

NIR 2011 Tagungsbericht

Vereinfachte Beurteilung einer möglichen Überschreitung der Grenzwerte für optische Breitbandstrahlung auf Basis des Blendungseindrucks und der Oberflächentemperatur

Marko Weber, Karl Schulmeister, Emmerich Kitz und Helmut Brusl

Bitte melden Sie sich für unseren **Laser, LED & Lampen-Sicherheit NEWSLETTER** (ca. 4 mal pro Jahr) an, um Infos über neue Downloads zu erhalten:
<http://laser-led-lamp-safety.seibersdorf-laboratories.at/newsletter>

Diese Veröffentlichung wird als PDF-Datei von der Seibersdorf Labor GmbH mit der Erlaubnis der TÜV Media GmbH zur Verfügung gestellt.

Die Weitergabe an Dritte ist nicht gestattet.

Die PDF-Datei kann von <http://laser-led-lamp-safety.seibersdorf-laboratories.at> heruntergeladen werden.

Quelleninformation

Titel: Vereinfachte Beurteilung einer möglichen Überschreitung der Grenzwerte für optische Breitbandstrahlung auf Basis des Blendungseindrucks und der Oberflächentemperatur

Autoren: Weber M, Schulmeister K, Kitz E, Brusl H

Tagungsbericht NIR 2011, Herausgeber: Hans-Dieter Reidenbach, Klaus Dollinger, Günter Ott
TÜV-Verlag GmbH, Köln, 2011
Seiten 444-460

VEREINFACHTE BEURTEILUNG EINER MÖGLICHEN ÜBERSCHREITUNG DER GRENZWERTE FÜR OPTISCHE BREITBANDSTRAHLUNG AUF BASIS DES BLENDUNGSEINDRUCKES UND DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR

SIMPLIFIED METHOD FOR THE ASSESSMENT OF A POTENTIAL EXCEEDANCE OF THE EXPOSURE LIMITS OF OPTICAL BROADBAND RADIATION BY CONSIDERING GLARE AND SURFACE TEMPERATURE

M. Weber¹, K. Schulmeister¹, E. Kitz², H. Brusl²

¹Prüfstelle für Laser-, LED- & Lampensicherheit, Seibersdorf Labor GmbH, Österreich

²Abteilung HUB, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Österreich

Zusammenfassung — Folgend den nationalen Umsetzungen der Richtlinie für künstliche optische Strahlung ist jede Art der Exposition von optischer Strahlung bezüglich einer möglichen Grenzwertüberschreitung zu beurteilen. Da Angaben von Herstellern, z. B. auf Basis der EN 62471 meistens fehlen, können vereinfachte, „worst-case“ Abschätzungen den sonst immens hohen Aufwand für Arbeitgeber drastisch reduzieren. Bezüglich der sichtbaren Strahlung (potentielle Schädigung der Netzhaut) lehrt uns die Erfahrung, dass eine Bestrahlung nur dann zu einem Netzhautschaden führen kann, wenn die Quelle stark blendet und trotzdem in die Quelle gestarrt wird. Dieser Erfahrungswert wird durch Vergleich der möglichen Bestrahlungen, die unter den Grenzwerten für optische Strahlung liegen, mit Maßzahlen für den Blendungseindruck quantitativ untermauert. Als zweites vereinfachtes Beurteilungsverfahren können anhand der Oberflächentemperatur Angaben zu kritischen Temperaturen gemacht werden, unter denen die jeweiligen Grenzwerte für optische Breitbandstrahlung sicher nicht überschritten werden.

Summary – According to the national implementation of the directive on artificial optical radiation, every exposure to optical radiation at the workplace has to be assessed. In case that exposure limits are exceeded, the employer has to take measures in order to protect employees from optical radiation. Frequently, manufacturers of sources of optical radiation do not provide the information on their products according to EN 62471. In this case a “worst-case”-evaluation can help the employers to reduce the effort for the risk assessment. A source of visible light can only be hazardous for the retina if it causes a strong effect of glare and if the exposed person nonetheless stares directly into the source. This rule of thumb is underlined quantitatively by comparing radiometrical measurements with indices used for the assessment of glare. As a second simplified analysis concept, by knowledge of the surface temperature it is possible to assess the risk for potential exceeding the exposure limits when workers are exposed to the optical radiation emitted by thermal radiators.

Schlüsselwörter — Blendung, Helligkeit, Temperaturstrahler, Risikogruppe, optische Strahlung

Keywords — glare, brightness, thermal radiators, exposure limits, risk group, optical radiation

1. Einleitung

Gemäß der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie für künstliche optische Strahlung (z. B. in Österreich: Verordnung optische Strahlung – VOPST [1], in Deutschland: Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV [2]) müssen Arbeitgeber die Belastung von Arbeitnehmern durch optische Strahlung auf Arbeitsplätzen bewerten und die Bewertung entsprechend dokumentieren. Ziel der jeweiligen nationalen Verordnung ist es, Arbeitnehmer vor einer übermäßigen Belastung durch optische Strahlung zu schützen. Ein ausreichendes Schutzniveau liegt vor, wenn die in der jeweiligen Verordnung angegebenen Grenzwerte (als EU-weite Mindestgrenzwerte wurden dabei die Grenzwerte aus den ICNIRP-Guidelines übernommen) für Breiband- und Laserstrahlung nicht überschritten werden.

Rechtlich gesehen muss dabei **jeder** Arbeitsplatz bewertet werden, auf dem Arbeitnehmer optischer Strahlung exponiert sind. Darunter fallen unter anderem auch Bildschirmarbeitsplätze (Bestrahlung der Arbeitnehmer durch Bildschirm) und Büroarbeitsplätze (Bestrahlung der Arbeitnehmer durch künstliche Raumbeleuchtung wie z. B. Leuchtstoffröhren). Es ist nicht zielführend, jeden Arbeitsplatz (wie z. B. die oben genannten) einer detaillierten Bewertung bzw. Messung zu unterziehen, da auf zahlreichen Arbeitsplätzen eine Grenzwertüberschreitung aufgrund der vorhandenen Quelle bzw. aufgrund des Expositionsszenarios a priori ausgeschlossen werden kann. Ziel dieser Arbeit ist es, vereinfachte Bewertungsmöglichkeiten für Arbeitsplätze, aufgrund der Berücksichtigung der Helligkeit einer Quelle optischer Strahlung bzw. aufgrund der Berücksichtigung ihrer Oberflächentemperatur, aufzuzeigen und somit den Aufwand für eine Arbeitsplatzbewertung deutlich zu reduzieren.

2. Vereinfachte Bewertungsmöglichkeit I – Temperatur eines Temperaturstrahlers

Auf zahlreichen Arbeitsplätzen wird optische Strahlung von Temperaturstrahlern emittiert. Dazu zählen unter anderem Schmelzbäder, Öfen, Heizmodule, heiße Oberflächen aber auch Glühlampen. Ein Temperaturstrahler ist eine Strahlungsquelle, die optische Strahlung gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz emittiert. In der Praxis ist dabei der Emissionsgrad $\varepsilon < 1$, sodass man nicht von einem schwarzen Körper, sondern von einem grauen Körper spricht. Das von einem idealen Temperaturstrahler emittierte Spektrum hängt nur von der Temperatur des Strahlers ab und ist Abb. 1 dargestellt.

