

Augensicherheit inkohärenter optischer Quellen

Jürgen Nolting, Günter Dittmar,
Hochschule für Technik und Wirtschaft Aalen

Optische Strahlung kann für das Auge und die Haut schädlich sein. Die neue Informationsschrift BGI 5006 der Berufsgenossenschaft [1] gibt erstmals Expositionsgrenzwerte für künstliche inkohärente optische Strahlung an. Die BGI 5006 ist anwendbar bei sichtbar und unsichtbar emittierenden Lampen und Scheinwerfern wie z.B. Beleuchtungseinrichtungen für die industrielle Bildverarbeitung und den Überwachungsbereich, LEDs und UV-Strahler. Die neue Richtlinie wird hier detailliert erläutert. Am Beispiel der infraroten (somit unsichtbaren) Strahlung eines Überwachungsscheinwerfers wurden die Mindestabstände ermittelt, die ein Mensch einhalten muss, wenn er nur wenige Sekunden in den Scheinwerfer blickt.

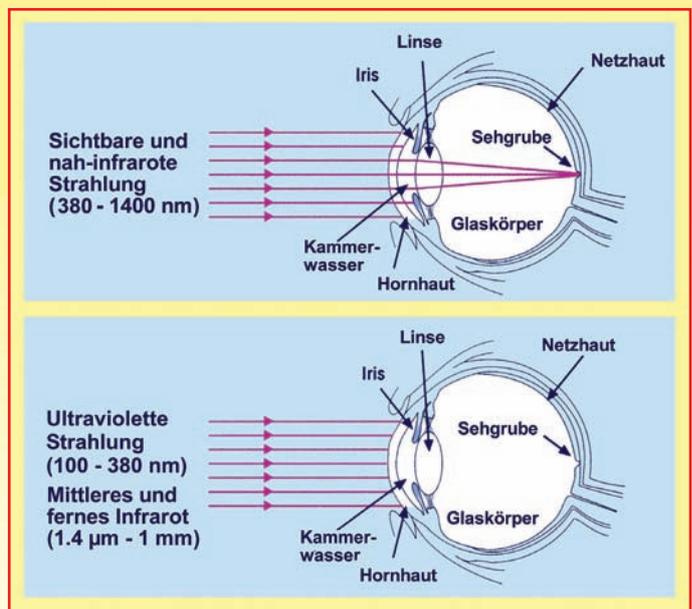


Bild 1:
Einwirkung
optischer Strahlung
verschiedener
Wellenlängen auf
das menschliche
Auge

1 Einleitung

Zum Schutz vor Laserstrahlung gibt es seit vielen Jahren in ständig aktualisierter Form nationale und internationale Richtlinien und Normen. Für den Geltungsbereich der Bundesrepublik Deutschland sind hier die Lasersicherheitsnorm DIN EN 60825-1 [2] und die BG-Information 832 [3] zu nennen. Diese Normen und Richtlinien beziehen sich aber nicht auf den Schutz vor inkohärenter optischer Strahlung, wie sie z.B. von Heizstrahlern, UV-Speziallampen, Beleuchtungseinrichtungen und Infrarot-Überwachungsscheinwerfern emittiert wird. Derzeit ist keine anzuwendende Norm bekannt, die explizit vorgibt, wie Scheinwerfer und andere Quellen inkohärenter optischer Strahlung ausgelegt sein müssen, um insbesondere Augenschädigungen zu vermeiden. Zwar kann man versuchen, hilfswise zur Bewertung einer Expositionssituation die Lasersicherheitsnormen heranzuziehen [4], jedoch bewerten diese das Gefährdungspotential durch inkohärente optische Strahlung (insbesondere bei ausgedehnten Strahlerflächen) nur unzureichend und u.U. zu konservativ [5]. Hier bestand offensichtlich Normungsbedarf. Dies haben auch die Berufsgenossen-

schaften der Bundesrepublik Deutschland erkannt. Unter Mitarbeit der Autoren wurde in den vergangenen Jahren die BG-Information 5006 [1] erarbeitet.

