Quelle: https://www.arbeitssicherheit.de//document/73df7aff-4eed-38d7-afe8-007ca13c93ed

Bibliografie	
Titel	Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung TROS Laserstrahlung Teil 2: Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung
Redaktionelle Abkürzung	TROS Laser Teil 2
Normtyp	Technische Regel
Normgeber	Bund
Gliederungs-Nr.	Keine FN

Anhang 2 TROS Laser Teil 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 Bestrahlungsstärkeprofil besitzt, das durch eine Gauß'sche Verteilung (Abbildung A2.1) beschrieben werden kann, werden folgende Größen unter Verwendung von Zylinderkoordinaten benötigt:

- Abstand von der Strahltaille (z),
- radiale Koordinate (r),
- die Position der Strahltaille (z = 0),
- der Durchmesser der Strahltaille ($d_0 = 2 \cdot w_0$),
- Strahlradius an der Stelle z (w(z)), bzw. Strahldurchmesser an der Stelle z (d(z) = 2 · w(z)),
- Rayleigh-Länge (z_R),
- die Strahldivergenz oder der Fernfelddivergenzwinkel (φ),
- Bestrahlungsstärke E(r, z) an der Stelle r, z.

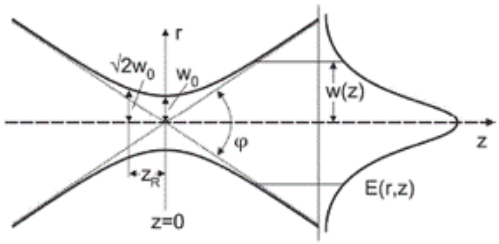


Abb. A2.1
Propagation eines Gauß'schen Strahls

A2.1.1
Strahldurchmesser und Divergenz

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

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

$$d_0 \cdot \varphi = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi}$$ Gl. A2.1

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

$$d(z) = d_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot \lambda \cdot z}{\pi \cdot d_0^2}\right)^2}$$ Gl. A2.2

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

$$z_R = \frac{d_0}{\varphi} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4 \cdot \lambda}$$ Gl. A2.3

(4) Für größere Abstände (z » zR) gilt d(z) = φ · z.

A2.1.2
Leistungsdichteverteilung

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

$$E(r,z) = E(0,z) \cdot e^{-\frac{8 \cdot r^2}{d^2(z)}}$$ Gl. A2.4

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:

$$d(z) = 2 \cdot w(z) = 2 \cdot w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2}\right)^2}$$ Gl. A2.5

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

$$E\left(\frac{d(z)}{2}, z\right) = \frac{E(0,z)}{e^2} \approx 0{,}14 \cdot E(0,z)$$ Gl. A2.6

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

$$E(r,z) = E(0,z) \cdot e^{-\frac{4 \cdot r^2}{d_{63}^2(z)}}$$ Gl. A2.7

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

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

$$d_{63}(z) = \frac{d(z)}{\sqrt{2}}$$ Gl. A2.8

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:

$$\varphi_{63} = \frac{\varphi}{\sqrt{2}}$$ Gl. A2.9

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

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

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:

$$\eta = 1 - e^{-\left(\frac{d_B}{d_{63}}\right)^2} \qquad \text{Gl. A2.10}$$

Dabei ist d_{63} der Strahldurchmesser, in dem 63 % der Strahlungsleistung enthalten ist. Er wird auf die sogenannten 1/e-Punkte (1/e ~ 37 %) bezogen, d. h. für ein Gauß'sches Strahlprofil wird der Strahldurchmesser d_{63} aus den beiden Punkten ermittelt, an denen die Bestrahlungsstärke das 1/e-fache ihres Maximalwertes beträgt.

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

$$P_B = \eta \cdot P \qquad \text{Gl. A2.11}$$

oder

$$Q_B = \eta \cdot Q. \qquad \text{Gl. A2.12}$$

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:

$$P(d_B, z) = P \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{d_B}{d_{63}}\right)^2}\right) \qquad \text{Gl. A2.13}$$

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.