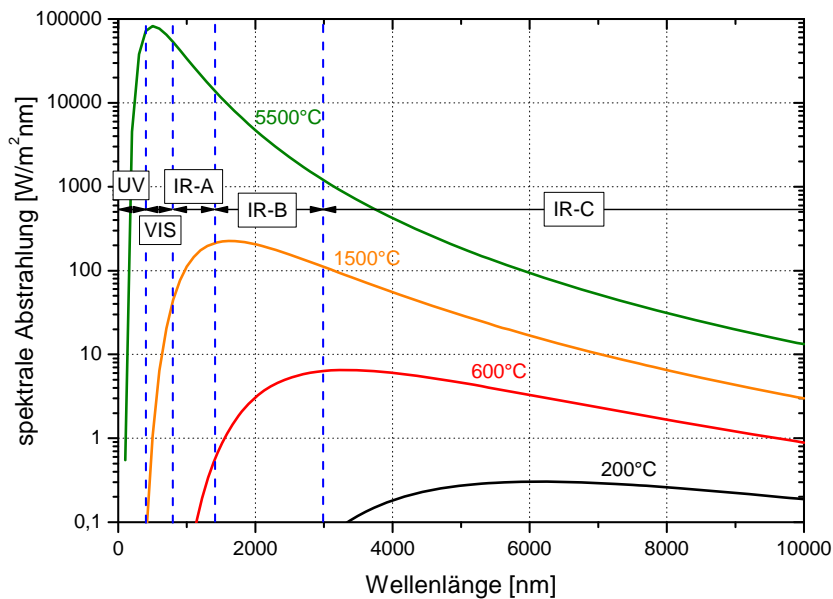


Abb. 1: Spektren von idealen Temperaturstrahlern in Abhängigkeit von deren Temperatur. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das abgestrahlte Spektrum hin zu kleineren Wellenlängen und die pro Fläche abgestrahlte Leistung nimmt zu.

Abbildung 2 verdeutlicht, dass z. B. die spektrale Bestrahlungsstärke vor einem Schmelzofen mit Hilfe der Planck'schen Formel für den grauen Körper sehr gut angenähert bzw. extrapoliert werden kann.

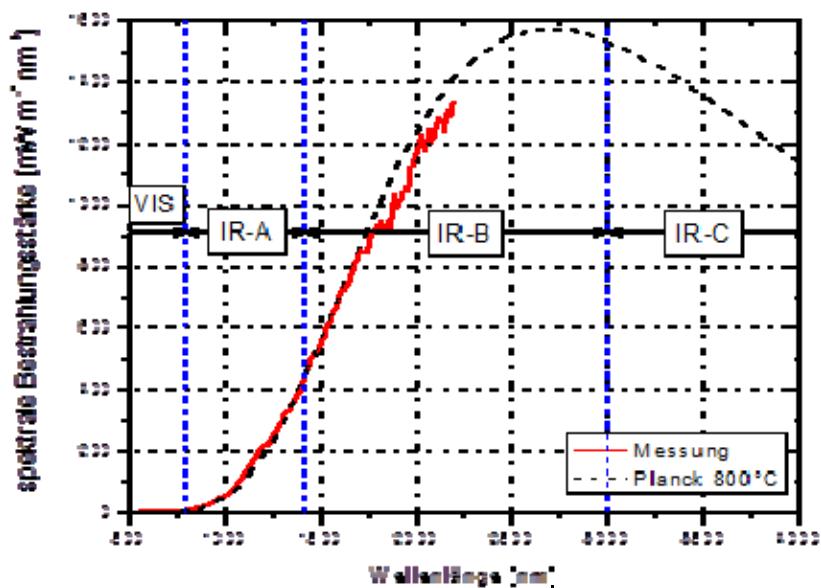


Abb. 2: Gemessene spektrale Bestrahlungsstärke vor einem geöffneten Aluminium-Schmelzofen (roter Graph, $T_{\text{Schmelze}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$, siehe auch Abb. 3 links) sowie mittels Planck'scher Formel für den grauen Körper gefittetes/extrapoliertes Spektrum.

Nimmt die Temperatur eines Temperaturstrahlers zu, so verschiebt sich das abgestrahlte Spektrum in Richtung kürzerer Wellenlängen (bei Kenntnis der Temperatur kann die Wellenlänge, bei der die maximale Leistung abgestrahlt wird, gemäß Wien'schen Verschiebungsgesetz berechnet werden) und die abgestrahlte Strahlungsleistung nimmt zu. Bei der Sonne handelt es sich z. B. um einen Temperaturstrahler mit einer

Oberflächentemperatur von ca. 5500 °C (siehe grüner Graph in Abb. 1). Ein derart heißer Temperaturstrahler besitzt seine maximale Abstrahlung im Wellenlängenbereich des grünen Lichts und emittiert auch einen signifikanten Anteil im UV-Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Backöfen oder bestimmte Typen von Heizmodulen erreichen hingegen nur Temperaturen von 200 °C – 250 °C. Das Maximum der spektralen Ausstrahlung liegt dabei im Infrarot-C (IR-C) Bereich (Wellenlänge $\lambda \geq 3000$ nm) des elektromagnetischen Spektrums. Bei dieser relativ „kühlen“ Strahlertemperatur wird nur ein vernachlässigbar kleiner Anteil an Infrarot-B Strahlung ($1400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 3000 \text{ nm}$) emittiert. Dies ist insofern von Bedeutung, da die Grenzwerte in der OStrV bzw. VOPST nur bis zu einer maximalen Wellenlänge von 3000 nm definiert sind.

Bei Messungen an zahlreichen Temperaturstrahlern wurde festgestellt, dass am ehesten der Grenzwert betreffend der Gefahr „Infrarot, vordere Augenmedien (E_{IR})“ überschritten wird. Berechnet man mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes das abgestrahlte Spektrum sowie die abgestrahlte Leistung eines schwarzen Körpers ($\epsilon = 1$), so zeigt sich, dass erst ab einer Strahlertemperatur von mehr als 260 °C unmittelbar an der Oberfläche einer heißen, ausgedehnten Quelle eine Bestrahlungsstärke von 100 W/m² (Grenzwert betreffend E_{IR} für Expositionsdauern > 1000 s) im grenzwertrelevanten Wellenlängenbereich $\lambda \leq 3000$ nm vorliegen kann.

