

Die Anwendung des Korrekturfaktors wird in den Abschnitten 5.4 und 5.7 dieser TROS Laserstrahlung mit Beispielrechnungen erläutert.

5 Beispiele zur Berechnung von Expositionen und Expositionsgrenzwerten

Aus den Herstellerangaben über die wichtigsten Daten des Lasers und der Strahlführung ist es meist möglich, die Bestrahlungsstärke E und die Bestrahlung H zu berechnen. Für die Aufgabe benötigt man Angaben über die Laserleistung bei kontinuierlichen Lasern und die Impulsenergie, Impulsbreite und Impulswiederholfrequenz bei gepulsten Lasern. Weiterhin benötigt man Angaben über den Strahldurchmesser (in dem 63 % der Laserleistung enthalten ist) und den Strahlverlauf (Konvergenz oder Divergenz). Daraus lässt sich bei verschiedenen Anwendungen der kleinste relevante Strahldurchmesser ermitteln.

5.1 Kollimierte Laserstrahlung

Bei kollimierter Laserstrahlung lässt sich der kleinste relevante Strahldurchmesser aus der Strahldivergenz und dem minimalen Abstand der Beschäftigten zur Laserstrahlungsquelle bestimmen (siehe Anlage 2, Abschnitt A2.1). Die Exposition kann in diesem und in den folgenden Fällen aus der angegebenen Laserleistung oder Impulsenergie und der Fläche, die dem kleinsten relevanten Durchmesser zugeordnet ist, berechnet werden.

Beispiel:

Ein Nd:YAG-Laser (Wellenlänge $\lambda = 1064$ nm, Leistung $P = 100$ mW) strahlt mit einem Durchmesser von $d_{63} = 2$ mm. Zu berechnen ist die Bestrahlungsstärke E für eine Exposition der Augen und diese ist mit dem Expositionsgrenzwert E_{EGW} zu vergleichen. Für den Fehlerfall wird von einer maximalen Expositionsdauer von $t = 10$ s ausgegangen. Die Strahldivergenz soll in diesem Beispiel vernachlässigt werden. Die Winkelausdehnung α ist kleiner als 1,5 mrad („Punktlichtquelle“).

Zunächst ist anhand von Tabelle 1 zu prüfen, welcher Blendendurchmesser D für die Berechnung der Fläche A zwecks Vergleichs mit dem Expositionsgrenzwert zu nehmen ist. Es muss danach für das Auge ein Blendendurchmesser von $D = 7$ mm verwendet werden.

Bestrahlte Fläche:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (7 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Bestrahlungsstärke:

$$E = \frac{P}{A} = \frac{0,1 \text{ W}}{3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 2597 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die Berechnung des Expositionsgrenzwertes E_{EGW} erfolgt gemäß Anlage 4, Tabelle A4.4:

$$E_{EGW} = 10 \cdot C_A \cdot C_C \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Aus Anlage 4, Tabelle A4.6 entnimmt man die Parameter $C_A = 5$ und $C_C = 1$. Damit ergibt sich $E_{EGW} = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Die berechnete Bestrahlungsstärke $E = 2597 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ liegt weit über dem Expositionsgrenzwert. Vom Arbeitgeber müssen geeignete Schutzmaßnahmen ausgewählt und getroffen werden.

Hinweis 1:

Bei Verwendung der Tabelle A4.8 „Vereinfachte maximal zulässige Bestrahlungswerte auf der Hornhaut des Auges“ aus Anlage 4 (kann bei der Auswahl einer Laser-Schutzbrille verwendet werden) würde sich in diesem Beispiel der Wert $E_{EGW} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ergeben.

Hinweis 2:

Zur Bestimmung der erforderlichen Schutzstufe der Laser-Schutzbrille muss in diesem Fall die Bestrahlungsstärke auf Basis des tatsächlichen Laserstrahldurchmessers von 2 mm berechnet werden.

5.2 Fokussierung von Laserstrahlung mit einer Linse

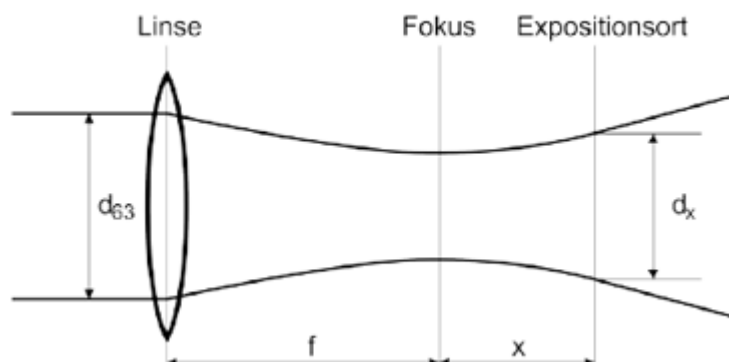
(1) Der kleinste relevante Strahldurchmesser ist abhängig vom Strahldurchmesser an der Linse sowie von der Brennweite der Linse und wird im kleinstmöglichen Abstand des Beobachters zur Laserstrahlungsquelle bestimmt (siehe Abbildung 3). Bei sichtbarer Laserstrahlung und im IR-A-Spektralbereich (400 nm bis 1400 nm) – im Sinne einer „worst-case“-Abschätzung – kann von einem kleinsten Expositionsabstand von 100 mm hinter dem Fokus ausgegangen werden. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass das schärfste (kleinste) Bild auf der Netzhaut in der Regel bei diesem Abstand entsteht.

(2) Man kann den Strahldurchmesser d_x am Expositionsort wie folgt berechnen:

$$d_x = \frac{d_{63} \cdot X}{f}$$

Dabei ist d_{63} der Strahldurchmesser an der Linse, x die Entfernung des Orts der Exposition vom Fokus und f die Brennweite der Linse.

Abb. 3 Laserstrahlung mit einer Linse gebündelt



Beispiel:

Ein Diodenlaser (Wellenlänge $\lambda = 950 \text{ nm}$, Leistung $P = 1,1 \text{ W}$) sendet einen nahezu parallelen Laserstrahl mit einem Durchmesser d_{63} von 3 mm aus und wird durch eine Linse mit der Brennweite $f = 10 \text{ mm}$ fokussiert. Zur

Ermittlung der maximalen Gefährdung für eine Exposition der Augen und der Haut über $t = 100$ s wird die Bestrahlungsstärke E mit den Expositionsgrenzwerten E_{EGW} verglichen.

Berechnung für die Augengefährdung:

Da der Laserstrahl auf die Netzhaut fokussiert werden kann, wird der Strahldurchmesser d_x in diesem Beispiel im ungünstigsten Abstand von $x = 100$ mm Entfernung vom Fokus der Linse bestimmt:

$$d_x = \frac{d_{63} \cdot x}{f} = \frac{3 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 30 \text{ mm}$$

Der Durchmesser des Strahls ist größer als die Messblende von 7 mm nach Abschnitt 3.4.3, Tabelle 1 und ist somit für die Berechnung der Strahlquerschnittsfläche A anzuwenden.

Berechnung der Strahlquerschnittsfläche A :

$$A = \frac{\pi \cdot d_x^2}{4} = \frac{\pi \cdot (30 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$E = \frac{P}{A} = \frac{1,1 \text{ W}}{7,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 1549 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Expositionsgrenzwert E_{EGW} :

$$E_{EGW} = 10 \cdot C_A \cdot C_C \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Aus Anlage 4, Tabelle A4.6 entnimmt man die Parameter $C_A = 10^{0,002 \cdot (\lambda - 700)} = 3,16$ und $C_C = 1$. Damit erhält man $E_{EGW} = 31,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Die berechnete Bestrahlungsstärke $E = 1549 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ liegt weit über dem Expositionsgrenzwert. Entsprechende technische und organisatorische Schutzmaßnahmen müssen vom Arbeitgeber getroffen werden.

Berechnung für die Hautgefährdung:

Da der Laserstrahl auf die Haut (dies gilt auch für die Hornhaut des Auges) fokussiert werden kann, muss der Durchmesser im Fokus der Linse bestimmt werden. Der Durchmesser des Strahls im Fokus ist daher kleiner als die Messblende mit einem Durchmesser von 3,5 mm. Nach Abschnitt 3.4.3 ist somit für die Berechnung der Fläche A die Messblende entsprechend der Tabelle 1 anzuwenden ($D = 3,5$ mm).

Berechnung der Strahlquerschnittsfläche A :

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$E = \frac{P}{A} = \frac{1,1 \text{ W}}{9,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 114583 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Expositionsgrenzwert E_{EGW} für die Haut aus Anlage 4, Tabelle A4.5:

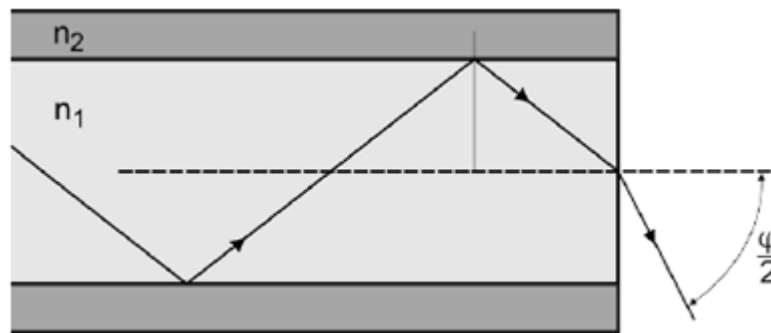
$$E_{EGW} = 2 \cdot 10^3 \cdot C_A \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Mit $C_A = 3,16$, ergibt sich $E_{EGW} = 6320 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Die berechnete Bestrahlungsstärke $E \approx 115\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ liegt deutlich über dem Expositionsgrenzwert. Entsprechende technische und organisatorische Schutzmaßnahmen müssen vom Arbeitgeber getroffen werden.

5.3 Laserstrahlung aus einem Lichtwellenleiter

(1) Laserstrahlung tritt aus Lichtwellenleitern divergent in Abhängigkeit von der numerischen Apertur ($NA = \sin(\phi/2)$, $\phi =$ voller Öffnungswinkel) aus (siehe Abbildung 4). Als kleinstmöglicher Abstand von dem Laseraustritt kann im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1400 nm ein Abstand von 100 mm angenommen werden.

Abb. 4 Laserstrahlung aus einem Lichtwellenleiter ($n_1 =$ Brechungsindex des Kerns, $n_2 =$ Brechungsindex des Mantels)



(2) In der folgenden Tabelle 4 wird der Zusammenhang zwischen der Numerischen Apertur NA und dem Strahldurchmesser bei dem ungünstigsten Abstand von 100 mm angegeben. Wenn die austretende Laserleistung (z. B. aus dem Datenblatt) bekannt ist, kann auf diese Weise die Bestrahlungsstärke im ungünstigsten Abstand von 100 mm vom LWL-Austritt berechnet werden.

Tab. 4 Strahldurchmesser in 100 mm Entfernung in Abhängigkeit von der Numerischen Apertur NA

NA	ϕ in Grad	Strahldurchmesser in mm
0,0	0,0	0
0,1	11,5	20,1
0,2	23,1	40,8
0,3	34,9	62,9
0,4	47,2	87,3
0,5	60,0	115,5
0,6	73,7	150,0
0,7	88,9	196,0

0,8	106,3	266,7
0,9	128,3	412,9

Hinweis:

Weitere nützliche Informationen zu Laserstrahlung, die in Lichtwellenleiter-Kommunikations-Systemen (LWLKS) genutzt wird, werden ausführlich in (12) behandelt.

5.4 Ausgedehnte Quellen bei vollkommen diffuser Reflexion

(1) Beim direkten Blick in einen gebündelten Laserstrahl (mit einem kleineren Durchmesser als dem der Pupille) wird u. U. die gesamte in das Auge fallende Strahlungsleistung durch die Augenlinse auf einen kleinen Punkt auf der Netzhaut fokussiert. Bei Blick in ausgedehnte Quellen entsteht auf der Netzhaut ein größeres Abbild, über welches die einfallende Strahlungsleistung verteilt wird. Der für den obigen Fall („Punktlichtquellen“) gültige Expositionsgrenzwert kann dann um den Faktor C_E (siehe Anlage 4, Tabelle A4.6) vergrößert werden. Eine ausgedehnte Quelle kann beispielsweise vorliegen, wenn ein aufgeweiteter Laserstrahl auf eine diffus reflektierende Wand (z. B. matt-weiß gestrichene Wand, keine spiegelnd reflektierende Flächen vorhanden) gerichtet ist und in diese Reflexionsstelle geblickt wird.

(2) Dabei ist zu berücksichtigen, dass diffuse Reflexion häufig auch gerichtet reflektierte Anteile besitzt. Dieses Beispiel ist nicht anwendbar bei optischen Strahlungsleistungen, die das Material (in diesem Beispiel die Wand) verändern würden.

Beispiel:

Ein Laserstrahl (Wellenlänge $\lambda = 670$ nm, Strahldivergenz $\phi = 10$ mrad) mit der Leistung $P = 1,1$ W wird an einer Fläche mit einem Fleckdurchmesser von $d_{63} = 1,5$ cm ideal diffus reflektiert. Zu berechnen ist der Expositionsgrenzwert E_{EGW} für thermische Netzhautschädigung für eine maximale Expositionsdauer von $t = 100$ s (zufälliger unbeabsichtigter Blick, siehe Abschnitt 4.1) und eine minimale Wandentfernung von $r = 1,2$ m und es ist festzustellen, ob eine sichere Betrachtung in diesem Abstand möglich ist.