2 Richtlinie für inkohärente optische Strahlung

Mit dem Vorliegen der BGI 5006 hat Deutschland eine Vorreiterrolle in der EU eingenommen. Die hier veröffentlichten Grenzwerte und Vorschriften müssen nun als Stand der Technik im Rahmen der unternehmerischen Sorgfaltspflicht berücksichtigt und bei der Bewertung von Expositionssituationen im beruflichen Umfeld herangezogen werden. Die lange Zeit hinderliche Normungslücke ist damit behoben.

Das Schädigungspotential optischer Strahlung ist stark von der Wellenlänge abhängig. Eine erste grobe Einteilung ergibt sich durch die spektral unterschiedlichen Absorptionsgrade der einzelnen Teile des Auges.

2.1 Sichtbare und nah-infrarote Strahlung

Entsprechend **Bild 1** ist eine direkte Schädigung der Netzhaut im gesamten Bereich des sichtbaren Lichts (380 bis 780 nm) und im nahen Infrarot bis zu einer Wellenlänge von 1,4 µm möglich.

Da die Lasernormen normalerweise auf Strahlung einer „einzelnen“ Wellenlänge angewendet werden, sind in ihnen die Grenzwerte in Abhängigkeit von der Wellenlänge definiert. Die BGI 5006 geht einen anderen Weg, der für die Bewertung spektral breitbandiger Strahlungsquellen praktikabler ist: Es werden Grenzwerte definiert, die in weiten Bereichen spektral unabhängig sind. Dafür werden aber bei der messtechnischen Ermittlung der Bestrahlungsstärke und Strahldichte spektrale Gewichtungsfunktionen einbezogen, die z.B. durch geeignete Filterkombinationen vor einem Radiometer mit vertretbarem Aufwand realisiert werden können. Diese spektralen Gewichtungsfunktionen entstehen aus der Wellenlängenabhängig-

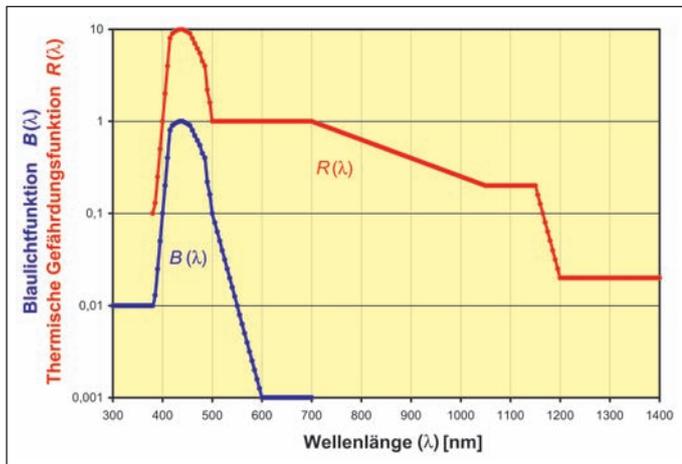


Bild 2: Spektraler Verlauf der Gefährdungsfunktionen $R(\lambda)$ und $B(\lambda)$ [1]

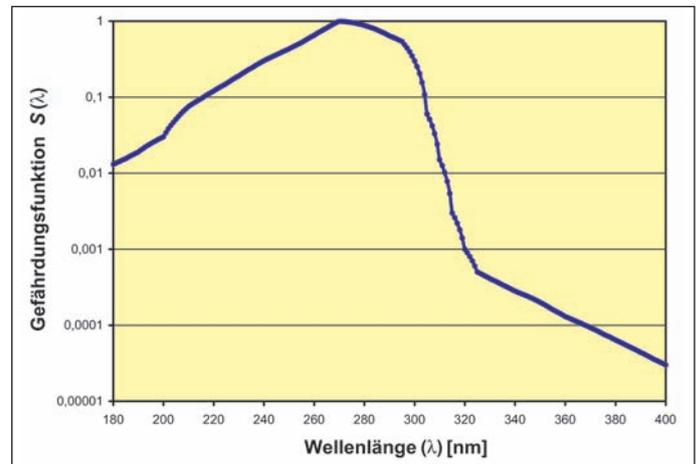


Bild 3: Spektraler Verlauf der Gefährdungsfunktion $S(\lambda)$ [1]

keit der biologischen Wirkung optischer Strahlung. Durch Strahlung im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich kann das Auge auf verschiedene Weisen gefährdet werden:

- Zu hohe Bestrahlungsstärke: Schädigung der vorderen Augenpartien (Hornhaut und Linse)
- Zu hohe Strahldichte der Quelle: Lokale thermische Überlastung der Netzhaut
- Zu hohe Strahldichte im blauen Spektralbereich: Photochemische Schädigung der Netzhaut (Blaulichtschädigung).

Die Schädigungen durch diese Mechanismen werden in der neuen Richtlinie für inkohärente optische Strahlung separat bewertet und mit Grenzwerten belegt. Um zu berücksichtigen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Netzhautschädigung eine starke Wellenlängenabhängigkeit aufweist, muss für die beiden Netzhautschädigungsarten die Strahldichte mit der sog. thermischen Gefährdungsfunktion $R(\lambda)$ und der Blaulichtgefährdungsfunktion $B(\lambda)$ gewichtet erfasst werden. **Bild 2** zeigt den spektralen Verlauf von $R(\lambda)$ und $B(\lambda)$ [1].

Die Gefährdung der vorderen Augenpartien im infraroten Bereich ist unabhängig von der Wellenlänge.

2.2 UV-Strahlung

Die biologischen Wirkungen ultravioletter Strahlung sind vielfältig und oftmals schädigend. Sie zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Wellenlänge. Im UV-Bereich sind zwei Grenzwerte einzuhalten: Für den UV-A-Bereich (315 - 400 nm) wird eine maximale Bestrahlung angegeben, die nicht mit einer Wirkfunktion gewichtet wird. Der Wellenlängenabhängigkeit der einzelnen biologischen Wirkfunktionen wird durch einen zweiten Grenzwert Rechnung getragen, der für den gesamten

UV-Bereich (100 - 400 nm) einzuhalten ist. Dieser Wert definiert eine maximale effektive Bestrahlung, bei deren Bestimmung die spektrale Wirkfunktion $S(\lambda)$ nach **Bild 3** zur Anwendung gelangt. Für Wellenlängen unter 180 nm ist der Funktionswert für 180 nm konstant anzuwenden.

3 Bewertungsgrößen

Die Gefährdung durch eine Strahlungsquelle bemisst sich nach der restriktivsten Bewertung, die für eine Strahlungsexposition durch diese Quelle zutrifft. Im nun folgenden Abschnitt ist aufgezeigt, wie die verschiedenen Bewertungsgrößen in der BGI 5006 für inkohärente Strahlung definiert sind.

Um die Gefährdung der vorderen Augenpartien durch Infrarotstrahlung zu beurteilen, muss zunächst die Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 780 nm bis 3,0 μm summarisch bewertet werden:

$$E_{IR} = \int_{780\text{nm}}^{3000\text{nm}} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

mit:

- λ : Wellenlänge
- E_{IR} : gesamte, ungewichtete Bestrahlungsstärke von 780 nm bis 3,0 μm
- $E_{\lambda}(\lambda)$: spektrale Bestrahlungsstärke

Für die Bewertung der thermischen Netzhautgefährdung geht die Strahldichte der Quelle im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1,4 μm in die Bewertung ein:

$$L_R = \int_{380\text{nm}}^{1400\text{nm}} L_{\lambda}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

mit

- L_R : gesamte mit $R(\lambda)$ gewichtete Strahldichte von 380 nm bis 1,4 μm
 - $L_{\lambda}(\lambda)$: ungewichtete spektrale Strahldichte
- Bei der Bewertung der photochemischen Netzhautgefährdung wird je nach Win-

kelausdehnung der Quelle entweder die Strahldichte (für Quellen mit Winkelgrößen α über 11 mrad) oder die Bestrahlungsstärke (für Quellen mit Winkelgrößen unter 11 mrad) im Wellenlängenbereich von 380 bis 600 nm bewertet.