Betreffend einer möglichen Grenzwertüberschreitung sind neben der Oberflächentemperatur des Temperaturstrahlers auch die Parameter

- Abstand zur Quelle
- Größe der Quelle
- Expositionsdauer

zu berücksichtigen. Damit bei einer Quelle mit einer Oberflächentemperatur von 260°C eine Grenzwertüberschreitung auftreten kann, muss diese Quelle sehr ausgedehnt sein (nicht möglich bei einer Punkt- oder Linienquelle) und die Expositionsdauer muss zusätzlich auch entsprechend lang sein (> 1000 s). Erst dann kann es unmittelbar an der Oberfläche der Quelle (sehr kleiner unrealistischer Abstand) zu einer Grenzwertüberschreitung kommen. Unter Berücksichtigung der durchgeführten Berechnungen erscheint eine Grenzwertüberschreitung bei ausgedehnten Temperaturstrahlern ab einer Temperatur von 400°C als realistisch. Bei Messungen auf unterschiedlichen Arbeitsplätzen, an denen ausgedehnte Temperaturstrahler eingesetzt werden (z. B. Warmwalzwerk), wurde in realen Arbeitspositionen (Abständen) und bei realen Expositionsdauern auch bei ausgedehnten Quellen mit einer Oberflächentemperatur von 400 °C keine Grenzwertüberschreitungen betreffend der Gefahr „Infrarot, vordere Augenmedien (E_{IR})“ festgestellt.

Aufgrund von zahlreichen Arbeitsplatzuntersuchungen, die in Österreich im Zeitraum von 2009 bis 2010 durchgeführt wurden, sowie Messungen an Temperaturstrahlern im Labor lässt sich ableiten, dass es in der Praxis nur dann zu einer Grenzwertüberschreitung kommt, wenn diese so heiß sind, sodass Sie auch sichtbares Licht emittieren. Ab ca. 520 °C beginnt ein heißer Körper schwach rötlich zu glühen. Wenn kein Glühen zu sehen ist, dann ist die Belastung der Haut und der Augen bei kurzer Bestrahlungsdauer gering. Bei entsprechend großen Flächen und kleinen Abständen kann es bei längeren Bestrahlungen zu einer Überschreitung der Grenzwerte kommen. Ist die Quelle nur rot- oder gelbglühend, aber nicht grell weißglühend (d.h. Temperatur überschreitet 1500 °C nicht), so konnte gezeigt werden,

dass die Bestrahlung für die Netzhaut nicht über den Grenzwerten für die Netzhaut liegen kann, auch nicht bei längerem Blick in die Quelle. Aufgrund der Helligkeit bzw. des Farbeindrucks eines Temperaturstrahlers lässt sich so auf seine Temperatur bzw. sein Gefahrenpotential im Hinblick auf eine potentielle Grenzwertüberschreitung schließen.

Bei rotglühenden Quellen wie z. B. einem Elektrogriller ($T = 550 \text{ °C}$) oder einer Aluminiumschmelze ($T = 800 \text{ °C}$, siehe Abb. 3 links) kann, bei entsprechend langer Aufenthaltsdauer in kurzer Distanz zur Quelle der Grenzwert „Infrarot, vordere Augenmedien“ überschritten werden. Neben der Helligkeit der Quelle ist auch die Expositionsdauer zu berücksichtigen, da die Grenzwerte der OStrV bzw. der VOPST zeitabhängig sind. Bei kurzer Expositionsdauer sind höhere Bestrahlungsstärken erlaubt im Vergleich zu langen Expositionsdauern. Betreffend dem Grenzwert „Infrarot, vordere Augenmedien (E_{IR})“ ist bei einer Expositionsdauer von 30 s eine maximale Bestrahlungsstärke von 1404 W/m^2 erlaubt, bei einer Bestrahlungsdauer von 5 Minuten beträgt der Grenzwert hingegen 250 W/m^2 . Für die in Abb. 2 dargestellte Arbeitsposition vor einem geöffneten Aluminium-Schmelzofen beträgt die maximale Expositionsdauer betreffend der Gefahr „Infrarot, vordere Augenmedien (E_{IR})“ 38 s. Bei weißglühenden Quellen, wie etwa einer Eisenschmelze, die Temperaturen bis zu 1500 °C aufweisen kann (siehe Abb. 3 rechts), wird der entsprechende Grenzwert für die vorderen Augenmedien (im Abstand zwischen Ofenöffnung und Gesicht des Arbeitnehmers beim Abschlacken, ca. 2 m, wie in Abb. 3 rechts dargestellt) bereits nach 29 s erreicht.

Auch die Größe (die Fläche) des Temperaturstrahlers spielt bei der Arbeitsplatzbewertung eine große Rolle. Handelt es sich beim Temperaturstrahler um eine Punktquelle (bzw. eine Quelle mit relativ kleiner Fläche) bzw. ist man am Arbeitsplatz nur einer kleinen Menge an heißem Material exponiert (wie z. B. beim Gießen von Kleinteilen), so ist eine Grenzwertüberschreitung betreffend der vorderen Augenmedien unwahrscheinlich. Bei allen durchgeführten Arbeitsplatzmessungen in der Industrie wurde kein Arbeitsplatz gefunden, bei dem der Grenzwert „Haut thermisch“ überschritten war.

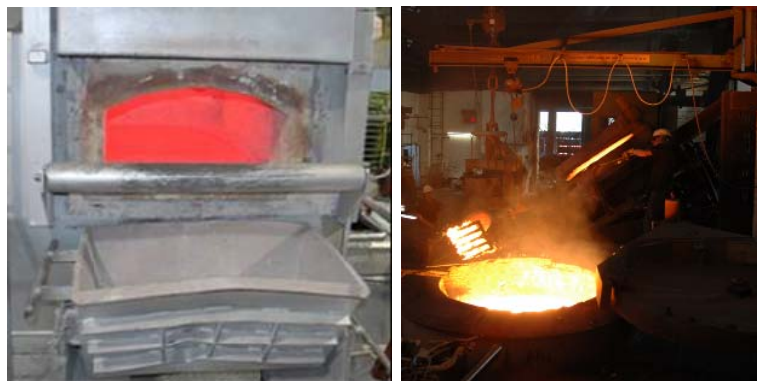


Abb. 3: Aluminium-Schmelzofen (links) sowie Eisen-Schmelzofen (rechts). Die Alu-Schmelze weist nur eine Temperatur bis maximal 800 °C auf, sie erscheint daher nur rotglühend. Die deutlich wärmere Eisen-Schmelze weist hingegen Temperaturen bis 1500 °C auf, sie erscheint daher bereits weißglühend. Das Risiko einer Grenzwertüberschreitung ist bei der Eisen-Schmelze daher höher.

Einen Überblick über die von Temperaturstrahlern ausgehenden möglichen Gefahren in Bezug auf eine Grenzwertüberschreitung gemäß OStrV bzw. VOPST gibt Tabelle 1.

Zusammenfassend kann bei der Gefährdungsabschätzung von Temperaturstrahlern nach dem in Abb. 4 dargestellten Schema vorgegangen werden.

Tab. 1: Temperatur der Quelle, der dabei entstehende Farbeindruck sowie mögliche Grenzwertüberschreitungen gemäß OStrV/VOPST.