Lösung:

Der Expositionsgrenzwert für thermische Netzhautschädigung wird nach Tabelle A4.4 (Bereich 400 nm–700 nm) berechnet. Er hängt von den Parametern α , C_E und T_2 ab. Nach Anlage 2, Abschnitt A2.3 gilt für die Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle:

$$\alpha = \frac{d_{63}}{r} = \frac{0,015 \text{ m}}{1,2 \text{ m}} = 0,0125 \text{ rad} = 12,5 \text{ mrad}$$

Dies gilt nur bei senkrechtem Einfall und Blick auf die diffus reflektierende Fläche („worst-case“-Szenario). Bei schrägem Blick wird der Fleck in Form einer Ellipse gesehen und α ist entsprechend anzupassen.

Damit wird C_E nach Anlage 4, Tabelle A4.6:

$$C_E = \frac{\alpha}{\alpha_{\min}} = \frac{12,5 \text{ mrad}}{1,5 \text{ mrad}} = 8,33$$

T_2 berechnet sich wie folgt (Tabelle A4.6):

$$T_2 = 10 \cdot 10^{\frac{\alpha-1,5}{98,5}} \text{ s} = 12,93 \text{ s}$$

Mit diesen Werten ($\alpha > 1,5$ mrad und $t > T_2$) berechnet sich der Expositionsgrenzwert nach Tabelle A4.4 wie folgt:

$$E_{EGW} = 18 \cdot T_2^{-0,25} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 79,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Beim idealen Lambertschen Strahler (in den Halbraum) errechnet sich die Bestrahlungsstärke in Augenebene im Abstand von $r = 1,2$ m aus

$$E = \rho \cdot \frac{P \cdot \cos \epsilon}{\pi \cdot r^2},$$

wobei ρ Reflexionsgrad und ϵ Betrachtungswinkel in Bezug auf die reflektierende Fläche sind. Unter „worst-case“-Bedingungen, d. h. für $\rho = 1$ (keine Verluste) und $\epsilon = 0$ (senkrecht zur diffus reflektierenden Oberfläche, $\cos \epsilon = 1$), gilt:

$$E = \frac{P}{\pi \cdot r^2} = \frac{1,1 \text{ W}}{4,5 \text{ m}^2} = 0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die Bestrahlungsstärke $E = 0,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ im Abstand von 1,2 m liegt damit deutlich unter dem Expositionsgrenzwert $E_{EGW} = 79,07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ für 100 s und die Reflexionsstelle kann somit sicher für diese Zeit betrachtet werden. Danach bräuchten keine Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Bei der Annahme, es würden nur 10 % der Strahlung nahezu spiegelnd reflektiert und dieser Strahlungsanteil in einem Abstand von 1,2 m aufgrund der Divergenz auf eine Strahlquerschnittsfläche von $A = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ aufgeweitet, dann würde sich dort eine Bestrahlungsstärke von

$$E = \frac{0,1 \cdot 1,1 \text{ W}}{1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 973 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

ergeben. Dieser so berechnete Wert liegt um den Faktor 12,3 oberhalb des Expositionsgrenzwertes. Schutzmaßnahmen wären dann erforderlich.

5.5 Exposition durch Laserstrahlung mit verschiedenen Wellenlängen

Beispiel:

Ein aufgeweiteter Nd: YAG-Laserstrahl (cw) strahlt mit $\lambda_1 = 1064$ nm, $P_1 = 1,5$ mW und $\lambda_2 = 532$ nm, $P_2 = 0,4$ mW, Strahlquerschnitt jeweils $38,5 \text{ mm}^2$. Wie hoch sind die Expositionsgrenzwerte für beide Wellenlängen bei einer Bestrahlungsdauer von $t_1 = 2$ s und $t_2 = 10$ s? Die Winkelausdehnung α ist kleiner als 1,5 mrad („Punktlichtquelle“). Wird der Expositionsgrenzwert für thermische Netzhautschädigung eingehalten?

Lösung:

Die Expositionsgrenzwerte werden nach Tabellen A4.3 und A4.4 berechnet. Sie hängen von den Parametern C_E , C_C und t ab.

a) $t_1 = 2$ s (Tabelle A4.3)

Für die Wellenlänge $\lambda_1 = 1064$ nm gilt der Expositionsgrenzwert

$$H_{EGW,\lambda_1} = 90 \cdot C_C \cdot C_E \cdot t^{0,75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 151,4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2},$$

mit $C_C = 1$ und $C_E = 1$. Damit folgt für den Expositionsgrenzwert, ausgedrückt als Bestrahlungsstärke:

$$E_{EGW,\lambda_1} = \frac{H_{EGW,\lambda_1}}{t_1} = \frac{151,4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{2 \text{ s}} = 75,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Die Bestrahlungsstärke des Lasers für die Wellenlänge λ_1 beträgt:

$$E_1 = \frac{P_1}{A} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \text{ W}}{38,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 39,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Für die Wellenlänge $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ gilt der Expositionsgrenzwert

$$H_{EGW,\lambda_2} = 18 \cdot C_E \cdot t^{0,75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} = 30,3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

bzw.

$$E_{EGW,\lambda_2} = \frac{H_{EGW,\lambda_2}}{t_1} = \frac{30,3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{2 \text{ s}} = 15,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Der Laser hat bezüglich dieser Wellenlänge eine Bestrahlungsstärke von

$$E_2 = \frac{P_2}{A} = \frac{4 \cdot 10^{-4} \text{ W}}{38,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 10,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

b) $t_2 = 10 \text{ s}$ (Tabelle A4.4)

Für die Wellenlänge $\lambda_1 = 1064 \text{ nm}$ gilt der Expositionsgrenzwert

$$E_{EGW,\lambda_1} = 10 \cdot C_A \cdot C_C \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},$$

mit $C_A = 5$ und $C_C = 1$. Für die Wellenlänge $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$ gilt der Expositionsgrenzwert:

$$E_{EGW,\lambda_2} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Überprüfung, ob der Expositionsgrenzwert eingehalten ist:

Nach Abschnitt 4.2 muss überprüft werden, ob die Forderung

$$\sum_{\lambda_1} \frac{E_i}{E_{EGW,\lambda_1}} \leq 1$$

gilt. Im Fall der Expositionsdauer $t_1 = 2 \text{ s}$ ergibt sich:

$$\frac{E_1}{E_{EGW,\lambda_1}} + \frac{E_2}{E_{EGW,\lambda_2}} = \frac{39,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{75,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} + \frac{10,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{15,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = 1,20 > 1$$

und im Fall der Expositionsdauer $t_2 = 10 \text{ s}$ erhält man

$$\frac{E_1}{E_{EGW,\lambda_1}} + \frac{E_2}{E_{EGW,\lambda_2}} = \frac{39,0}{50,0} + \frac{10,4}{10,0} = 0,78 + 1,04 = 1,82 > 1.$$

Der Expositionsgrenzwert wird bei beiden Expositionsdauern überschritten.

5.6 Abschätzung der Gefährdung durch einen einfachen Laserscanner

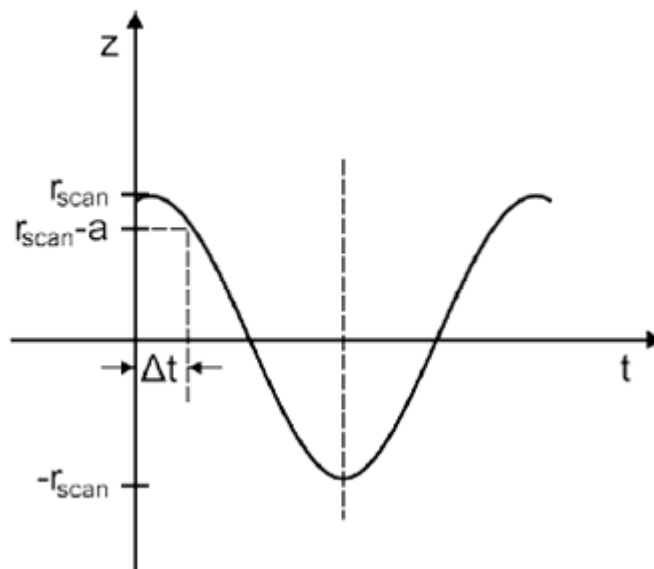
Beispiel:

Laserstrahlung von Scannern bzw. örtlich bewegter Laserstrahlung wird mit einer feststehenden Messblende bewertet. Es ergibt sich dann eine Impulsstrahlung.

Wellenlänge:	$\lambda = 650 \text{ nm}$
Laserleistung:	$P = 0,1 \text{ W}$
Scanfrequenz:	$f = 100 \text{ Hz}$
Scanbereich Durchmesser:	$d_{\text{scan}} = 200 \text{ mm}$
Strahldurchmesser:	$d = 1 \text{ mm}$
Durchmesser der Messblende zur Leistungsmessung (siehe Tabelle 1):	$D = 7 \text{ mm}$
Expositionsdurchmesser:	$a = D + d = 8 \text{ mm}$

Ein durch einen harmonisch angesteuerten Laserscanner bewegter Laserstrahl überstreicht das Auge. Die für den Betrachter gefährlichste Situation entsteht dann, wenn der Laserstrahl einen Richtungswechsel an den Orten $+r_{\text{scan}}$ und $-r_{\text{scan}}$ vornimmt (Abbildung 5), da der Laserstrahl in dieser Situation am längsten im Auge verharret. Gesucht wird die Expositionsdauer Δt , in der ein Betrachter dem Laserstrahl beim Richtungswechsel ausgesetzt wird.

Abb. 5 Scanbereich und zeitlicher Verlauf beim Scannen



Für die Kosinusfunktion im Weg-Zeit Diagramm gilt:

$$z = r_{\text{scan}} \cdot \cos \omega t$$

Mit $z = r_{\text{scan}} - a$ und der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$, folgt daraus

$$r_{\text{scan}} - a = r_{\text{scan}} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot \Delta t)$$
$$2\pi \cdot f \cdot \Delta t = \arccos \frac{r_{\text{scan}} - a}{r_{\text{scan}}}$$

Expositionsdauer Δt der Netzhaut:

$$\Delta t = \frac{\arccos \frac{r_{\text{scan}} - a}{r_{\text{scan}}}}{2\pi \cdot f} = \frac{\arccos \frac{92 \text{ mm}}{100 \text{ mm}}}{2 \cdot \pi \cdot 100 \text{ s}^{-1}} \approx 0,0006 \text{ s}$$

Expositionsgrenzwert im sichtbaren Spektralbereich für Zeiten $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ bis 10 s beträgt (mit $C_E = 1$):

$$H_{\text{EGW}} = 18 \cdot t^{0,75} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

Da der Strahl an den Umkehrpunkten zweimal das Auge überstreicht, ist die Bestrahlungsdauer $t = 2 \cdot \Delta t$. Es folgt $H_{\text{EGW}} = 0,13 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ und

$$E_{\text{EGW}} = \frac{H_{\text{EGW}}}{t} = 92,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte) E des Laserstrahls beträgt:

$$E = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{0,1 \text{ W}}{38,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 2597 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

In diesem Beispiel überschreitet die Leistungsdichte des Lasers den Expositionsgrenzwert um das 28fache. Entsprechende Schutzmaßnahmen müssen festgelegt werden.

5.7 Beispiel zur Bewertung eines Linienlasers

(1) Ein Laser strahlt kontinuierlich mit einer Wellenlänge von $\lambda = 650 \text{ nm}$. Die Laserlinie wird durch eine Zylinderlinse (Stablinse) erzeugt. Es wird davon ausgegangen, dass $C_E > 1$ ist. Der Laser entspricht der Laserklasse 3B gemäß DIN EN 60825-1:2008 (4).

(2) Für eine Gefährdungsbeurteilung sollen zwei Situationen überprüft werden, bei denen die Beschäftigten der Laserstrahlung ausgesetzt sein könnten.

1. Der direkte Blick in den Laserstrahl

Es besteht die Möglichkeit, dass ein Beschäftigter im Abstand von 80 mm von der Gehäusevorderkante in die Austrittsöffnung des Lasers blickt.

Hinweis:

Dieser Abstand entspricht nicht den Klassifizierungsbedingungen der oben genannten Lasernorm und ist in der Regel unterschiedlich zur vorgenommenen Klassifizierung, die der Hersteller üblicherweise in einer Entfernung ≥ 100 mm von der scheinbaren Quelle vornimmt.

2. Der Blick auf die reflektierte Laserlinie

Es wird angenommen, dass der Beschäftigte längere Zeit (3 h täglich) auf die von einer Wand reflektierte Laserlinie im Abstand von 400 mm blickt. Die Ausdehnung der Laserlinie in x-Richtung beträgt 100 mm und in y-Richtung 5 mm.