Für $\alpha \geq 11$ mrad:

$$L_B = \int_{380\text{nm}}^{600\text{nm}} L_{\lambda}(\lambda) B(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Für $\alpha < 11$ mrad:

$$E_B = \int_{380\text{nm}}^{600\text{nm}} E_{\lambda}(\lambda) B(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

mit

- L_B : gesamte mit $B(\lambda)$ gewichtete Strahldichte
- E_B : gesamte mit $B(\lambda)$ gewichtete Bestrahlungsstärke¹

Bei der messtechnischen Bewertung muss somit zusätzlich zur absoluten Bestrahlungsstärke an der Hornhaut die mit $R(\lambda)$ und $B(\lambda)$ gewichtete Strahldichte und Bestrahlungsstärke gemessen werden. Dies erfordert speziell angepasste Filter vor dem Messkopf, die den Verlauf der beiden Gewichtungsfunktionen nachbilden. Die messtechnische Bestimmung der Grenzwerte für einen breitbandigen Strahler ist somit relativ einfach, da die Grenzwerte spektral unabhängig sind und die spektrale Bewertung über die Gewichtungsfunktionen des Filters während der Messung erfolgt. BGI 5006 definiert zusätzlich eine maximale Bestrahlung (eingestrahlte Energie, Zeitintegral der Bestrahlungsstärke) durch Infrarotstrahlung:

¹ Hinweis zur Unterscheidung in Gleichung (3) und (4): Quellen kleiner als 11 mrad werden hier nach der Bestrahlungsstärke und nicht nach der Strahldichte bewertet, da unwillkürliche Augenbewegungen und radialer Energietransport zu einer Verschmierung auf der Netzhaut während der Einwirkdauer führen. Bei gleicher Bestrahlungsstärke würden höhere Strahldichten einer relativ kleinen Quelle somit nicht mehr zu einer höheren Gefährdung führen.

$$H_{IR} = \int_{780nm}^{3000nm} H_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

mit:

H_{IR} : gesamte Bestrahlung von 780 nm bis 3,0 μm

$H_{\lambda}(\lambda)$: spektrale Bestrahlung

Diese Größe wird zur Bewertung der Exposition während eines 8-stündigen Arbeitstages herangezogen, um die Gefahr einer strahlungsinduzierten Linsentrübung zu bewerten.

Die ungewichtete Bestrahlung H_{UV} im UV-A-Bereich ist definiert als

$$H_{UV} = \int_{315nm}^{400nm} H_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Für die effektive Bestrahlung $H_{UV,eff}$ im UV-Bereich gilt die Bestimmungsgleichung

$$H_{UV,eff} = \int_{180nm}^{400nm} H_{\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Für alle vorstehend definierten Bewertungsgrößen sind in BGI 5006 Grenzwerte angegeben. Diese hängen teilweise von der Expositionsdauer und Winkelausdehnung ab. Darüber hinaus ist angegeben, wie diese Grenzwerte zu interpretieren sind, wenn die Strahlung gepulst oder zeitlich unterbrochen auftritt.

4 Beispiel: 1kW-IR-Überwachungsscheinwerfer

Um einen Eindruck vom Gefährdungspotential zu bekommen, wurde ein hypothetischer Modellscheinwerfer definiert. Er entspricht einem typischen IR-Überwachungsscheinwerfer, der durch folgende Parameter gekennzeichnet ist:

- Glühfadentemperatur: 3150 K
- Elektrische Eingangsleistung: 1 kW
- Optischer Wirkungsgrad: 30%
- Für den Scheinwerfer wurden Inhomogenitäten der Lichtintensität ("hot spots") angenommen, die durch einen Korrekturfaktor 3 berücksichtigt wurden.

turfaktor 3 berücksichtigt wurden.

- Austrittsfläche: 20 x 10 cm^2
- Idealer Langpassfilter mit Grenzwellenlänge 800 nm (unsichtbare Strahlung)
- Divergenz des Strahlenbündels: $\pm 10^\circ$ horizontal und vertikal
- Im Zentrum des bestrahlten Bereichs ist die Bestrahlungsstärke am höchsten. Um dies zu berücksichtigen, wurde die rechnerisch ermittelte isotrope Bestrahlungsstärke um einen Korrekturfaktor 8 erhöht.