Temperatur [°C]	Farbeindruck	Beispiel	Mögliche Grenzwertüberschreitung gemäß OStrV/VOPST
200	Kein sichtbares Licht emittiert	Backöfen, IR-Flächenheizelemente	Keine Grenzwertüberschreitung
530	Beginnende Rotglut	Elektrogriller, Kochplatten	Beginnende Gefahr für vordere Augenmedien (E_{IR}) wenn Distanz zur Quelle klein und Expositionsdauer relativ lange ist
1500	Blendende Weißglut	Eisenschmelzen	Gefahr für vordere Augenmedien (E_{IR}), beginnende Gefahr für die Netzhaut (L_B, L_R)
5500	Neutrales Weiß	Sonne	Gefahr für die Netzhaut, Gefahr durch UV-Strahlung für Haut und vordere Augenmedien

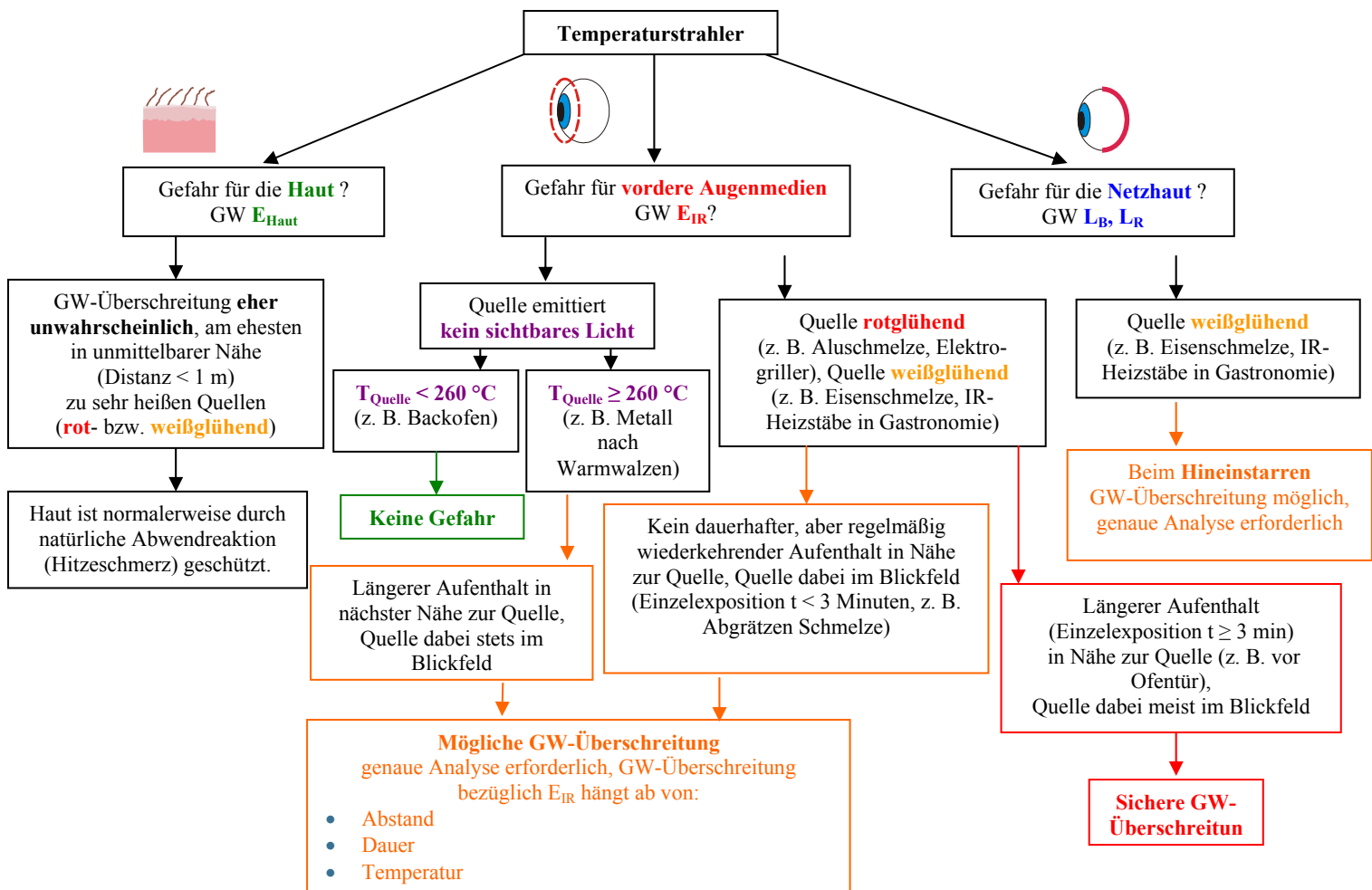


Abb. 4: Schema für die vereinfachte Gefährdungsabschätzung von Temperaturstrahlern.

3. Vereinfachte Bewertungsmöglichkeit II – Helligkeit und Blendung

Sichtbares Licht durchdringt die vorderen Augenmedien fast ungeschwächt und wird auf der Netzhaut von unseren Photorezeptoren „detektiert“. Die Helligkeit einer Quelle, zumindest einer weißen Quelle, kann zur Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich einer potentiellen Gefährdung der Netzhaut durch sichtbare Strahlung heran gezogen werden, da die Helligkeit von der Größe her eine visuell bewertete Strahldichte ist und die Grenzwerte für die Netzhaut auch in Strahldichte angegeben sind, jedoch mit einer anderen spektralen Bewertungsfunktion. Quellen optischer Strahlung können nur dann die Netzhaut-Grenzwerte (photochemisch bzw. thermisch) gemäß VOPST bzw. OStrV überschreiten, wenn sie so hell sind, sodass der Betrachter geblendet wird¹. Die Überschreitung des Grenzwertes „Netzhaut thermisch“ tritt bei Breitbandquellen (Lampen, Leuchten, LEDs) relativ selten auf (im Gegensatz zu Laser) und wurde bis dato z. B. nur bei Fotoblitzern oder IPLs (Intense Pulsed Light) beobachtet (gepulste Quellen, bei der eine hohe Bestrahlungsstärke innerhalb kurzer Zeit emittiert wird). Bei Breitbandquellen tritt hingegen eher eine Überschreitung des Grenzwertes „Netzhaut photochemisch“ (Blaulichtgefahr) auf.