(3) Vorgehensweise:

Für die Abstände von 80 mm und 400 mm muss C_E ermittelt werden. Die Bestimmung von C_E erfolgt über die Ermittlung der Winkelausdehnung α , unter der die scheinbare Quelle am Auge erscheint (siehe A2.3). Zur Bestimmung der scheinbaren Quellengröße wird das Auge durch eine Sammellinse und eine CCD-Kamera simuliert (siehe Abbildungen 6 a und 6 b). Im Prüfaufbau ist für g die Entfernung von 80 mm bzw. 400 mm zwischen der Vorderkante des Linienlasers bis zur Mitte der Sammellinse einzustellen. Die CCD-Kamera ist so zu verschieben, dass die scheinbare Quelle „scharf“ abgebildet wird. Anhand des Kamerabildes werden die Größen B_x und B_y sowie die Bildweite b bestimmt. Wie im Laserschutz üblich, wird die Bestrahlungsstärke (oder Leistungsdichte) auf 63 % des Maximalwerts reduziert und daraus können B_x und B_y ermittelt werden (siehe Abbildung 7).

Mittels des Abbildungsmaßstabs g/b kann die scheinbare Quellengröße G_x in x- und G_y in y-Richtung bestimmt werden:

$$G_x = B_x \cdot \frac{g}{b}$$

$$G_y = B_y \cdot \frac{g}{b}$$

Aus den nun ermittelten Werten von G_x und G_y können α_x und α_y ermittelt werden.

$$\alpha_x = \frac{G_x}{g}$$

$$\alpha_y = \frac{G_y}{g}$$

Abb. 6 Zur Bestimmung der Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle:
a) Winkelausdehnung α am Auge

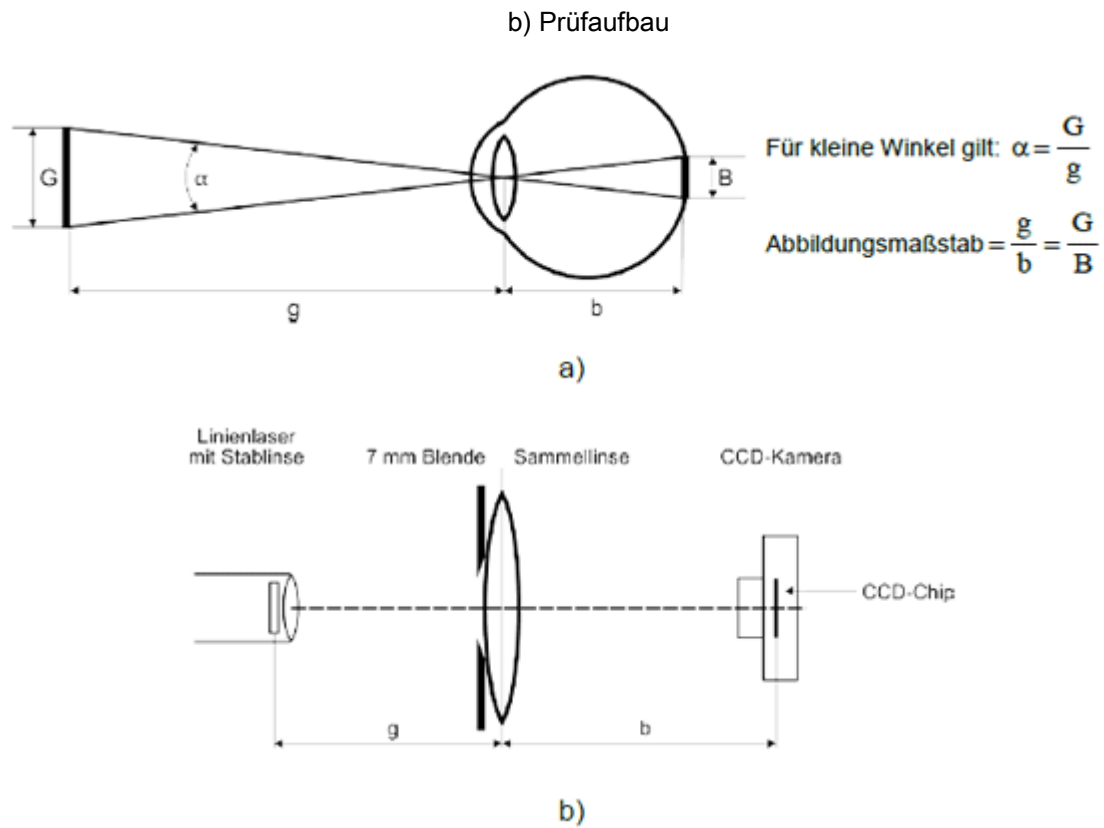
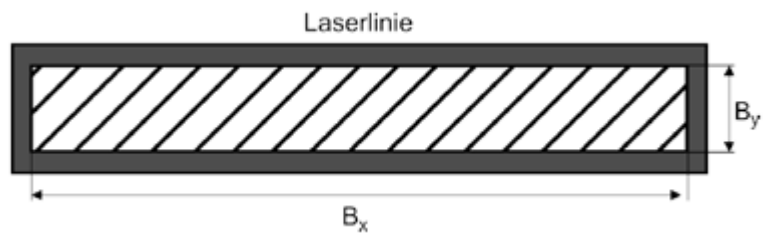


Abb. 7 Die schraffierte Fläche enthält 63 % der Energie der Laserstrahlung



Randbedingungen:

$$\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$$

$$\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$$

Aus den beiden Winkelausdehnungen α_x und α_y ist entsprechend dieser TROS Laserstrahlung ein Mittelwert α_m wie folgt zu bilden:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_x + \alpha_y}{2}$$

Daraus wird C_E berechnet mit:

$$C_E = \frac{\alpha_m}{\alpha_{\min}}$$

Hinweis:

Der Wert für C_E liegt bei Laserstrahlung von Linienlasern im Abstand von etwa 80 mm vom Strahlaustritt üblicherweise im Bereich von 2 bis 5. Macht der Hersteller keine Angaben, so muss bei der Gefährdungsbeurteilung im Abstand bis 100 mm mit dem Faktor $C_E = 1$ gerechnet werden.

Nebenrechnung für $g = 80$ mm:

Mittels Messungen wurde B_x mit 0,01 mm und B_y mit 0,52 mm bestimmt. Der Abbildungsmaßstab g/b beträgt 1,41. Es ergibt sich $G_x = 0,014$ mm und $G_y = 0,733$ mm. Mit dem angenommenen Messabstand g von 80 mm folgt:

$$\alpha_x = \frac{0,014 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 0,18 \text{ mrad}$$

Da der minimale Wert für α_x 1,5 mrad beträgt, wird mit diesem Wert für α_x weiter gerechnet.

$$\alpha_y = \frac{0,733 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 9,16 \text{ mrad}$$

$$\alpha_m = \frac{1,5 \text{ mrad} + 9,16 \text{ mrad}}{2} = 5,33 \text{ mrad}$$

$$C_E = \frac{\alpha_m}{\alpha_{\min}} = \frac{4,67}{1,5} = 3,11$$

In diesem Beispiel wurde im Abstand von 80 mm mit der 7-mm-Blende eine Leistung P von 5 mW gemessen. Dieser Wert ist mit dem Grenzwert für die Laserklasse 2 für 0,25 s zu vergleichen. Er beträgt $P_{EGW} = 1 \text{ mW} \cdot C_E = 3,11 \text{ mW}$. Es ergibt sich, dass dieser Wert schon für eine Expositionsdauer von 0,25 s im Abstand von 80 mm überschritten wird.

Nebenrechnung für $g = 400$ mm:

Mit dem angenommenen Messabstand (Beobachtungsabstand von der Wand) von 400 mm und $G_x = 100$ mm und $G_y = 5$ mm folgt:

$$\alpha_x = \frac{100 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 250 \text{ mrad}$$

$$\alpha_y = \frac{5 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 12,5 \text{ mrad}$$

Da α_x maximal 100 mrad groß werden kann, wird α_x auf 100 mrad festgelegt.

$$\alpha_m = \frac{100 \text{ mrad} + 12,5 \text{ mrad}}{2} = 56,25 \text{ mrad}$$

$$C_E = \frac{56,25 \text{ mrad}}{1,5 \text{ mrad}} = 37,5$$

Bei der Leistungsüberprüfung im Abstand von $g = 400$ mm ergibt sich eine Leistung P von $0,35$ mW mit der 7-mm-Blende. Für die Bestimmung des Expositionsgrenzwertes muss der Expositionsgrenzwert für $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$ aus Tabelle A4.4 herangezogen werden.

$$E_{EGW} 18 \cdot C_E \cdot T_2^{-0,25} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Der Expositionsgrenzwert muss für die Zeit T_2 bestimmt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Blickfixierung der Laserstrahlverteilung auch in längeren Zeitabschnitten (hier 3 h) nicht für längere Zeiten als T_2 erfolgt, sondern durch Augen- und Kopfbewegungen verhindert wird. T_2 entnimmt man aus Tabelle A4.6 für den Fall $1,5 \text{ mrad} < \alpha \leq 100 \text{ mrad}$ und erhält

$$T_2 = 10 \cdot 10^{\frac{(\alpha-1,5)}{98,5}} \text{ s} = 36,0 \text{ s.}$$

Damit ergibt sich der Expositionsgrenzwert von $E_{EGW} = 275,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, oder, wenn man mit der Fläche A der Messblende von $38,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ multipliziert, $P = 10,6$ mW. Dieser Expositionsgrenzwert wird also eingehalten. Vorübergehende Blendung ist jedoch möglich und muss speziell betrachtet werden.

6 Literaturhinweise

- (1) DIN EN 207:2012-04: Persönlicher Augenschutz – Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen)
- (2) DIN EN 208:2010-04: Persönlicher Augenschutz – Augenschutzgeräte für Justierarbeiten an Lasern und Laseraufbauten (Laser-Justierbrillen)
- (3) DIN EN 12254:2012-04: Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen – Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfung
- (4) DIN EN 60825-1:2008-05: Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen
- (5) DIN EN 60825-4:2011-12: Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 4: Laserschutzwände
- (6) DIN EN 61040:1993-08: Empfänger, Messgeräte und Anlagen zur Messung von Leistung und Energie von Laserstrahlen
- (7) DIN EN ISO 11145:2008-11: Optik und Photonik – Laser und Laseranlagen – Begriffe und Formelzeichen
- (8) DIN EN ISO 11146-1:2005-04: Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen – Teil 1: Stigmatische und einfach astigmatische Strahlen
- (9) DIN EN ISO 11146-2:2005-05: Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Laserstrahlmessungen, Divergenzwinkel und Beugungsmaßzahlen – Teil 2: Allgemein astigmatische Strahlen
- (10) DIN EN ISO 11554:2008-11: Optik und Photonik – Laser und Laseranlagen – Prüfverfahren für Leistung, Energie und Kenngrößen des Zeitverhaltens von Laserstrahlen

- (11) DIN EN 60825 Beiblatt 13:2013-04: Sicherheit von Lasereinrichtungen – Beiblatt 13: Messungen zur Klassifizierung von Lasereinrichtungen
- (12) DGUV Information 203-039: Umgang mit Lichtwellenleiter-Kommunikations-Systemen (LWKS)
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi5031.pdf>

Anlage 1 Messgrößen und Parameter zur Charakterisierung von Laserstrahlung

Die Beschreibung der Eigenschaften der von Laser-Einrichtungen emittierten Strahlung erfolgt durch Angabe verschiedener Messgrößen bzw. Parameter aus den Tabellen A1, A2 und A3. Die Tabellen enthalten die wesentlichen Messgrößen und Parameter, die bei Berechnungen oder Messungen von Laserstrahlung berücksichtigt werden müssen. Erläuterungen zu diesen Größen sind in Anlage 2 aufgeführt. Umfassendere Auflistungen können je nach Anwendungsfall z. B. DIN EN ISO 11145 (7) oder DIN EN 60825-1 (4) entnommen werden. Für die Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung sollte die Anzahl der Messgrößen und Parameter auf das Mindestmaß beschränkt werden, das eine vollständige und sachgerechte Analyse ermöglicht. In der Mehrzahl der Fälle sind als wesentliche Messgrößen die Leistung oder Energie, die Wellenlänge sowie das Strahlprofil des Laserstrahls zu bestimmen.