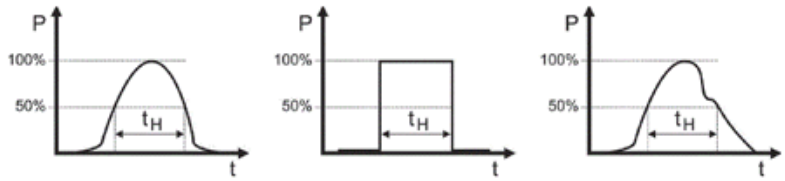


Abb. A2.2
Impulsdauer tH für den Fall eines gaußförmigen, eines Rechteck- und eines unregelmäßigen Impulses

(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.

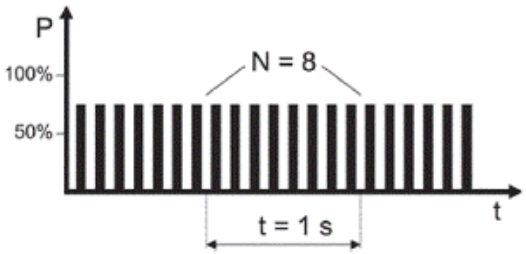


Abb. A2.3
Impulsfolgefrequenz für einen regelmäßig gepulsten Laser mit f_P = 8 Hz

A2.3
Winkelausdehnung α einer scheinbaren Quelle

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

(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

$$\alpha = \frac{d_Q}{r}, \qquad \text{Gl. A2.14}$$

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

(2) Jeder Blick in einen kollimierten Strahl oder auf eine Laserstrahlungsquelle, die eine Winkelausdehnung von weniger als α_{min} = 1,5 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 α_{min} = 1,5 mrad festgelegt.

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

$$d_Q = \frac{d_{Q1} + d_{Q2}}{2} \quad \text{bzw.} \qquad \text{Gl. A2.15}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \qquad \text{Gl. A2.16}$$

Dabei muss beachtet werden, dass der kleinste auftretende Wert α_1 auf den Wert α_{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 α_{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).

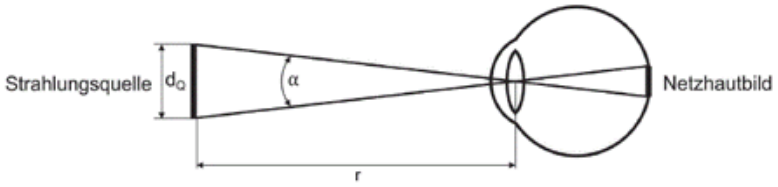


Abb. A2.4
Winkelausdehnung α der scheinbaren Quelle

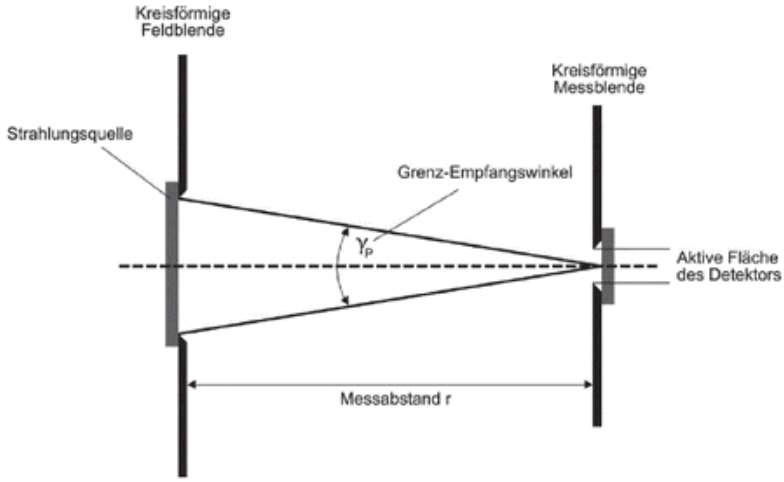


Abb. A2.5
Begrenzung des Empfangswinkels γ_P durch eine Blende vor der Strahlungsquelle