3.1 Leuchtdichte - Helligkeit

Für den Helligkeitseindruck einer Lichtquelle ist die Leuchtdichte L_v (Einheit: cd/m^2) die entscheidende Größe und nicht die Beleuchtungsstärke E_v (Einheit: lx). Gemäß Kapitel 4.1 der Lampensicherheitsnorm EN 62471 [3] kann davon ausgegangen werden, dass (weiße) Quellen, die eine Leuchtdichte von $L_v = 10000 \text{ cd/m}^2$ nicht überschreiten, zu keiner Grenzwertüberschreitung betreffend der Netzhautgrenzwerte führen können. Allerdings sollte man den Wert von 10000 cd/m^2 nur als „orientierenden Richtwert“ heranziehen, und nicht als absoluten Grenzwert für die Helligkeit, ab der eine Grenzwertüberschreitung möglich ist. Bei der Leuchtdichte handelt es sich um eine photometrische Größe, d.h. die Leuchtdichte berücksichtigt den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für photopisches Sehen (Tagsehen). Die Grenzwerte für die Netzhaut sind allerdings als effektive Strahldichtegrenzwerte gegeben. Dabei handelt es sich um radiometrische Größen wobei Wirkungsspektren zu berücksichtigen sind, die von der $V(\lambda)$ – Kurve deutlich abweichen (siehe Abb. 5).

¹ Ausnahmen sind Quellen, die eine Gefährdung betreffend „Netzhaut thermisch – schwacher visueller Stimulus“ darstellen. Diese Quellen emittieren intensive optische Strahlung im IR-A (780 nm – 1400 nm), verfügen jedoch über eine Leuchtdichte $< 10 \text{ cd/m}^2$, sodass hierbei keine Blendung auftritt (z. B. Hochleistungs-Infrarot-LEDs).

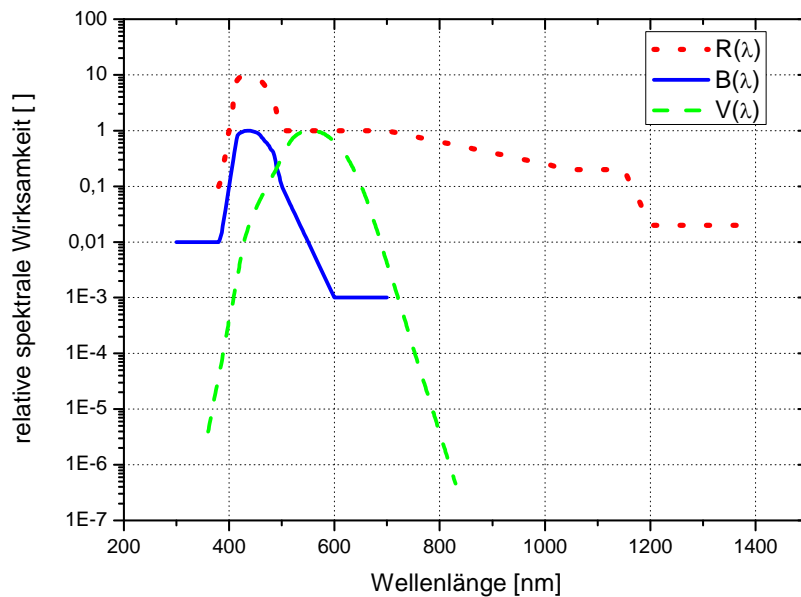


Abb. 5: Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für das Tagsehen sowie Wirkungsspektren $B(\lambda)$ für die Blaulichtgefahr und $R(\lambda)$ für die thermische Netzhautschädigung. Das Wirkungsspektrum $R(\lambda)$ wurde kürzlich von der ICNIRP modifiziert und der Grenzwert für die thermische Netzhautschädigung wird ebenfalls in der nächsten Ausgabe der Guidelines entsprechend adaptiert.

Eine handelsübliche, neutralweiße Leuchtstoffröhre wie z. B. die Philips TLD 58W/940 DeLuxe 90 besitzt eine Leuchtdichte von $L_v = 12000 \text{ cd/m}^2$. Eine Grenzwertüberschreitung des Blaulichtgrenzwertes ist mit dieser Leuchtstoffröhre selbst bei dauerhaftem Starren aus 20 cm Entfernung in die Röhre nicht möglich, da der Grenzwert von $L_B = 100 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (Blaulichtgrenzwert für Zeitbasis $t = 10000 \text{ s}$) deutlich unterschritten wird (effektive Strahldichte gemittelt über $100 \text{ mrad} = 12,4 \text{ W/m}^2/\text{sr}$). Bei der Leuchtstoffröhre handelt es sich daher um eine Lampe der Freien Gruppe (Risikogruppe 0) und sie ist, gemäß Philosophie der Freien Gruppe, sicher, selbst bei Dauerbestrahlung. Das Spektrum der Leuchtstoffröhre ist in Abbildung 6 dargestellt.

Es gibt aber auch Quellen, die eine Leuchtdichte $L_v < 10000 \text{ cd/m}^2$ aufweisen und trotzdem den Blaulichtgrenzwert für Dauerbestrahlung von $L_B = 100 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ überschreiten und somit ein höheres Gefährdungspotential haben als weiße Quellen mit einer Leuchtdichte $L_v > 10000 \text{ cd/m}^2$. Bei der betreffenden Quelle handelt es sich um eine blaue LED, der ein Diffuser vorgesetzt ist. Diese Quelle wird zur Behandlung der Gesichtshaut eingesetzt (Consumer Product) und sie weist lediglich eine Leuchtdichte von $L_v = 5600 \text{ cd/m}^2$ auf. Die Blaulicht-effektive Strahldichte beträgt bei dieser Quelle, gemittelt über einen Messempfangswinkel von 100 mrad $L_B = 612 \text{ W/m}^2 \text{ sr}$. Gemäß Lampensicherheitsnorm EN 62471 handelt es sich bei dieser Leuchte um ein Produkt der Risikogruppe 1 (Geringes Risiko). Da die blaue LED ihr Maximum bei einer Wellenlänge von 412 nm besitzt und eine sehr kleine Halbwertsbreite hat (15 nm), sind die entsprechenden photometrischen Größen (Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke) klein, da die $V(\lambda)$ Kurve in diesem Wellenlängenbereich noch relativ klein ist (siehe Abb. 5). Deutlich höher ist in diesem Wellenlängenbereich bereits das Wirkungsspektrum für die Blaulichtgefahr $B(\lambda)$, sodass für diese Leuchte relativ hohe Blaulicht-effektive Strahldichten erhalten werden. Das Spektrum des LED-Produkts ist in Abbildung 6 dargestellt.