Tab. A1 Geometrische Größen und Größen zur Laserstrahlcharakterisierung

Formelzeichen	Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
α	ebener Winkel, $\alpha = k/r$	Quotient aus dem vom ebenen Winkel aus einem Kreis herausgeschnittenen Kreisbogen k und dem Radius des Kreises r	rad
Ω	Raumwinkel $\Omega = A/r^2$	Quotient der vom räumlichen Winkel aus einer Kugel herausgeschnittenen Oberfläche A und dem Quadrat des Kugelradius	sr
A	Strahlquerschnittsfläche	kleinste Fläche, die einen bestimmten Anteil der Strahlungsleistung enthält	m ²
d	Strahldurchmesser	Durchmesser des kleinsten Kreises in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse, der einen bestimmten Anteil der Strahlungsleistung enthält	m
ϕ, θ	Strahldivergenz, Divergenzwinkel, Fernfelddivergenzwinkel, Fernfeldöffnungswinkel	Vollwinkel, der durch das Geradenpaar gebildet wird, das asymptotisch die Einhüllende der zunehmenden Strahlabmessung enthält (wird bezüglich eines vorgegebenen Leistungsanteils definiert)	rad
t_H	Impulsdauer	Intervall zwischen den Zeitpunkten, bei denen die momentane Leistung 50 % der Spitzenleistung zum ersten und zum letzten Mal erreicht	s

F, fp	Impulsfolgefrequenz, Impulswiederholfrequenz	Anzahl der Laserimpulse je Sekunde bei einem wiederholt gepulsten Laser	Hz
λ	Wellenlänge		nm
$\Delta\lambda_H$	wellenlängenbezogene spektrale Bandbreite	maximale Differenz zwischen den Wellenlängen, für die die spektrale Leistungsdichte die Hälfte ihres Maximalwertes	nm

Tab. A2 Radiometrische Größen

Formel- zeichen	Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
P, dP P_m, P_{av} P_{pk}	Strahlungsleistung, $P = dQ/dt$ mittlere Leistung Spitzenleistung	Energiemenge pro Zeiteinheit zeitlich gemittelte Leistung Maximalwert der Strahlungsleistung (innerhalb eines Laserimpulses)	W
Q, dQ	Strahlungsenergie		J
e, E(t)	Bestrahlungsstärke (Leistungsdichte), $E = dP/dA$	die auf eine Fläche einfallende Strahlungsleistung je Flächeneinheit; E und E(t) (zeitlich variierende Bestrahlungsstärke) werden aus Messungen gewonnen oder können vom Hersteller der Laseranlage angegeben werden	$W \cdot m^{-2}$
H	Bestrahlung (Energiedichte), $H = dQ/dA$	zeitliches Integral der Bestrahlungsstärke	$J \cdot m^{-2}$
t	Zeit, Dauer der Strahlungseinwirkung		s
G	zeitlich integrierte Strahldichte	Integral der Strahldichte über eine bestimmte Expositionsdauer	$J \cdot m^{-2}$ $\cdot sr^{-1}$

Tab. A3 Laserschutzrelevante Parameter

Formel- zeichen	Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
C_A, C_B, C_C	wellenlängenabhängige Wichtungsfaktoren	Wellenlänge in nm einsetzen	-
T₁	wellenlängenabhängiger Zeitparameter	zur Auswahl des relevanten Strahlungsgrenzwertes	s
α_{min}	kleinster Grenzwinkel, $\alpha_{min} = 1,5 \text{ mrad}$	oberhalb dieses Grenzwinkels erscheinen Laserstrahlungsquellen als ausgedehnt	rad

α_{\max}	größter Grenzwinkel, $\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$	größter anzuwendender Winkel zur Beschreibung ausgedehnter Quellen	rad
α	Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	der ebene Winkel unter dem die scheinbare Quelle von einem Raumpunkt aus erscheint	rad
C_E	Korrekturfaktor für ausgedehnte Quellen	abhängig von der Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	–
T_2	Zeitparameter, abhängig von der Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle	zur Auswahl des relevanten thermischen Grenzwertes	s
γ	Empfangswinkel	derjenige Winkel, innerhalb dessen ein Strahlungsempfänger anspricht	rad
C_P	$C_P = N^{-0,25}$, Korrekturfaktor für den Fall wiederholt gepulster Laserstrahlung	Reduktionsfaktor für den Einzelimpulsgrenzwert, N ist Anzahl der Impulse	–
T_{\min}	wellenlängenabhängiger Zeitparameter	Zeitdauer, unterhalb derer kürzere Einzelimpulse zu addieren sind	s
NOHD	Augensicherheitsabstand (engl.: nominal ocular hazard distance)	Entfernung, in der die Bestrahlungsstärke oder die Bestrahlung gleich dem entsprechenden Expositionsgrenzwert des Auges ist. Die zugrunde gelegte Zeit, z. B. 0,25 s oder 100 s ist in der Regel mit anzugeben.	m
ENOHD	erweiterter Augensicherheitsabstand (engl.: enlarged nominal ocular hazard distance)	Wie bei NOHD, aber mit der Berücksichtigung der Beobachtung mit vergrößernden optischen Instrumenten.	m
t, Δt	Expositionsdauer	Zeitdauer, die einer Sicherheitsanalyse zugrunde liegt	s

Anlage 2

Messgrößen und Parameter für die Berechnung oder die Messung von Laserstrahlung

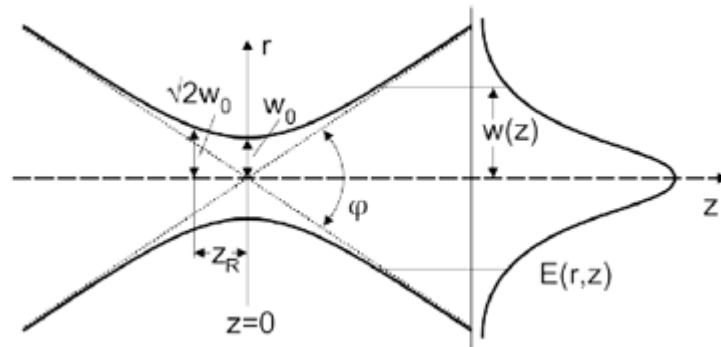
A2.1 Kenngrößen eines (Gauß'schen) Laserstrahls

Zur Charakterisierung eines radialsymmetrischen Laserstrahls, der in seiner Grundmode ein radiales Intensitätsprofil besitzt, das durch eine Gauß'sche Verteilung (Abbildung A2.1) beschrieben werden kann, werden folgende Größen unter Verwendung von Zylinderkoordinaten benötigt:

- Abstand von der Strahltaile (z),
- radiale Koordinate (r),
- die Position der Strahltaile ($z = 0$),

- der Durchmesser der Strahltaile ($d_0 = 2 \cdot w_0$),
- Strahlradius an der Stelle z ($w(z)$), bzw. Strahldurchmesser an der Stelle z ($d(z) = 2 \cdot w(z)$),
- Rayleigh-Länge (z_R),
- die Strahldivergenz oder der Fernfelddivergenzwinkel (ϕ),
- Bestrahlungsstärke $E(r, z)$ an der Stelle r, z .

Abb. A2.1 Propagation eines Gauß'schen Strahls



A2.1.1 Strahldurchmesser und Divergenz

(1) Für den Gauß'schen Strahl der Wellenlänge λ gilt der fundamentale Zusammenhang zwischen Strahldurchmesser in der Strahltaile d_0 und Strahldivergenz im Fernfeld ϕ gemäß Gl. A2.1:

$$d_0 \cdot \phi = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi}$$

(2) Das heißt, das Strahlparameterprodukt (Produkt aus Strahltaillendurchmesser d_0 und Strahldivergenz im Fernfeld (Fernfelddivergenzwinkel) ϕ) hängt nur von der Wellenlänge ab. Eine kleine Strahltaile ist mit einer großen Strahldivergenz verbunden und umgekehrt. Für den Strahldurchmesser $d(z)$ entlang der Ausbreitungsrichtung gilt:

$$d(z) = d_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot \lambda \cdot z}{\pi \cdot d_0^2} \right)^2}$$

(3) Der Übergang zwischen Nah- und Fernfeldbereich des Laserstrahls, d. h. zwischen Orten in der Nähe zur Strahltaile und in großem Abstand davon, wird durch die so genannte Rayleigh-Länge z_R beschrieben. Sie ist als derjenige Abstand von der Strahltaile definiert, bei der sich die Strahlquerschnittsfläche verdoppelt bzw. der Strahldurchmesser um den Faktor $\sqrt{2}$ vergrößert hat. Es gilt:

$$z_R = \frac{d_0}{\phi} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4 \cdot \lambda}$$

(4) Für größere Abstände ($z \gg z_R$) gilt $d(z) = \phi \cdot z$.

A2.1.2 Leistungsdichteverteilung

(1) Die radiale Leistungsdichteverteilung des Laserstrahls $E(r,z)$ für den Abstand z von der Strahltaile wird durch die Funktion

$$E(r,z) = E(0,z) \cdot e^{-\frac{8 \cdot r^2}{d^2(z)}}$$

beschrieben. Dabei ist $E(0,z)$ die Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) auf der optischen Achse, r die radiale Koordinate und $d(z)$ der Strahldurchmesser an der Stelle z :

$$d(z) = 2 \cdot w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2}$$

(2) Der Wert der Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) am Ort $r = d(z)/2$ beträgt:

$$E\left(\frac{d(z)}{2}, z\right) = \frac{E(0,z)}{e^2} \approx 0,14 \cdot E(0,z)$$

Die Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) ist also am Ort des Strahlradius im Vergleich zum Maximalwert auf den $1/e^2$ -Teil abgefallen.

(3) In den sicherheitsrelevanten Normen und Vorschriften wird jedoch eine andere Definition des Strahldurchmessers bzw. des Strahlradius verwendet. Hier bezieht man den Strahldurchmesser d_{63} auf den Abfall der Leistungsdichte auf den $1/e$ -Teil des Maximums, sodass man anstatt Gl. A2.4, die Gleichung

$$E(r,z) = E(0,z) \cdot e^{-\frac{4 \cdot r^2}{d_{63}^2(z)}}$$

zur Berechnung von $E(r,z)$ heranziehen muss.

(4) Daraus folgen die Zusammenhänge zwischen den Strahldurchmessern in den Sicherheitsnormen und anderen Normen der Strahlungsphysik:

$$d_{63}(z) = \frac{d(z)}{\sqrt{2}}$$

Dabei ist d_{63} der Strahldurchmesser, der 63 % der gesamten Strahlungsleistung umfasst. Da die Divergenz des Laserstrahls über den Strahldurchmesser definiert wird, gilt der Zusammenhang aus Gl. A2.8 auch hinsichtlich Angaben bzgl. der Strahldivergenz:

$$\varphi_{63} = \frac{\varphi}{\sqrt{2}}$$

Die Strahldivergenz φ_{63} in sicherheitsrelevanten Normen ist also über diejenige radiale Strahlenbegrenzung im Fernfeld definiert, für die die Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) auf den $1/e$ -Teil (ca. 37 %) abgefallen ist, d. h. die Leistungsdichte hat um etwa 63 % abgenommen.

A2.1.3 Leistung durch eine Blende

(1) Berechnungen bezüglich Expositionsgrenzwerten erfordern häufig die Angabe desjenigen Anteils der Gesamtleistung oder -energie, die in einem spezifizierten Abstand durch eine vorgegebene Blende fällt. Für einen Gauß'schen Strahl kann dieser Anteil, der durch eine kreisförmige Blende des Durchmessers d_B hindurch tritt, durch den Kopplungsparameter η ausgedrückt werden:

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{d_B}{d_{63}}\right)^2}$$

Dabei ist d_{63} der Strahldurchmesser gemessen an den 63 %-Punkten (d. h. 1/e-Punkten) für einen Gauß'schen Strahl im Abstand der Blende.

(2) Der Strahlungsanteil, der durch die Blende hindurch tritt, ist dann

$$P_B = \eta \cdot P$$

oder

$$Q_B = \eta \cdot Q.$$

Hierbei sind P die Gesamtleistung und Q die Gesamtenergie.

(3) Es lässt sich derjenige Leistungsanteil berechnen, der durch eine vorgegebene Blende mit dem Durchmesser d_B fällt:

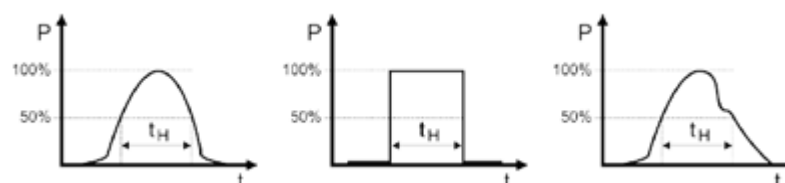
$$P(d_B, z) = P \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{d_B}{d_{63}}\right)^2} \right)$$

Durch eine Blende mit dem Durchmesser $d_B = d/\sqrt{2}$ fällt demnach ein Leistungsanteil von 63 % der Gesamtleistung des Laserstrahls.

A2.2 Größen zur zeitlichen Charakterisierung von Laserstrahlen

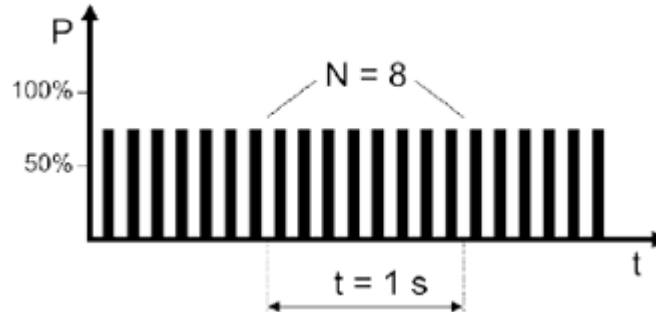
(1) In Abbildung A2.2 wird der zeitliche Verlauf der Laserstrahlung für verschiedene Impulsformen dargestellt. Als Impulsbreite gibt man in der Regel die Halbwertsbreite t_H an.

Abb. A2.2 Impulsdauer t_H für den Fall eines gaußförmigen, eines Rechteck- und eines unregelmäßigen Impulses



(2) Abbildung A2.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistung bei einer regelmäßigen Impulsfolge. Die Impulsfolgefrequenz f_p wird durch die Zahl der Impulse pro Sekunde gegeben.