4.1 Berechnete Sicherheitsabstände

Gerade im Bereich kurzer Expositionszeiten im Sekundenbereich muss gewährleistet sein, dass die einzuhaltenen Sicherheitsabstände bekannt sind, damit nicht schon ein kurzer Blick in den Scheinwerfer zu einer Augenschädigung führt. Daher wurden in den hier vorgestellten Untersuchungen die Sicherheitsabstände für Expositionszeiten zwischen 0,5 s und 10 s berechnet. Die Ergebnisse sind in **Bild 4** dargestellt. Eingezeichnet sind die Daten für eine Bewertung nach den beiden Lasernormen DIN EN 60825-1 und ANSI Z136.1 (USA) sowie nach der neuen Richtlinie BGI 5006. Die beiden Lasernormen liefern identische Ergebnisse. Auffällig ist, dass der Sicherheitsabstand nach BGI 5006 stets kleiner ist. Zum Beispiel für Expositionszeiten über 2 s liegt der Sicherheitsabstand bei etwa 80% des nach den Lasernormen erforderlichen Abstandes. Für kürzere Zeiten wird der Prozentsatz noch geringer. BGI 5006 bewertet das schädigende Potential in diesem Fall also weniger kritisch – Laserstrahlung mit vergleichbarer spektraler Charakteristik und Geometrie (Winkelgröße der Quelle, Verteilung der Bestrahlungsstärke) wird somit als potentiell schädlicher eingestuft.

Für einen Überwachungsscheinwerfer sind im praktischen Einsatz längere Expositionszeiten unwahrscheinlich, so dass der Langzeitbereich nicht untersucht wurde.

Die Ergebnisse belegen, dass von dem Scheinwerfer im Nahbereich eine starke Augengefährdung ausgeht. Schon nach 2 s ist der zulässige

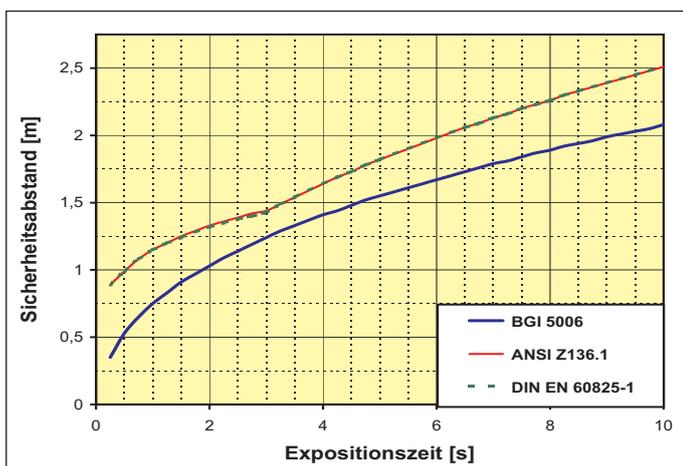


Bild 4: Erforderliche Sicherheitsabstände im Expositionszeitbereich bis 10 s



Bild 5: Warnsymbol W 32 „Warnung vor infraroter oder ultravioletter Strahlung“

Grenzwert bei einem Betrachtungsabstand von 1 m überschritten.

Bei Arbeiten am eingeschalteten Scheinwerfer darf es nicht vorkommen, dass während eines Arbeitstages zahlreiche unterschwellige Einzelexpositionen einwirken: Schon 30 Expositionen von je 1 s Dauer aus einem Abstand von 1 m im Verlaufe einer Stunde überschreiten den zulässigen Grenzwert. Nach BGI 5006 ist zu beachten, dass Einzelexpositionen nur dann als unabhängig betrachtet werden können, wenn zwischen zwei aufeinander folgenden Expositionen jeweils eine „Abkühlzeit“ von 5 Minuten eingehalten wird, sofern jede einzelne Exposition mindestens zu einer Belastung von 25% des zulässigen Grenzwertes führt. Bei Arbeiten am eingeschalteten Scheinwerfer müsste also das Tragen einer geeigneten IR-A-Schutzbrille vorgeschrieben werden.