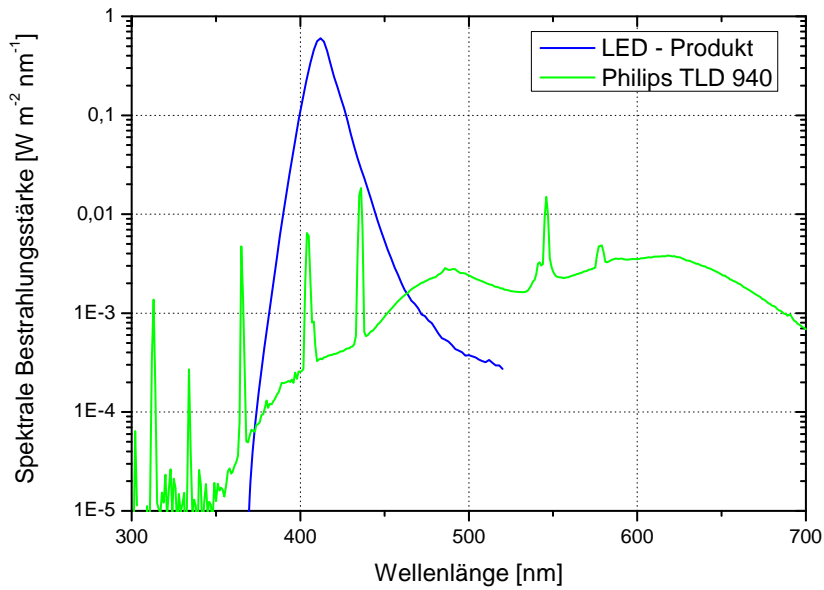


Abb. 6: Spektrale Bestrahlungsstärke der neutralweißen Philips-Leuchtstoffröhre (grüner Graph) sowie des LED-Produkts (blauer Graph) in einem Messabstand von 20 cm bei einem Mittelungssichtfeld von 100 mrad in dem für die Blaulichtgefahr relevanten Wellenlängenbereich (300 nm – 700 nm).

Abb. 7 zeigt die mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ sowie fotometrischen Strahlungsäquivalent $K(\lambda)$ gewichteten Spektren der beiden Quellen aus Abb. 6. Dabei handelt es sich um die spektrale Beleuchtungsstärke (lux/nm) der beiden Quellen (bei Berücksichtigung des entsprechenden Messempfangswinkels in der Einheit Steradian (sr) und Integration über den Wellenlängenbereich erhält man die Leuchtdichte in cd/m^2).

Abb. 8 zeigt die mit der Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ für die Blaulichtgefahr gewichteten Spektren aus Abb. 6. Dabei handelt es sich um die Blaulicht-effektive spektrale Bestrahlungsstärke der jeweiligen Quelle. Nach Integration über den Wellenlängenbereich und Division durch das Mittelungssichtfeld (in sr) erhält man die gemittelte effektive Strahldichte bezüglich der Blaulichtgefahr.

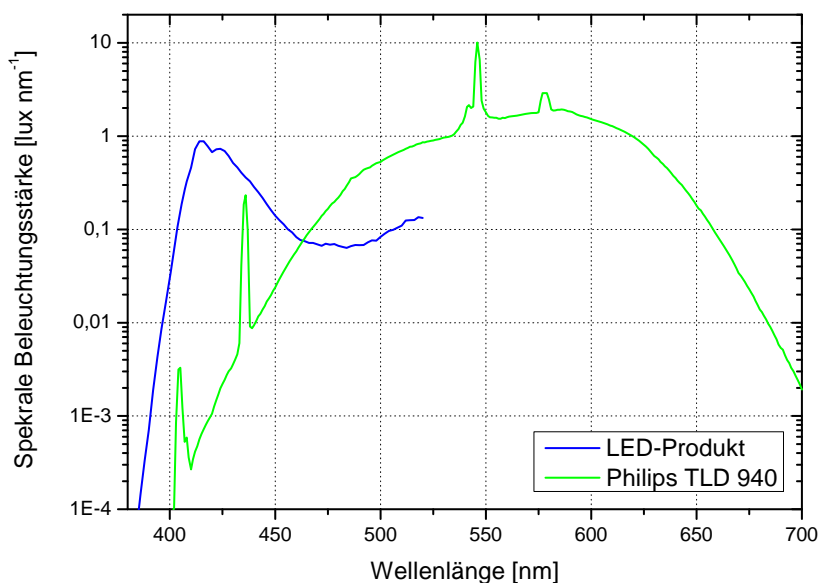


Abb. 7: Spektrale Beleuchtungsstärke der neutralweißen Leuchtstoffröhre sowie des LED-Produkts im Abstand von 20 cm (Mittlungssichtfeld 100 mrad). Aufgrund ihres spektralen Verlaufes sind die photometrischen Größen bei der Leuchtstoffröhre deutlich größer im Vergleich zum LED-Produkt.

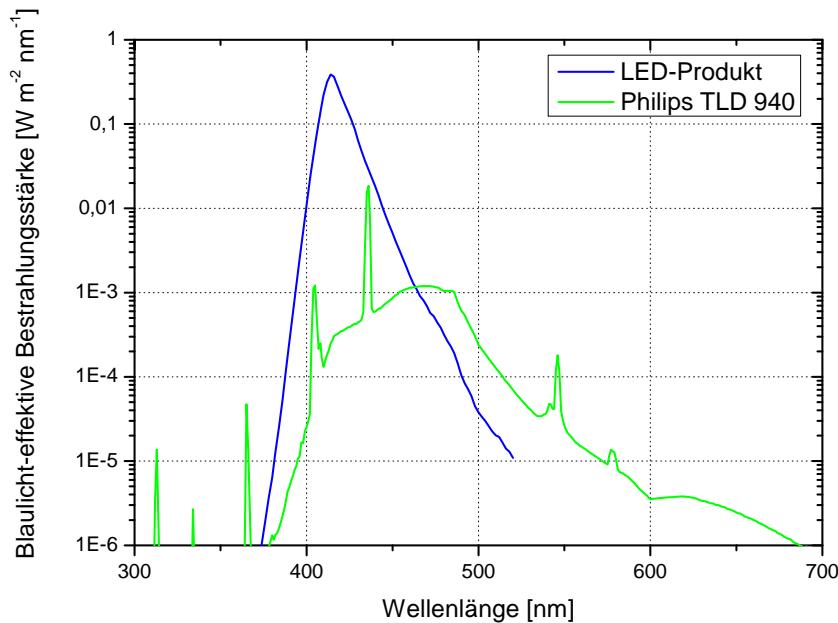


Abb. 8: Blau-licht-effektive spektrale Bestrahlungsstärke im Messabstand von 20 cm und einem Mittlungssichtfeld von 100 mrad für die neutralweiße Leuchtstoffröhre (grüner Graph) und das LED-Produkt (blauer Graph).

Das Beispiel mit blauem LED-Produkt und neutralweißer Leuchtstoffröhre verdeutlicht, dass alleine aufgrund der Leuchtdichte einer Quelle noch keine Rückschlüsse auf eine mögliche Grenzwertüberschreitung betreffend der Netzhaut gemäß VOPST/OStrV möglich sind. Bei Quellen, die ausschließlich ein Spektrum im blauen Spektralbereich aufweisen, kann es beim Heranziehen der Leuchtdichte zur Risikoabschätzung zu einer Unterbewertung der möglichen Gefahr kommen. Bei Quellen, die hingegen ein markantes Spektrum im Bereich des Maximums der $V(\lambda)$ – Kurve aufweisen (siehe Peak der Leuchtstoffröhre knapp unterhalb 550 nm), kann es beim ausschließlichen Heranziehen der Leuchtdichte als Beurteilungskriterium für eine mögliche Grenzwertüberschreitung zu einer Überbewertung des Risikos kommen.