Abb. A2.3 Impulsfolgefrequenz für einen regelmäßig gepulsten Laser mit $f_p = 8 \text{ Hz}$



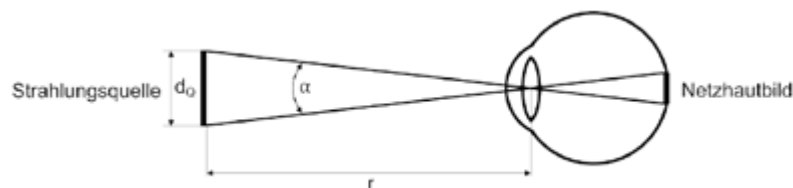
A2.3 Winkelausdehnung α einer scheinbaren Quelle

(1) Die durch einen Strahler bzw. eine diffuse Reflexion erzeugte Bildgröße auf der Netzhaut wird durch die Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle bestimmt (Abbildung A2.4). Für kleine Winkel gilt näherungsweise

$$\alpha = \frac{d_Q}{r},$$

wobei d_Q den Durchmesser der scheinbaren Quelle und r den Abstand zur scheinbaren Quelle darstellt.

Abb. A2.4 Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle



(2) Jeder Blick in einen kollimierten Strahl oder auf eine Laserstrahlungsquelle, die eine Winkelausdehnung von weniger als $\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$ besitzt, wird als „direkter Blick in den Strahl“ oder „Blick auf eine Punktquelle“ bezeichnet. Die beiden Begriffe sind für die Zwecke dieser Betrachtung gleichbedeutend.

(3) Der Übergang zwischen der „Punktquellenbetrachtung“ und dem „Blick auf eine ausgedehnte Quelle“ wird durch den Minimalwinkel $\alpha_{\min} = 1,5 \text{ mrad}$ festgelegt.

(4) Bei rechteckigen oder länglichen Quellen mit einer minimalen Ausdehnung d_{Q1} und einer maximalen Ausdehnung d_{Q2} gilt:

$$d_Q = \frac{d_{Q1} + d_{Q2}}{2} \text{ bzw.}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

Dabei muss beachtet werden, dass der kleinste auftretende Wert α_1 auf den Wert $\alpha_{\min} = 1,5$ mrad gesetzt wird, wenn er kleiner als 1,5 mrad ist. Ebenso wird auch der größte auftretende Wert α_2 auf den Wert von $\alpha_{\max} = 100$ mrad begrenzt, wenn er α_{\max} überschreitet.

A2.4 Grenz-Empfangswinkel γ_p bei fotochemischer Gefährdung

Der Grenz-Empfangswinkel γ_p kann nach Abbildungen A2.5 oder A2.6 festgelegt werden. In Abbildung A2.5 wird der Grenz-Empfangswinkel γ_p durch eine Blende vor der Strahlungsquelle begrenzt. Wird die Strahlungsquelle mit einer Linse auf die Detektorfläche abgebildet, kann der Empfangswinkel durch eine Blende vor dem Detektor begrenzt werden (Abbildung A2.6).

Abb. A2.5 Begrenzung des Empfangswinkels γ_p durch eine Blende vor der Strahlungsquelle

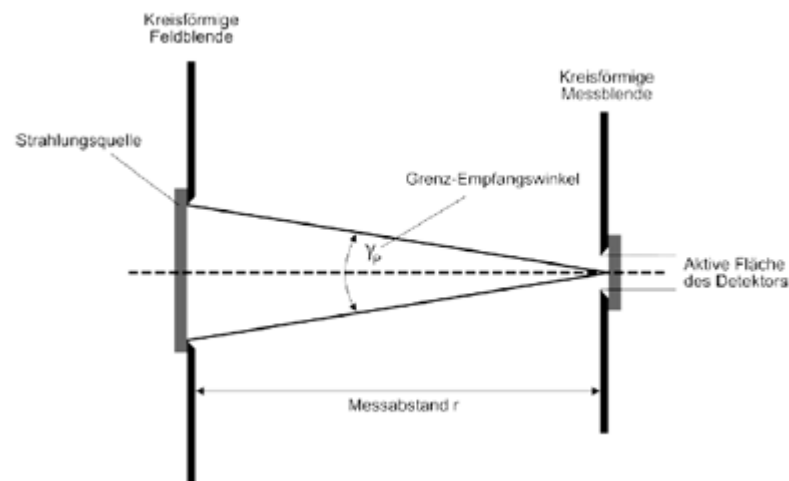
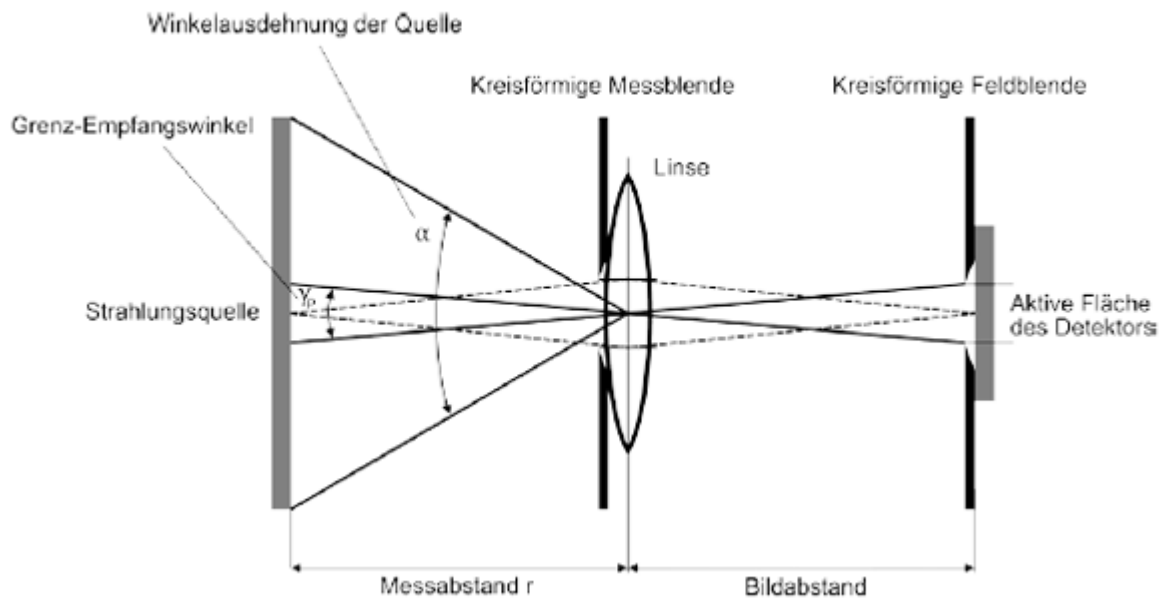


Abb. A2.6 Begrenzung des Empfangswinkels φ_p durch eine Blende vor dem Detektor



A2.5 Augensicherheitsabstand NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance)

A2.5.1 Direkter Laserstrahl

(1) Der Augensicherheitsabstand NOHD stellt die Entfernung von einer Laserstrahlungsquelle dar, bei der die Bestrahlungsstärke oder Bestrahlung unter die Expositionsgrenzwerte fällt.

(2) Bei den folgenden Berechnungen muss eine bestimmte Expositionsdauer angenommen werden. Es handelt sich z. B. um den NOHD-Wert bei 10 s oder NOHD-Wert bei 100 s. Bei den Angaben in Datenblättern und den Vergleichen muss diese Zeit berücksichtigt werden.

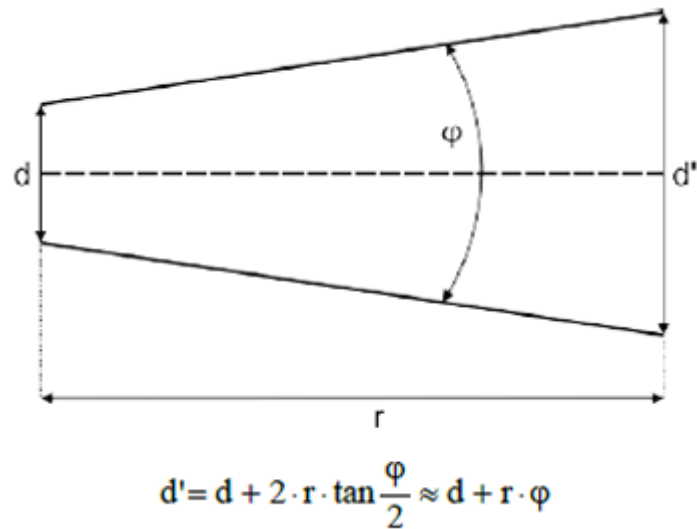
(3) Für üblicherweise kleine Werte der Strahldivergenz ϕ lässt sich die Bestrahlungsstärke E im Fernfeld für den Abstand r (siehe Abbildung A2.7) als

$$E = \frac{4 \cdot P \cdot e^{-\mu r}}{\pi \cdot (d + r \cdot \phi)^2}$$

angeben. Dabei werden d und ϕ an den 1/e-Punkten des Strahlungsprofils gemessen, wobei für das Strahlungsprofil eine Gaußsche Verteilung angenommen wird und es sind:

- r – Abstand vom Laserausgang (außerhalb der Rayleigh-Länge),
- P – Laserleistung,
- μ – Absorptionskoeffizient und
- d – Strahldurchmesser am Laserausgang.

Abb. A2.7 Aufweitung eines Laserstrahls



(4) Der Exponentialfaktor in Gl. A2.17 stellt die durch die Schwächung in der Atmosphäre verursachten Verluste dar und kann vernachlässigt werden, wenn die Sichtweite deutlich größer als der Augensicherheitsabstand ist. Es ergibt sich dann:

$$E = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot (d + r \cdot \varphi)^2}$$

(5) Wenn E durch den Expositionsgrenzwert E_{EGW} ersetzt wird, wird r zum NOHD und die Gleichung kann entsprechend aufgelöst werden:

$$\text{NOHD} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot E_{EGW}} - d}}{\varphi}$$

(6) Da der Strahldurchmesser d am Laserausgang in der Regel sehr klein bezogen auf das Ergebnis des Wurzelausdrucks ist, kann er für eine einfache Abschätzung zur sicheren Seite hin entfallen.

$$\text{NOHD} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot E_{EGW}}}}{\varphi}$$

(7) Diese Gleichung zeigt, dass bei 100-facher Leistung der NOHD um den Faktor 10 zunimmt, und bei Verringerung der Strahldivergenz um den Faktor 100, erhöht sich auch der NOHD um den Faktor 100.

(8) Wenn die Schwächung durch atmosphärische Absorption berücksichtigt werden soll, kann Gl. A2.17 nicht elementar nach r aufgelöst werden. Die folgende Gleichung gibt jedoch ein Ergebnis wieder, das auf der sicheren Seite liegt:

$$\text{NOHD}_\mu = 0,5 \cdot \text{NOHD} \cdot (1 + e^{-\mu \cdot \text{NOHD}})$$

Dabei ist NOHD_μ der Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung von Abschwächung durch die Atmosphäre und NOHD der Abstand in Meter, der sich durch Anwendung von Gl. A2.19 ergibt. Alternativ kann NOHD_μ auch iterativ aus Gl. A2.17 ermittelt werden.

(9) Einen zuverlässigen Schätzwert für μ , den Schwächungskoeffizienten durch atmosphärische Absorption, kann man aus folgender Gleichung gewinnen:

$$\mu = \frac{3,91}{V} \cdot \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^A \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

Dabei ist

V – Sichtweite in km,

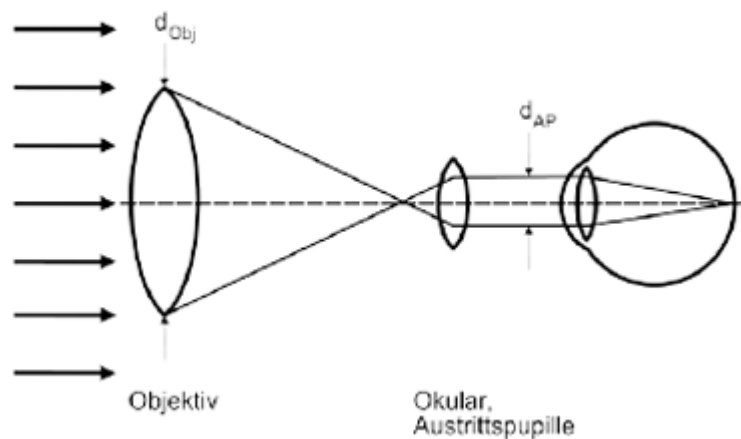
λ – Wellenlänge in μm ($0,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 2 \mu\text{m}$) und

$A = 0,585 \cdot \sqrt{0,33}$.

A2.5.2 Erweiterter Augensicherheitsabstand ENOHD bei Verwendung optischer Instrumente

(1) Wenn beim Blick in Laserstrahlung im Wellenlängenbereich der Netzhautgefährdung optische Instrumente (Fernrohre, Ferngläser usw.) verwendet werden (Abbildung A2.8), ist es notwendig, den Augensicherheitsabstand NOHD zu vergrößern, um der Zunahme der auf das Auge einwirkenden Strahlung Rechnung zu tragen.