5 Fazit

Mit dem Vorliegen der neuen BG-Information 5006 „Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung“ stehen alle Informationen zur Verfügung, die erforderlich sind, um eine Expositionssituation durch sichtbare und unsichtbare optische Strahlung inkohärenter Quellen sicherheitstechnisch zu bewerten.

Im vorgestellten Beispiel eines infraroten Überwachungsscheinwerfers ergeben sich je nach Expositionszeit, Scheinwerfergeometrie und -leistung Sicherheitsabstände im Meterbereich. In vielen Fällen stellt das kein Problem dar, zum Beispiel wenn der Such- und Überwachungsscheinwerfer auf einem 10 m hohen Mast montiert ist.

Durch geeignete Fertigungs- und Wartungsplanung muss bei Einstellarbeiten am Scheinwerfer eine Augengefährdung ausgeschlossen werden. Hierzu sind geeignete Prüfgeräte vorzusehen, die einen direkten Blick in den Scheinwerfer überflüssig

machen, denn schon wenige Hundert Kurzzeitexpositionen im Nahbereich können, während eines Arbeitstages aufsummiert, eine Augenschädigung hervorrufen. Wenn der direkte Blick in den Scheinwerfer nicht ausgeschlossen werden kann, muss das Tragen einer geeigneten IR-Schutzbrille zwingend vorgeschrieben werden.

Zu beachten ist, dass alle durchgeführten Berechnungen nur von vereinfachenden Modellannahmen bezüglich Strahldichte- und Bestrahlungsstärkeverteilung ausgehen. Für die sicherheitstechnische Bewertung realer Systeme ist es unabdingbar, diese im Labor messtechnisch zu untersuchen. So ergeben sich in der Praxis zumeist kompliziertere geometrische Verteilungen der Strahldichte, die rechnerisch nur näherungsweise durch entsprechend geformte Ersatzflächen berücksichtigt werden können.

Mit der neuen BGI 5006 wird die Bewertung inkohärenter Scheinwerfer auf eine solide Basis gestellt. Das neue Kennzeichen W 32 „Warnung vor infraroter oder ultravioletter Strahlung“ (**Bild 5**) wird uns im industriellen Alltag vielleicht in Zukunft häufiger begegnen.

Literaturhinweise:

- [1] BGI 5006: *Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung*, Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln (Oktober 2004), pdf herunterladen über Webcode (s.u.)
- [2] DIN: *DIN EN 60825-1: Sicherheit von Lasereinrichtungen, Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien*, Deutsches Institut für Normung und Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2003
- [3] BGI 832: *Betrieb von Lasereinrichtungen, Anwendung der Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ (BGV B2) auf neue Laserklassen und MZB-Werte nach DIN EN 60825-1 (VDE 0837 Teil 1): 2001-11*, Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln (April 2003)
- [4] Th. Fischer: *Augensicherheit von Leuchtdioden (LEDs) - Anwendung der aktuellen Normen*, Photonik 2/2005 (April), S. 66-68
- [5] E.W. Sutter: *Schutz vor optischer Strahlung*, VDI-Schriftenreihe 104, VDE Verlag GmbH Berlin 2002, 2. Auflage

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Jürgen Nolting
Hochschule für Technik
und Wirtschaft Aalen
Studiengang Augenoptik
Gartenstr. 135
D-73430 Aalen
Tel. 07361/9733-19
Fax 07361/9733-15
eMail: juergen.nolting@fh-aalen.de
Internet: www.nolting.de.vu



Prof. Dr.-Ing. habil.
Günter Dittmar
Steinbeis-Transferzen-
trum an der FH Aalen
Optik und Mechatronik
Egerlandstr. 88
D-73431 Aalen
Tel. 07361/94300-3
Fax 07361/94300-4
eMail: dittmar-transfer@t-online.de
Internet: www.awfe.de



www.photonik.de ▶ Webcode 3004