Aufgrund von Erfahrungswerten lässt sich ableiten, dass weiße Quellen (d.h. die Quelle besitzt ein Spektrum über den gesamten Spektralbereich des sichtbaren Lichts) eine Leuchtdichte deutlich über 10000 cd/m^2 haben muss, damit die Quelle ernsthaft eine Gefahr für die Netzhaut des Auges darstellt. Wie kann man nun aber trotzdem mit relativ einfachen Mitteln feststellen, ob eine Quelle möglicherweise eine Gefährdung für die Netzhaut darstellt? Dazu kann der Blendungseindruck, den man von einer Quelle gewinnt, heranziehen.

3.2 Blendung

Im Allgemeinen wird Blendung als ein Sehzustand definiert, der entweder aufgrund zu großer absoluter Leuchtdichte (Absolutblendung), zu großer Leuchtdichteunterschiede (Relativblendung) oder aufgrund einer ungünstigen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld

als unangenehm empfunden wird oder zu einer Herabsetzung der Sehleistung führt [5]. Die Blendung hängt vom Adaptationszustand des Auges ab und entsteht daher durch eine Leuchtdichte, die für den jeweiligen Adaptationszustand zu hoch ist. Insgesamt besitzen unsere Augen die Fähigkeit, sich dem Leuchtdichtebereich von etwa 10^{-6} cd/m² (Sehschwelle) bis 10^5 cd/m² anzupassen, wobei man von konstanten Sehleistungen in einem Bereich von etwa 100 cd/m² bis 10000 cd/m² ausgehen kann. Zusätzlich sind die scheinbare Größe der Blendlichtquelle bzw. deren Raumwinkel von Bedeutung, sowie der Projektionsort der jeweiligen Blendlichtquelle auf der Netzhaut [5].

Wie aus der Literatur ersichtlich [5 – 7] ist, handelt es sich bei der Blendung um ein sehr komplexes Gebiet. So gibt es sehr unterschiedliche Arten von Blendung (z. B. Relativblendung, Absolutblendung, psychologische Blendung, physiologische Blendung) sowie auch unterschiedliche Methoden der Blendungsbewertung. Damit eine Quelle zu einer potentiellen Gefahr für die Netzhaut wird, muss jedenfalls Absolutblendung vorliegen. Diese kann ab Leuchtdichten von $L_v > 10000$ cd/m² auftreten [5] (bei Quellen, die ausschließlich blaues Licht emittieren auch schon bei geringeren Leuchtdichten). Absolutblendung tritt beispielsweise bei Bühnenscheinwerfern wie Verfolgerspots auf (siehe Abb. 9). Diese können Leuchtdichten $> 10^8$ cd/m² aufweisen. Steht man auf der Bühne und blickt in Richtung Spot, so hat man einen intensiven Blendungseindruck sowie eine stark verminderte Sehleistung. Auf der Bühne wird in diesem Fall der Grenzwert für die Blaulichtgefahr innerhalb von 40 s überschritten.

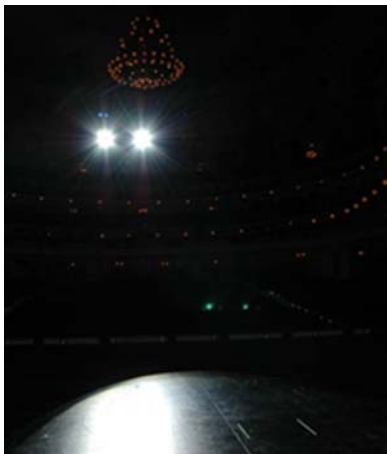


Abb. 9: Absolutblendung auf einer Theaterbühne durch Verfolgerspot-Scheinwerfer. Im konkreten Fall wird der Blaulicht-Grenzwert innerhalb von 40 s überschritten.

Um die Blendung zu quantifizieren, existieren zahlreiche Bewertungsmethoden. Für die Blendungsbewertung in Innenräumen hat sich das UGR-Verfahren (unified glare rating) durchgesetzt. Dieses Verfahren wurde von der CIE (Internationale Beleuchtungskommission) entwickelt, um die psychologische Direktblendung bewerten zu können [5]. Wie aus Formel (1) ersichtlich, hängt der UGR-Wert von den Parametern

- Leuchtdichte L_s der Blendquelle [cd/m²] in Richtung zum Beobachter
- Raumwinkel Ω_s [sr] unter dem die Blendquelle gesehen wird
- Umfeldleuchtdichte (Hintergrundleuchtdichte) L_b [cd/m²]
- Positionsindex p (siehe [8])

ab.

$$UGR = 8 \cdot \log\left[\frac{0,25}{L_b} \cdot \sum_s \frac{L_s^2 \cdot \Omega_s}{p^2}\right] \quad (1)$$

Je höher die Leuchtdichte der Blendquelle und je größer die Blendquelle ist, desto stärker ist die Blendungsempfindung. Die Blendwirkung sinkt hingegen wenn die Quelle vom Zentrum in die Peripherie des Gesichtsfeldes rückt (dies wird durch den Positionsindex p berücksichtigt). Da die Leuchtdichte der Blendquelle und der Positionsindex quadratisch in die Formel eingehen, haben diese beiden Parameter den größten Einfluss auf den UGR-Wert.

Die Grenzen der Anwendbarkeit des UGR-Verfahrens hängen von der Größe der Blendlichtquelle und vom Anteil der indirekten Strahlung aus der Lichtquelle ab. So ist es nur für Leuchten anwendbar, die einen nicht zu großen indirekten Strahlungsanteil haben, sowie für Quellen, die einen Raumwinkel zwischen 0,0003 sr und 0,1 sr aufspannen [5].

Die Blendungsempfindung steigt direkt proportional mit dem UGR-Wert an. Bei einem UGR-Wert von 13 wird die Blendung als gerade wahrnehmbar und bei einem Wert von 28 und darüber als unzumutbar (unerträglich) empfunden. Grenzwerte für den UGR-Wert, die ein gerade noch akzeptables Blendungsniveau beschreiben, sind in der EN 12464 für die Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen in Abhängigkeit von den Arbeits- und Sehaufgaben festgelegt [5].

Im Rahmen des Forschungsprojekts VISIR der AUVA wurde der Zusammenhang zwischen UGR-Wert und photobiologischem Gefahrenpotential bezüglich der Netzhaut gemäß EN 62471 von Quellen optischer Strahlung untersucht. Dazu wurde von zahlreichen Quellen der UGR-Wert sowie auch die Risikogruppe gemäß EN 62471 bestimmt. Detaillierte Beschreibungen zu diesen Messungen sind in [9] und [10] enthalten. Als Hintergrundinformation zur Bedeutung der Risikogruppen gemäß EN62471 dienen die Tabellen 2 und 3.

Tab. 2: Risikogruppen gemäß EN 62471 und deren Bedeutung.