Abb. A2.8 Sammelnde Wirkung eines Fernrohrs



(2) Unter der Bedingung, dass der Durchmesser des Strahlenbündels größer als der Objektivdurchmesser d_{Obj} und der Durchmesser der Austrittspupille d_{AP} größer als der Durchmesser der Messblende d_{M} ist ($d_{\text{AP}} > d_{\text{M}}$), gilt näherungsweise:

$$\text{ENOHD} = \text{NOHD} \cdot M$$

Dabei ist ENOHD erweiterter Augensicherheitsabstand und M die Vergrößerung des Instruments, die sich folgendermaßen berechnet:

$$M = \frac{d_{Obj}}{d_{AP}}$$

(3) Für den Fall, dass der Durchmesser der Austrittspupille d_{AP} kleiner als der Durchmesser der Messblende d_M ist ($d_{AP} < d_M$), gilt

$$ENOHD = NOHD \cdot G$$

mit

$$G = \frac{d_{Obj}}{d_M}$$

Wenn daher G kleiner als M ist, wird im Fall von Gleichung A2.23 der ENOHD kleiner.

Hinweis:

Die Bestimmung des NOHD hängt von einer Reihe zusätzlicher Parameter ab:

- Der NOHD wird nach dem beschriebenen Verfahren von einem Bezugspunkt z. B. von der Strahltaile und nicht zwangsläufig von der Austrittsöffnung des Lasers an gerechnet. Der Abstand von der Strahlaustrittsöffnung bis zur Strahltaile kann, wenn nicht bekannt, nach Anlage 3 ermittelt werden und ist zum NOHD hinzuzurechnen.
- Von einer Vergrößerungswirkung optischer Geräte, die für die Beobachtung bei Tag konzipiert sind, kann, abgesehen von solchen mit Spiegelsystem, nicht ausgegangen werden, wenn die Wellenlänge kleiner als 302,5 nm oder größer als 4000 nm ist. Die Transmission der dafür geeigneten Gläser ist bei diesen Wellenlängen so niedrig, dass eine effektive Vergrößerungswirkung nicht entsteht.

Beispiel 1:

Ein Laser mit einem Gauß'schen Strahlprofil hat eine Emissionsleistung von $P = 4 \text{ W}$, eine Strahldivergenz von $\phi = 0,7 \text{ mrad}$ und einen Durchmesser des austretenden Strahlenbündels von $d = 1 \text{ mm}$. Berechne den Sicherheitsabstand NOHD, wenn der entsprechende Expositionsgrenzwert $E_{EGW} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ beträgt und eine vernachlässigbare atmosphärische Schwächung angenommen wird.

Lösung:

Die Anwendung von Gl. A2.19 ergibt:

$$\text{NOHD} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 4 \text{ W}}{\pi \cdot 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} - 0,001 \text{ m}}}{0,7 \cdot 10^{-3} \text{ rad}} = 1,018 \text{ km}$$

Beispiel 2:

Dem Laser aus Beispiel 1 wird eine strahlaufweitende Optik vorgesetzt. Diese verringert die Strahldivergenz auf $\phi = 0,1 \text{ mrad}$ und vergrößert den Durchmesser des Strahlenbündels am Austritt auf $d = 7 \text{ mm}$. Berechne den neuen Sicherheitsabstand NOHD.

Lösung:

Der NOHD ist:

$$\text{NOHD} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 4 \text{ W}}{\pi \cdot 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} - 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}}}{0,1 \cdot 10^{-3} \text{ rad}} = 7,068 \text{ km}$$

Man beachte die Bedeutung der Strahldivergenz für die Größe des NOHD. Man beachte ferner, dass in diesem Beispiel der Durchmesser d des austretenden Strahlenbündels vernachlässigt werden kann.

Beispiel 3:

Der Laser aus Beispiel 1 wird mit einem Fernglas 8 x 30 beobachtet, es wird also mit einem Fernglas in die Austrittsöffnung des Lasers geblickt. Das Fernglas hat eine achtfache Vergrößerung und einen Objektivdurchmesser von 30 mm. Berechne den erweiterten Augensicherheitsabstand ENOHD.

Lösung:

Bei Anwendung der Gleichung A2.23 und des Vergrößerungsfaktors M ergibt sich:

$$\text{ENOHD} = 1,018 \text{ km} \cdot 8 = 8,144 \text{ km}$$

Bei Anwendung des Vergrößerungsfaktors G ergibt sich für eine Laserwellenlänge von 1064 nm mit

$$\text{ENOHD} = 1,018 \text{ km} \cdot \frac{30 \text{ mm}}{7 \text{ mm}} = 4,363 \text{ km}$$

ein deutlich niedrigerer Wert. Dieser Wert darf verwendet werden, da der Durchmesser der Austrittspupille

$$d_{\text{AP}} = \frac{30 \text{ mm}}{8} = 3,75 \text{ mm}$$

kleiner als der der Messblende von $d_{\text{M}} = 7 \text{ mm}$ ist.

Hinweis:

Der eingesetzte NOHD aus Gl. A2.23 darf nur übernommen werden, wenn der darin eingesetzte Strahldurchmesser sehr klein (deutlich kleiner als die Messblende) oder 0 ist. Liegt eine Strahltaile außerhalb der Strahlaustrittsöffnung vor, so ist der Abstand bis zur Strahltaile dem ENOHD hinzuzurechnen.

A2.6 Emission aus Lichtwellenleitern – Durchmesser des divergenten Strahls

(1) Die Abstrahlung von Lichtwellenleitern wird üblicherweise durch die so genannte numerische Apertur NA charakterisiert. Diese bezeichnet den Sinus des halben Divergenzwinkels $\phi_{5/2}$ der Abstrahlcharakteristik, gemessen bei den Punkten mit 5 % der Spitzenbestrahlungsstärke:

$$NA = \sin \frac{\phi_5}{2} \text{ bzw. } \frac{\phi_5}{2} = \arcsin NA$$

(2) Für einen Strahl mit Gauß'scher Strahlcharakteristik enthält der Strahldurchmesser, der auf den 5 %-Wert der maximalen Bestrahlungsstärke bezogen ist, 95 % der gesamten Leistung oder Energie. Der Strahldurchmesser d_{95} im Abstand a von der Quelle wird berechnet zu

$$d_{95} = d_F + 2 \cdot a \cdot \tan \frac{\varphi_5}{2} = d_F + 2 \cdot a \cdot \tan(\arcsin NA)$$

(3) Wenn der Durchmesser der emittierenden Faser d_F in der Größenordnung kleiner als $150 \mu\text{m}$ ist, kann er in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Außerdem wird für Sicherheitsberechnungen der Durchmesser mit 63 % der Gesamtleistung verwendet. Der Umrechnungsfaktor für den Gauß'schen Strahl ist $d_{95}/d_{63} = 1,7$. Daher ergibt sich der Strahldurchmesser näherungsweise zu:

$$d_{63} = \frac{d_{95}}{1,7} = \frac{2 \cdot a \cdot \tan(\arcsin NA)}{1,7} \approx \frac{2 \cdot a \cdot NA}{1,7}$$

(4) Die abstandsabhängige Leistungsdichte (Bestrahlungsstärke) für einen Einmoden-Lichtwellenleiter (SM-LWL, SM von „single-mode“) beträgt:

$$E = \frac{P}{d_{63}^2 \cdot \frac{\pi}{4}} = \frac{1,7^2 \cdot P}{\pi \cdot a^2 \cdot NA^2} = 0,92 \cdot \frac{P}{a^2 \cdot NA^2}$$

(5) Ein Einmoden-Lichtwellenleiter ist ein spezieller Fall einer Punktlichtquelle. Die Strahldivergenz eines SM-LWL wird durch den Durchmesser des Modenfeldes ω_0 und die Wellenlänge λ der Quelle bestimmt. Der Strahldurchmesser eines SM-LWL wird im Abstand a angenähert durch:

$$d_{63}(\text{SM}) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot \lambda}{\pi \cdot \omega_0}$$

Anlage 3 Beschreibung von Messgeräten

A3.1 Detektoren für Laserstrahlung

(1) Messungen der Strahlungsleistung werden meist an Dauerstrichlasern, Messungen der Strahlungsenergie an gepulsten Lasern ausgeführt.

(2) Die am häufigsten eingesetzten Detektoren sind Si-Detektoren im sichtbaren Spektralbereich (fotoelektrischer Effekt), pyroelektrische Empfänger im sichtbaren und infraroten Spektralbereich (hauptsächlich zum Nachweis gepulster oder modulierter Strahlung) und sogenannte Thermosäulen. Die letzteren beiden Detektorarten können in einem großen Spektralbereich eingesetzt werden. Tabelle A3.1 gibt einen groben Überblick über einige Detektorarten und die jeweiligen Haupteinsatzbereiche.

Tab. A3.1 Detektoren zur Leistungs- und Energiemessung

Detektor	Wellenlängenbereich in μm
Photomultiplier	0,18–0,9
Si	0,2–1,1

InGaAs	0,9-1,6 (2,6)
PbS	0,8-3,0
InSb	1-5,5
HgCdTe	2-15
Pyroelektrische Empfänger	0,2-20
Thermosäule	0,2-20

(3) Empfänger für optische Strahlung müssen für ihre Messaufgabe kalibriert sein.

A3.2 Messverfahren zur Bestimmung der Strahlcharakteristik von Laserstrahlen

(1) In DIN EN ISO 11146 [(8), (9)] werden drei alternative Prüfverfahren zur Bestimmung der Strahlparameter beschrieben. Es sind die des Verfahrens der variablen Apertur (Abbildung A3.1), die Messung nach dem Prinzip der bewegten Messerschneide (Abbildung A3.2) und das Verfahren des bewegten Schlitzes (Abbildung A3.3).

Abb. A3.1 Prinzip des Verfahrens der variablen Apertur

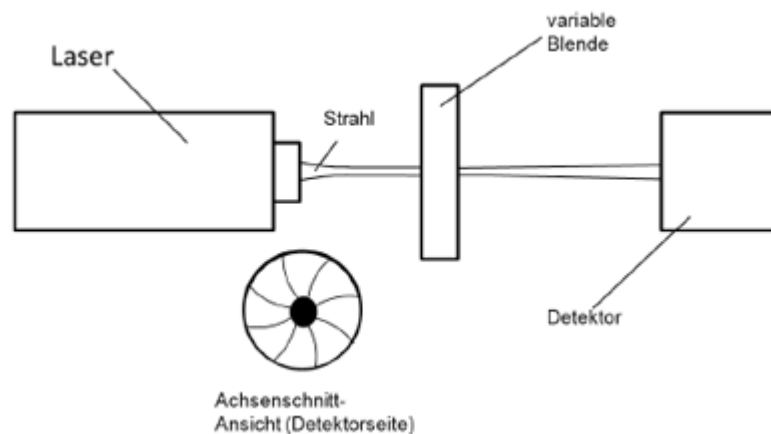


Abb. A3.2 Prinzip der Methode der bewegten Messerschneide

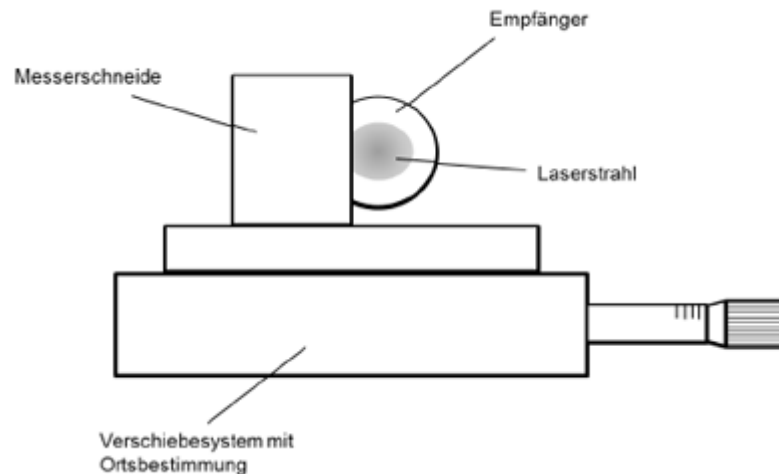
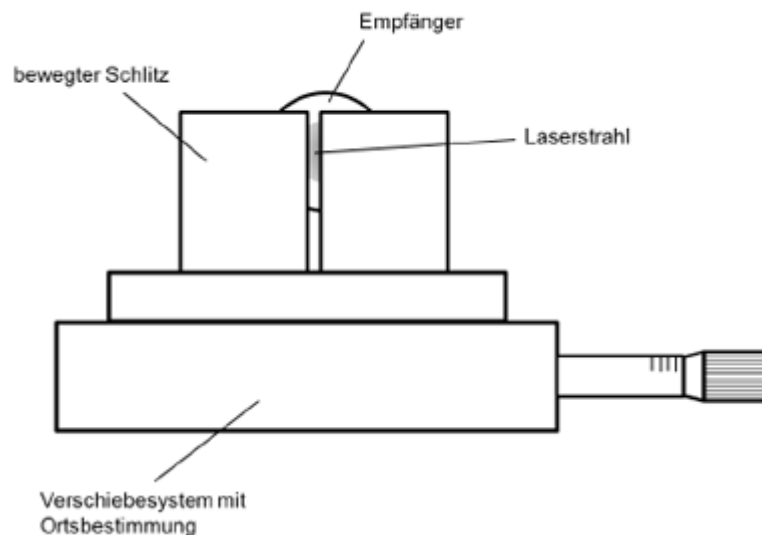


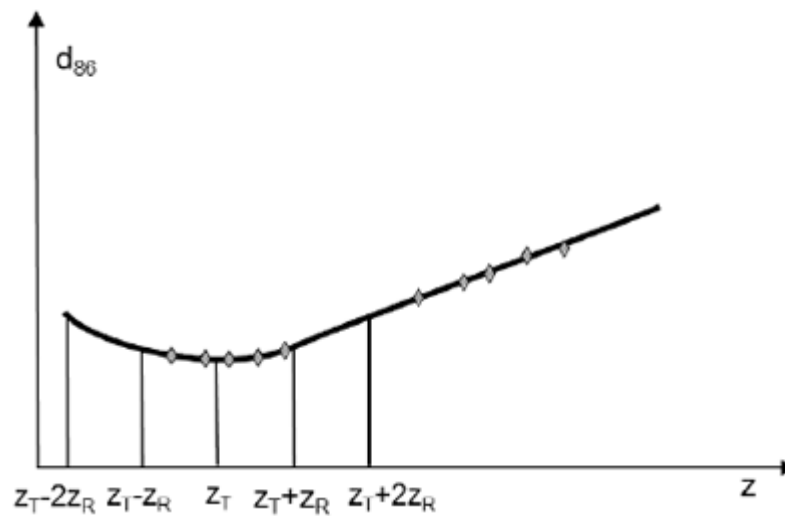
Abb. A3.3 Prinzip der Methode des bewegten Schlitzes



(2) Es werden dabei jeweils ortsabhängige Messungen des Strahldurchmessers d durchgeführt. Bei der ersten Methode wird d durch Messungen der Laserleistung bei verschiedenen Durchmessern der Blende bestimmt, während er bei den anderen Verfahren aus Leistungsmessungen in Abhängigkeit der transversalen Verschiebung der Schneide oder des Schlitzes erfolgt. Je nach Wahl des Verfahrens müssen bestimmte Randbedingungen eingehalten und Korrekturen vorgenommen werden. Moderne, automatisch arbeitende Systeme mit Bildverarbeitung, die die Messbedingungen der Norm einhalten, sind kommerziell erhältlich.