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

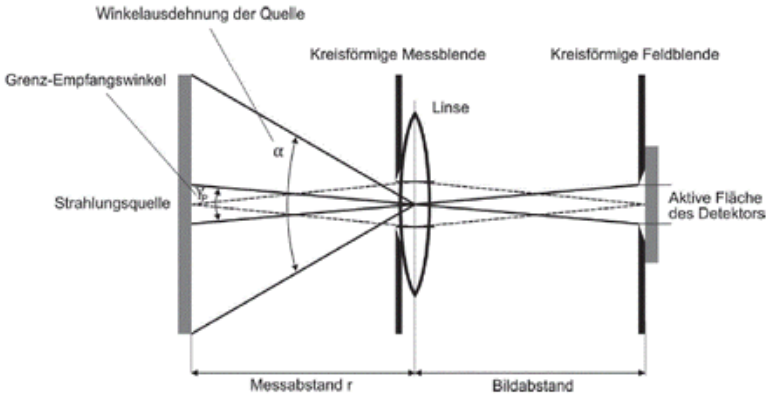


Abb. A2.6
Begrenzung des Empfangswinkels γ_P durch eine Blende vor dem Detektor

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.

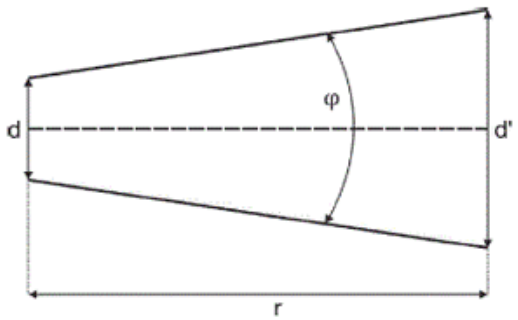
(2) Bei den folgenden Berechnungen muss eine bestimmte Expositionsdauer angenommen werden. Es handelt sich z. B. um den NOHD-Wert bei 10 s oder NOHD-Wert bei 100 s. Bei den Angaben in Datenblättern und den Vergleichen muss diese Zeit berücksichtigt werden.

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

$$E = \frac{4 \cdot P \cdot e^{-\mu \cdot r}}{\pi \cdot (d + r \cdot \varphi)^2} \qquad \text{Gl. A2.17}$$

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

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



$$d' = d + 2 \cdot r \cdot \tan\frac{\varphi}{2} \approx d + r \cdot \varphi$$

Abb. A2.7
Aufweitung eines Laserstrahls

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

(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:

$$E = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot (d + r \cdot \varphi)^2} \qquad \text{Gl. A2.18}$$

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

$$NOHD = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot E_{EGW}}} - d}{\varphi} \qquad \text{Gl. A2.19}$$

(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.

$$NOHD = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot E_{EGW}}}}{\varphi} \qquad \text{Gl. A2.20}$$

(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:

$$NOHD_{\mu} = 0{,}5 \cdot NOHD \cdot (1 + e^{-\mu \cdot NOHD}) \qquad \text{Gl. A2.21}$$

Dabei ist NOHDμ 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 $NOHD_{\mu}$ 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:

$$\mu = \frac{3{,}91}{V} \cdot \left(\frac{0{,}55}{\lambda}\right)^{A} \cdot 10^{-3}\ m^{-1} \qquad \text{Gl. A2.22}$$

Dabei ist

V	-	Sichtweite in km,

λ - Wellenlänge in μm (0,4 μm ≤ λ ≤ 2 μm) und

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

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.

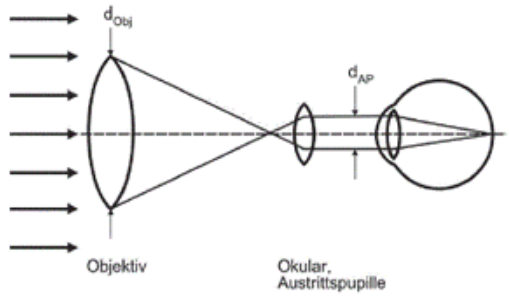


Abb. A2.8
Sammelnde Wirkung eines Fernrohrs

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

(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 dM ist (d_{AP} > dM), gilt näherungsweise:

$$ENOHD = NOHD \cdot M \qquad \text{Gl. A2.23}$$

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

$$M = \frac{d_{Obj}}{d_{AP}} \qquad \text{Gl. A2.24}$$

(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

$$ENOHD = NOHD \cdot G \qquad \text{Gl. A2.25}$$

mit

$$G = \frac{d_{Obj}}{d_M}. \qquad \text{Gl. A2.26}$$

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 Strahltaille und nicht zwangsläufig von der Austrittsöffnung des Lasers an gerechnet. Der Abstand von der Strahlaustrittsöffnung bis zur Strahltaille kann, wenn nicht bekannt, nach Anhang 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 4 000 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 W, eine Strahldivergenz von φ = 0,7 mrad und einen Durchmesser des austretenden Strahlenbündels von d = 1 mm. Berechne den Augensicherheitsabstand NOHD, wenn der entsprechende Expositionsgrenzwert E_{EGW} = 10 W · m^{-2} beträgt und eine vernachlässigbare atmosphärische Schwächung angenommen wird.