(3) Die obige Norm sieht bei frei zugänglichen Strahltaillen mindestens zehn Messungen zur Auswertung vor. Dabei sollen etwa die Hälfte in der Nähe der Strahltaille bis zu einem Abstand von plus oder minus einer Rayleigh-Länge z_R erfolgen und die andere Hälfte in Abständen größer als zwei Rayleigh-Längen von der Taile (Abbildung A3.4). Ist die Strahltaille nicht zugänglich, muss das Verfahren auf eine künstlich erzeugte Taile angewendet werden.

Abb. A3.4 Bestimmung der Strahlparameter durch ortsabhängige Messung des Strahlquerschnitts



(4) Aus einer parabolischen Anpassung der gemessenen Strahldurchmesser d gemäß

$$d^2(z) = A + B \cdot z + C \cdot z^2$$

können dann die Strahlparameter d_0 und ϕ_0 gewonnen werden. Bei den Größen A , B und C handelt es sich um Fit-Parameter der parabolischen Anpassung.

(5) So ergibt sich der Strahldurchmesser in der Strahltaile d_0 zu

$$d_0 = \sqrt{A - \frac{B^2}{4 \cdot C}}$$

(6) Die Strahldivergenz (Fernfeldöffnungswinkel, Divergenzwinkel) ϕ_0 , insbesondere bei nicht zugänglichen Strahltaillen, kann nach obiger Norm bestimmt werden, indem ein fokussierendes Objekt der Brennweite f in den Strahlengang gebracht wird. Dies führt zur Bildung einer künstlichen Strahltaile. Der Durchmesser d_0 wird nach Gleichung A3.2 bestimmt. Damit kann die Strahldivergenz des freien Laserstrahls berechnet werden:

$$\phi_0 = \frac{d_0}{f}$$

Anlage 4 Expositionsgrenzwerte

A4.1 Expositionsgrenzwerte für Laserstrahlung

(1) Die biophysikalisch relevanten Expositionswerte für Laserstrahlung lassen sich anhand der nachstehenden Formeln bestimmen. Welche Formel zu verwenden ist, hängt von der Wellenlänge und der Expositionsdauer ab.

Die Ergebnisse sind mit den entsprechenden Expositionsgrenzwerten¹⁾ (EGW) der Tabellen A4.3 bis A4.5 zu vergleichen. Für die jeweilige Laserstrahlenquelle können mehrere Expositionsgrenzwerte relevant sein.

(2) Die in den Tabellen A4.3 bis A4.5 als Berechnungsfaktoren verwendeten Koeffizienten sind in Tabelle A4.6, die Korrekturfaktoren für wiederholte Exposition sind in Tabelle A4.7 aufgeführt.

$$E = \frac{dP}{dA} \text{ in } W \cdot m^{-2}$$

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E(t) \cdot dt \text{ in } J \cdot m^{-2}$$

P	Leistung, ausgedrückt in Watt (W);
A	Fläche, ausgedrückt in Quadratmeter (m ²);
E, E(t)	Bestrahlungsstärke oder Leistungsdichte: die auf eine Fläche einfallende Strahlungsleistung je Flächeneinheit, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter (W · m ⁻²); die Werte E und E(t) werden aus Messungen gewonnen oder können vom Hersteller der Arbeitsmittel angegeben werden;
H	Bestrahlung: das Integral der Bestrahlungsstärke über die Zeit, ausgedrückt in Joule pro Quadratmeter (J · m ⁻²);
t	Zeit, Expositionsdauer: Δt = t ₂ -t ₁ , ausgedrückt in Sekunden (s);
λ	Wellenlänge, ausgedrückt in Nanometern (nm);
γ	Empfangswinkel: der ebene Winkel, innerhalb dessen ein Empfänger auf optische Strahlung anspricht, auch Gesichtsfeld genannt, ausgedrückt in Milliradian (mrad);
γ _P	Grenz-Empfangswinkel, ausgedrückt in Milliradian (mrad);
D	Durchmesser der Messblende; die Messblende ist die kreisförmige Fläche mit dem Durchmesser D, über die Bestrahlungsstärke und Bestrahlung gemittelt werden;
α	Winkelausdehnung einer Quelle, ausgedrückt in Milliradian (mrad);
L, L(t)	Strahldichte der Quelle, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter pro Steradian (W · m ⁻² · sr ⁻¹);
G	integrierte Strahldichte: das Integral der Strahldichte über eine bestimmte Expositionsdauer, ausgedrückt in Joule pro Quadratmeter pro Steradian (J · m ⁻² · sr ⁻¹); Strahlungsenergie je Flächeneinheit einer Abstrahlfläche je Einheitsraumwinkel der Emission.

Tab. A4.1 Zuordnung der Tabellen für die Expositionsgrenzwerte zu den Wellenlängenbereichen

Wellenlänge λ in nm	Wellenlängenbereich	Betroffenes Organ	Tabelle für die Expositionsgrenzwerte
100 ¹⁾ –400	UV	Auge	A4.3, A4.5
		Haut	A4.5

1) Grenzwerte für die Einwirkung von Laserstrahlung auf Personen sind als Expositionsgrenzwerte festgelegt.

1) Nach § 2 „Begriffsbestimmungen“ der OStrV ist der Wellenlängenbereich der optischen Strahlung auf 100 nm bis 1 mm festgelegt.

400-600	sichtbar	Auge	A4.4
400-700	sichtbar	Auge	A4.3, A4.4
		Haut	A4.5
700-1400	IR-A	Auge	A4.3, A4.4
		Haut	A4.5
1400-10 ⁶	IR-B,IR-C	Auge	A4.3, A4.4
		Haut	A4.5

Tab. A4.2 Akute und Langzeitwirkungen von Laserstrahlung

Wellenlänge λ/nm	Wellenlängen- bereich	Betroffenes Organ	Schädigung
100 ¹⁾ -400	UV	Auge	Hornhautentzündung Bindehautentzündung Grauer Star
		Haut	fotosensitive Reaktionen Hautrötung Verstärkte Pigmentierung Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Verbrennung der Haut Hautkrebs
400-600	sichtbar	Auge	fotochemische Netzhautschädigung
400-700	sichtbar	Auge	Netzhautschädigung
		Haut	fotosensitive Reaktionen Verbrennung der Haut
700-1400	IR-A	Auge	Grauer Star Verbrennung der Netzhaut
		Haut	Verbrennung der Haut
1400-2600	IR-B	Auge	Grauer Star Verbrennung der Hornhaut
2600-10 ⁶	IR-C	Auge	Verbrennung der Hornhaut
1400-10 ⁶	IR-B, IR-C	Haut	Verbrennung der Haut

Tab. A4.3 Expositionsgrenzwerte für die Einwirkung von Laserstrahlung auf das Auge, kurze Expositionsdauer ($t < 10$ s)

Wellenlänge λ in nm (siehe a)	Durchmesser der Messblende D	Expositionsdauer t in s																																																																																																								
		$10^{-13} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$																																																																																																		
UV-C	100 ¹⁾ - 280	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$																																																																																																								
UV-B	280 - 302								$H = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$																																																																																																	
	303															$H = 40 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ s}$																																																																																										
	304																						$H = 60 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$																																																																																			
	305																													$H = 100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}$																																																																												
	306																																				$H = 160 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}$																																																																					
	307																																											$H = 250 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 4,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$																																																														
	308																																																		$H = 400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ s}$																																																							
	309																																																									$H = 630 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$																																																
	310																																																																$H = 1000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}$																																									
	311																																																																							$H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}$																																		
	312																																																																														$H = 2,5 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ s}$																											
	313																																																																																					$H = 4,0 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 2,6 \cdot 10^{-1} \text{ s}$																				
	314																																																																																												$H = 6,3 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, für $t < 1,6 \text{ s}$													
	UV-A																																																																																																			315 - 400	$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$					

Wellenlänge λ in nm (siehe a)	Durchmesser der Messblende D	Expositionsdauer t in s							
		$10^{-13} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$	
Sichtbar und IR-A	7 mm	400 – 700	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 18 t^{0,75} C_E \text{ J m}^{-2}$			
		700 – 1050	$H = 1,5 \cdot 10^{-4} C_A C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^4 t^{0,75} C_A C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-3} C_A C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 18 t^{0,75} C_A C_E \text{ J m}^{-2}$			
		1050 – 1400	$H = 1,5 \cdot 10^{-3} C_C C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 2,7 \cdot 10^5 t^{0,75} C_C C_E \text{ J m}^{-2}$	$H = 5 \cdot 10^{-2} C_C C_E \text{ J m}^{-2}$		$H = 90 t^{0,75} C_C C_E \text{ J m}^{-2}$		
IR-B und IR-C	siehe c	1400 – 1500	$E = 10^{12} \text{ W m}^{-2}$		$H = 10^3 \text{ J m}^{-2}$			$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$	
		1500 – 1800	$E = 10^{13} \text{ W m}^{-2}$		$H = 10^4 \text{ J m}^{-2}$				
		1800 – 2600	$E = 10^{12} \text{ W m}^{-2}$		$H = 10^3 \text{ J m}^{-2}$			$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$	
		2600 – 10 ⁵	$E = 10^{11} \text{ W m}^{-2}$		$H = 100 \text{ J m}^{-2}$	$H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$			

a Sind für eine Wellenlänge zwei Expositionsgrenzwerte aufgeführt, so ist unter Einbeziehung der zugeordneten Messverfahren das Ergebnis anzuwenden, welches den strengeren Wert darstellt.
 Expositionsgrenzwerte für Zeiten unterhalb 10^{-13} s werden dem jeweiligen Expositionsgrenzwert bei 10^{-13} s, ausgedrückt in Einheiten der Bestrahlungsstärke, gleichgesetzt.

b Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für einzelne Laserimpulse. Bei mehrfachen Laserimpulsen müssen die Laserimpulsdauern, die innerhalb der Expositionsdauer t liegen, addiert werden. Die daraus resultierende Expositionsdauer muss in die Formel $H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$ für t eingesetzt werden.

c Wenn $1400 \text{ nm} \leq \lambda < 10^5 \text{ nm}$, dann gilt:
 - für $t \leq 0,35 \text{ s}^{2)}$, $D = 1 \text{ mm}$
 - für $0,35 \text{ s} < t < 10 \text{ s}$, $D = 1,5 \cdot t^{0,375} \text{ mm}$.
 Wenn $10^5 \text{ nm} \leq \lambda < 10^6 \text{ nm}$, dann ist $D = 11 \text{ mm}$.

- Nach § 2 „Begriffsbestimmungen“ der OStrV ist der Wellenlängenbereich der optischen Strahlung auf 100 nm bis 1 mm festgelegt.
- Der Anfangspunkt der Funktion wurde – zur sicheren Seite hin – von 0,3 s auf 0,35 s verschoben, um eine bessere Anpassung zwischen variabler und fester Messblende zu erreichen. Zur Vereinfachung kann ein Durchmesser der Messblende von 1 mm verwendet werden.
- Der Anfangspunkt der Funktion wurde – zur sicheren Seite hin – von 0,3 s auf 0,35 s verschoben, um eine bessere Anpassung zwischen variabler und fester Grenzblende zu erreichen.

Tab. A4.4 Expositionsgrenzwerte für die Exposition des Auges durch Laserstrahlung, lange Expositionsdauer ($t \geq 10$ s)

Wellenlänge λ in nm (siehe a)	Durchmesser der Messblende D in mm	Expositionsdauer in s		
		$10 - 10^2$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 3 \cdot 10^4$
UV-C	100 ¹⁾ – 280		30	
UV-B	3,5	280 – 302	30	
		303	40	
		304	60	
		305	100	
		306	160	
		307	250	
		308	400	
		309	630	
		310	1000	
		311	1600	
		312	2500	
		313	4000	
314	6300			
UV-A	315 – 400		10000	

Wellenlänge λ in nm (siehe a)	Durchmesser der Messblende D in mm	Expositionsdauer in s		
		$10 - 10^2$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 3 \cdot 10^4$
Sichtbar	400 – 600 Fotochemische Netzhautschädigung (siehe b)	$H = 100 \cdot C_B \cdot J \cdot m^{-2}$; $\gamma = 11$ mrad (siehe c)	$E = 1 \cdot C_B \cdot W \cdot m^{-2}$; $\gamma = 1,1 \cdot t^{0,5}$ mrad (siehe c)	$E = 1 \cdot C_B \cdot W \cdot m^{-2}$; $\gamma = 110$ mrad (siehe c)
	400 – 700 Thermische Netzhautschädigung (siehe b)	$\alpha \leq 1,5$ mrad $\alpha > 1,5$ mrad und $t \leq T_2$ $\alpha > 1,5$ mrad und $t > T_2$	$E = 10 \cdot W \cdot m^{-2}$ $H = 18 \cdot C_E \cdot t^{0,75} \cdot J \cdot m^{-2}$ $E = 18 \cdot C_E \cdot T_2^{-0,25} \cdot W \cdot m^{-2}$	
IR-A	700 – 1400	$\alpha \leq 1,5$ mrad $\alpha > 1,5$ mrad und $t \leq T_2$ $\alpha > 1,5$ mrad und $t > T_2$	$E = 10 \cdot C_A \cdot C_C \cdot W \cdot m^{-2}$ $H = 18 \cdot C_A \cdot C_C \cdot C_E \cdot t^{0,75} \cdot J \cdot m^{-2}$ $E = 18 \cdot C_A \cdot C_C \cdot C_E \cdot T_2^{-0,25} \cdot W \cdot m^{-2}$ (maximal $1000 \cdot W \cdot m^{-2}$)	
IR-B und IR-C	1400 – 10^5 10 ⁵ – 10^6	3,5 11	$E = 1000 \cdot W \cdot m^{-2}$	

a Sind für eine Wellenlänge zwei Expositionsgrenzwerte aufgeführt, so ist unter Einbeziehung der zugeordneten Messverfahren das Ergebnis anzuwenden, welches den strengeren Wert darstellt.

b Bei kleinen Quellen mit einer Winkelausdehnung $\alpha \leq 1,5$ mrad sind statt der beiden Expositionsgrenzwerte E für Wellenlängen von 400 nm bis 600 nm nur die thermischen Expositionsgrenzwerte für $10 \text{ s} \leq t < T_1$ und die fotochemischen Expositionsgrenzwerte für längere Zeiten anzuwenden. Zu T_1 und T_2 siehe Tabelle A4.6. Der Expositionsgrenzwert für fotochemische Netzhautschädigung kann auch als Integral der Strahlendichte über die Zeit ausgedrückt werden, wobei für $10 \text{ s} \leq t \leq 10\,000 \text{ s}$, $G = 10^6 \cdot C_B \cdot J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$, und für $t > 10\,000 \text{ s}$, $L = 100 \cdot C_B \cdot W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ gilt. Zur Messung von G und L ist γ_p als Mittelung des Empfangswinkels zu verwenden.

c Für Messungen des Expositionswertes ist γ_p wie folgt zu berücksichtigen:
 - Wenn $\alpha > \gamma$, dann $\gamma = \gamma_p$. Bei Verwendung eines größeren Empfangswinkels würde die Gefährdung überbewertet.
 - Wenn $\alpha < \gamma$, dann muss γ die betrachtete Quelle voll erfassen. Er ist ansonsten jedoch nicht beschränkt und kann größer sein als γ_p .

1. Nach § 2 „Begriffsbestimmungen“ der OStrV ist der Wellenlängenbereich der optischen Strahlung auf 100 nm bis 1 mm festgelegt.
2. redaktionelle Änderung
3. redaktionelle Änderung

Tab. A4.5 Expositionsgrenzwerte für die Exposition der Haut durch Laserstrahlung

Wellenlänge λ in nm (siehe a)		Durchmesser der Messblende D	Expositionsdauer i in s					
			$<10^{-9}$	$10^{-9}-10^{-7}$	$10^{-7}-10^{-3}$	$10^{-3}-10$	$10-10^3$	$10^3-3 \cdot 10^4$
UV (A, B, C)	100 ¹⁾ -400	3,5 mm	$E = 3 \cdot 10^{10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	Gleiche Werte wie Expositionsgrenzwerte für das Auge				
sichtbar und IR-A	400-700		$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	$H = 200 \cdot CA \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$H = 1,1 \cdot 10^4 \cdot CA \cdot t, 0,25 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$	$E = 2 \cdot 10^3 \cdot CA \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$		
	700-1400		$E = 2 \cdot 10^{11} \cdot CA \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$					
IR-B und IR-C	1400-1500		$E = 10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	Gleiche Werte wie Expositionsgrenzwerte für das Auge (siehe b)				
	1500-1800		$E = 10^{13} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$					
	1800-2600		$E = 10^{12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$					
	2600-10 ⁶		$E = 10^{11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$					
a	Sind für eine Wellenlänge zwei Expositionsgrenzwerte aufgeführt, so ist unter Einbeziehung der zugeordneten Messverfahren das Ergebnis anzuwenden, welches den strengeren Wert darstellt.							
b	Für Expositionsdauern $t > 10 \text{ s}$ gilt:							
-	Für bestrahlte Hautflächen $A_H > 0,1 \text{ m}^2$ beträgt der Expositionsgrenzwert $E = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.							
-	Für Flächen von $0,01 \text{ m}^2$ bis $0,1 \text{ m}^2$ verändert sich der Expositionsgrenzwert umgekehrt proportional zur bestrahlten Hautfläche: $E = 10 \text{ W}/A_H$.							

Tab. A4.6 Korrekturfaktoren und sonstige Berechnungsparameter

Parameter	Gültiger Spektralbereich λ in nm	Wert
C _A	< 700	1
	700-1050	$10^{0,002(\lambda-700)}$
	1050-1400	5
C _B	400-450	1
	450-600	$10^{0,02(\lambda-450)}$
C _C	700-1150	1
	1150-1200	$10^{0,018(\lambda-1150)}$
	1200-1400	8
T ₁	< 450	10 s
	450-500	$10 \cdot 10^{0,02(\lambda-450)} \text{ s}$
	> 500	100 s

Parameter	Biologische Wirkung	Wert
α_{\min}	alle thermischen Wirkungen	1,5 mrad

Parameter	Winkelausdehnung in mrad	Wert
C _E	$\alpha \leq \alpha_{\min}$	1
	$\alpha_{\min} < \alpha \leq 100$	α/α_{\min}
	$\alpha > 100$	$\alpha_{\max}/\alpha_{\min}$ bei $\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$
T ₂	$\alpha \leq 1,5$	10 s
	$1,5 < \alpha \leq 100$	$10 \cdot 10^{[(\alpha-1,5)/98,5]} \text{ s}$
	$\alpha > 100$	100 s

Parameter	Expositionsdauer t in s	Wert in mrad
YP	$t \leq 100$	11
	$100 < t \leq 10^4$	$1,1 \cdot t^{0,5}$
	$t > 10^4$	110

Hinweis:

Die Parameter C_E und T_2 gelten nur für den Wellenlängenbereich $400 \text{ nm} < \lambda \leq 1400 \text{ nm}$

Tab. A4.7 Korrektur bei wiederholter Exposition (Impulsfolgen)

Gültiger Spektralbereich in nm	T_{\min} in s
$315 < \lambda \leq 400$	10^{-9}
$400 < \lambda \leq 1050$	$18 \cdot 10^{-6}$
$1050 < \lambda \leq 1400$	$50 \cdot 10^{-6}$
$1400 < \lambda \leq 1500$	10^{-3}
$1500 < \lambda \leq 1800$	10^1
$1800 < \lambda \leq 2600$	10^{-3}
$2600 < \lambda \leq 10^6$	10^{-7}

(3) Jede der drei folgenden Regeln ist bei allen Expositionen anzuwenden, die bei wiederholt gepulster oder modulierter Laserstrahlung auftreten. Der restriktivste Wert, der sich im Vergleich mit den Strahlungsdaten, ermittelt nach der jeweiligen Messbedingung, ergibt, ist auszuwählen.

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

(4) Um zu prüfen, ob bei einer vorgegebenen Wiederholfrequenz Impulse zusammenzufassen sind, kann der zeitliche Abstand ΔT zwischen zwei Impulsen wie folgt aus der Impulswiederholfrequenz f_p des Lasers berechnet werden:

$$\Delta T = \frac{1}{f_P}$$

(5) Zum Vergleich kann der Wert für T_{\min} aus Tabelle A4.7 entnommen werden.

Beispiel:

Hat man Impulse mit einer Impulsdauer kleiner als $18 \mu\text{s}$ (gilt für 400 nm bis 1050 nm), so können diese zu Impulsen $T = 18 \mu\text{s}$ zusammengefasst werden. Es ergibt sich dann die neue Impulszahl N bei einer Zeitbasis von 100 s ($18 \mu\text{s}$, 100 s Zeitbasis).

$$N = \frac{100\text{s}}{18 \cdot 10^{-6}\text{s}} = 5\,500\,000.$$

Hinweis 1¹ :

Impulse im Sinne dieser Anlage sind Impulse mit den Impulsdauern von $\leq 0,25$ s.

Hinweis 2² :

Die maximale Zeit T , für die die Impulszahl N ermittelt werden muss, ist für

315 nm $\lambda \leq 400$ nm:	30 000 s, oder die anzuwendende Expositionsdauer, falls diese kürzer ist;
400 nm $< \lambda \leq 1400$ nm	T_2 (Tabelle A4.6) oder die anzuwendende Expositionsdauer, falls diese kürzer ist;
$\lambda > 1\,400$ nm:	10 s.

Hinweis 3³ :

Bei sehr großen zu berücksichtigenden Impulszahlen kann es vorkommen, dass der berechnete Expositionsgrenzwert bezogen auf die Impuls(spitzen)leistung kleiner ist als der Expositionsgrenzwert für kontinuierliche Strahlung. In solchen Fällen gilt der Expositionsgrenzwert für kontinuierliche Strahlung.

A4.2 Vereinfachte Expositionsgrenzwerte zur Auswahl von Laser-Schutz- und -Justierbrillen

Um die Einhaltung der Expositionsgrenzwerte insbesondere für die Bestimmung der Laser-Schutz- und Laser-Justierbrillen schnell überprüfen zu können, kann folgende Tabelle, die zur sicheren Seite hin vereinfachte Grenzwerte benutzt, für viele Fälle verwendet werden.

Tab. A4.8 Vereinfachte maximal zulässige Bestrahlungswerte auf der Hornhaut des Auges

- 1 Die maximale Impulsdauer ist bereits in den Begriffsbestimmungen (Teil „Allgemeines“) beschrieben. Bei der Anwendung der Formel ist diese Einschränkung wichtig
- 2 Die Zeitobergrenze T ist die Zeit der Einwirkung, ab der die Expositionsgrenzwerte in Leistung bzw. Bestrahlung ausgedrückt werden und sich mit zunehmender Expositionsdauer nicht mehr verschärfen.
- 3 Dieses Kriterium bewirkt, dass der Expositionsgrenzwert für einen Laserimpuls unter die Leistung fallen würde, die für einen Dauerstrichlaser für die kontinuierliche Strahlung gelten würde.

Wellenlängenbereich in nm	Bestrahlungsstärke				Bestrahlung H			
	D*		M**		M		I***, R****	
	Impulsdauer in s	E / W · m ⁻²	Impulsdauer in s	E / W · m ⁻²	Impulsdauer in s	H / J · m ⁻²	Impulsdauer in s	H / J · m ⁻²
100 ≤ λ < 315	30 000	0,001	< 10 ⁻⁹	3 · 10 ¹⁰	-	-	> 10 ⁻⁹ bis 3 · 10 ⁴	30
315 ≤ λ < 1400	> 5 · 10 ⁻⁴ bis 10	10	-	-	< 10 ⁻⁹	1,5 · 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁹ bis 5 · 10 ⁴	0,005
1400 ≤ λ ≤ 10 ⁶	> 0,1 bis 10	1000	< 10 ⁻⁹	10 ¹¹	-	-	> 10 ⁻⁹ bis 0,1	100

Hinweis:

* Dauerstrich (konstante Leistung über mindestens 0,25 s)

** Modengekoppelt (Emission in Impulsen, die kleiner als 10⁻⁷ s und länger als 1 ns sind)

*** Impuls (Emissionen die kürzer als 0,25 s und länger als 10⁻⁷ s sind)

In dieser vereinfachten Tabelle wird Strahlung von Impulslasern nur bis 0,1 s als Impulslaserstrahlung betrachtet.
Laserstrahlung ab 0,1 s wird als Dauerstrich-Strahlung betrachtet.

**** Riesenimpuls (Emission in Impulsen, die kürzer als 10^{-7} s und länger als 1 ns sind)