Lösung:

Die Anwendung von Gl. A2.19 ergibt:

$$NOHD = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 4\,W}{\pi \cdot 10\,W \cdot m^{-2}}} - 0{,}001\,m}{0{,}7 \cdot 10^{-3}\,rad} = 1{,}018\,km \qquad \text{Gl. A2.27}$$

Beispiel 2:

Dem Laser aus Beispiel 1 wird eine strahlaufweitende Optik vorgesetzt. Diese verringert die Strahldivergenz auf φ = 0,1 mrad und vergrößert den Durchmesser des Strahlenbündels am Austritt auf d = 7 mm. Berechne den neuen Augensicherheitsabstand NOHD.

Lösung:

Der NOHD ist:

$$NOHD = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 4\,W}{\pi \cdot 10\,W \cdot m^{-2}}} - 7 \cdot 10^{-3}\,m}{0{,}1 \cdot 10^{-3}\,rad} = 7{,}068\,km \qquad \text{Gl. A2.28}$$

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.

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH

Beispiel 3:

Der Laser aus Beispiel 1 wird mit einem Fernglas 8 × 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:

$$ENOHD = 1{,}018\,km \cdot 8 = 8{,}144\,km \qquad \text{Gl. A2.29}$$

Bei Anwendung des Vergrößerungsfaktors G ergibt sich für eine Laserwellenlänge von 1 064 nm mit

$$ENOHD = 1{,}018\,km \cdot \frac{30\,mm}{7\,mm} = 4{,}363\,km \qquad \text{Gl. A2.30}$$

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

$$d_{AP} = \frac{30\,mm}{8} = 3{,}75\,mm \qquad \text{Gl. A2.31}$$

kleiner als der der Messblende von d_M = 7 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 Strahltaille außerhalb der Strahlaustrittsöffnung vor, so ist der Abstand bis zur Strahltaille dem ENOHD hinzuzurechnen.

A2.6
Emission aus Lichtwellenleitern - Durchmesser des divergenten Strahls

(1) Die Abstrahlung von Lichtwellenleitern wird üblicherweise durch die sogenannte numerische Apertur NA charakterisiert. Diese bezeichnet den Sinus des halben Divergenzwinkels $\varphi_5/2$ der Abstrahlcharakteristik, gemessen bei den Punkten mit 5 % der Spitzenbestrahlungsstärke:

$$NA = \sin\frac{\varphi_5}{2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\varphi_5}{2} = \arcsin NA \qquad \text{Gl. A2.32}$$

(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

$$d_{95} = d_F + 2 \cdot a \cdot \tan\frac{\varphi_5}{2} = d_F + 2 \cdot a \cdot \tan(\arcsin NA) \qquad \text{Gl. A2.33}$$

(3) Wenn der Durchmesser der emittierenden Faser d_F in der Größenordnung kleiner als 150 µm 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:

$$d_{63} = \frac{d_{95}}{1{,}7} = \frac{2 \cdot a \cdot \tan(\arcsin NA)}{1{,}7} \approx \frac{2 \cdot a \cdot NA}{1{,}7} \qquad \text{Gl. A2.34}$$

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

$$E = \frac{P}{d_{63}^2 \cdot \frac{\pi}{4}} = \frac{1{,}7^2 \cdot P}{\pi \cdot a^2 \cdot NA^2} = 0{,}92 \cdot \frac{P}{a^2 \cdot NA^2} \qquad \text{Gl. A2.35}$$

(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:

$$d_{63}(SM) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a \cdot \lambda}{\pi \cdot \omega_0} \qquad \text{Gl. A2.36}$$

© 2024 Wolters Kluwer Deutschland GmbH