Risikogruppe	Bedeutung
Freie Gruppe (RG 0)	Kein Risiko – Quelle stellt im Sinn der Kriterien der EN 62471 keine photobiologische Gefahr im Referenzabstand dar.
Risikogruppe 1 (RG 1)	Geringes Risiko – Quelle stellt aufgrund von normalen Einschränkungen durch das Verhalten keine Gefahr dar.
Risikogruppe 2 (RG 2)	Mittleres Risiko – Quelle stellt aufgrund von Abwendreaktionen bei hellen Quellen oder durch thermisches Unbehagen keine Gefahr dar.
Risikogruppe 3 (RG 3)	Hohes Risiko – Quelle stellt sogar bei flüchtiger oder kurzzeitiger Bestrahlung im Referenzabstand eine Gefahr dar.

Tab. 3: Grenzwerte je Risikogruppe für die Netzhaut-Gefahren sowie dazugehörige Zeitbasen.

Gefahr	Bewertungs- funktion	Grenzwerte/Zeitbasis			Einheit
		RG 0	RG 1	RG 2	
Blaulicht	B(λ)	100	10000	4000000	W/m ² /sr
		10000	100	0,25	s
Netzhaut thermisch	R(λ)	28000/ α ¹⁾	28000/ α	71000/ α	W/m ² /sr
		10	10	0,25	s

¹⁾ α = Quellgröße

Bei der Messung der photobiologisch effektiven Strahldichten ist zu berücksichtigen, dass je nach Zeitbasis unterschiedliche Mittelungssichtfelder (field-of-view, FOV) zu verwenden sind (siehe [3]). Besitzt eine Quelle bei Verwendung eines FOV von 100 mrad eine Blaulicht-effektive Strahldichte von z.B. $L_B = 900 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ und bei Verwendung eines FOV von 11 mrad eine Blaulicht-effektive Strahldichte $L_B < 10000 \text{ W/m}^2/\text{sr}$, so handelt es sich dabei um eine Quelle der Risikogruppe 1. Man darf hierbei zumindest 100 s über einen 8 h – Arbeitstag exponiert sein, bevor es zu einer Grenzwertüberschreitung kommt. Bei der Blaulicht-Gefahr ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei um eine photochemische Gefährdung handelt. Folglich sind alle Einzelexpositionen über einen Arbeitstag zu berücksichtigen und die über den Tag auf akkumulierte Dosis ist mit dem Grenzwert ($10^6 \text{ J/m}^2/\text{sr}$) zu vergleichen. Betreffend der Gefahr „Netzhaut thermisch“ ist anzumerken, dass es hierbei keine RG 1, sondern nur RG 0, RG 2 sowie RG 3 gibt (wie aus Tabelle 3 ersichtlich, gibt es betreffend „Netzhaut thermisch“ lediglich Grenzwerte für die beiden Zeitbasen 10 s und 0,25 s; bei derart kurzen Expositionsdauern ist die Einführung einer weiteren Zeitbasis und somit Risikogruppe nicht sinnvoll). Im Allgemeinen gilt: Je höher die Risikogruppe, desto kürzer ist bei einem bestimmten Abstand die maximale Bestrahlungsdauer (Bestrahlungsdauer, bis man den Grenzwert erreicht hat).

Genau genommen ist die Risikogruppe gemäß EN 62471 in einem Referenzabstand zu messen. Dieser Referenzabstand entspricht bei Allgemeingebrauchslampen (z. B. Quellen, die dafür gedacht sind, Orte zu beleuchten, an denen sich typischerweise Leute aufhalten oder die von Leuten betrachtet werden wie Büros, Fabriken, Straßen,...) jenem Abstand, in dem die Beleuchtungsstärke 500 lux entspricht (aber keinesfalls weniger als 20 cm). Für alle anderen Quellen ist die Risikogruppe im Abstand von 20 cm zu bestimmen. Die Untersuchungen zeigten, dass in jenem Abstand, in dem die Beleuchtungsstärke einer weißen Quelle 500 lux entspricht, diese normalerweise keine Gefahr für die Netzhaut darstellt. Die Risikogruppe wurde im Rahmen der Gegenüberstellung mit den UGR-Werten in jenen Abständen bestimmt, in denen auch die Blendungsbeurteilung durchgeführt wurde, was nicht ganz der Definition der Risikogruppe entspricht, da sich diese nur auf die vorgegebene Referenzposition bezieht. Die Risikogruppen können jedoch für die jeweilige Position direkt mit einem entsprechenden Bereich für die zulässigen Bestrahlungsdauern in Verbindung gebracht werden. Die ermittelten UGR-Werte sind den ermittelten Risikogruppen je Quelle in Tabelle 4 gegenüber gestellt.

Tab. 4: Ermittelte UGR-Werte bzw. Risikogruppe für die Gefährdung der Netzhaut bei unterschiedlichen Quellen optischer Strahlung.

Quelle	UGR-Wert	Risikogruppe (betreffend Netzhautgefährdung)
Philips Halotone PAR30L 75 Watt (Halogen-Reflektorlampe, Allgemeinbeleuchtung)	21	0
Leuchtstoffröhre Philips TLD 58W/950 De Luxe (Allgemeinbeleuchtung)	23	0
Quarzhalogenglühlampe mattiert Typ CL2, 100 Watt (Bentham, Allgemeinbeleuchtung)	27	0
LCD-Projektor EMP-765 (Epson), Leuchtmittel: Lampe L32, 170 Watt	38	2 (Blaulicht & Netzhaut thermisch)
Ellipsenscheinwerfer Typ Source Four jr 26°, 575 Watt (Electronic Theatre Controls Inc., Bühnenscheinwerfer)	42	1 (Blaulicht)
Metz Mecablitz Typ 54 AF-1N digital (Metz, Foto-Blitzgerät)	58	3 (Netzhaut thermisch)
Sonne (gemessen am 8. April, 12:30 Uhr MESZ bei wolkenlosem Himmel in Seibersdorf, 47,96° n.B., 184 m NN)	61	2 (Blaulicht & Netzhaut thermisch)

Aus den in Tabelle 4 gelisteten Quellen ist ersichtlich, dass der UGR-Wert einer weißen Quelle derart hoch sein muss (> 27), damit die Quelle überhaupt eine potentielle Gefahr für die Netzhaut darstellen kann, d. h. die Quelle der Risikogruppe 1, 2 oder 3 angehört. Die Blendung muss, gemäß der Bedeutung der UGR-Werte, unerträglich hoch sein (automatisches Einsetzen der Abwendreaktion), damit eine Quelle ein potentielles Risiko für die Netzhaut darstellt. Nachdem die EN 12464 UGR-Werte je nach Arbeitsplatz bzw. Sehaufgabe vorgibt, und diese UGR-Werte ≤ 28 sind, kann davon ausgegangen werden, dass die auf diesen Arbeitsplätzen eingesetzten Quellen zu keiner Grenzwertüberschreitung betreffend einen Netzhaut-Grenzwert führen.

Vorsicht ist auch hier geboten bei Quellen, die ausschließlich im blauen Spektralbereich emittieren. Wie unter 3.1. angeführt, haben diese Quellen aufgrund ihres Spektrums eine geringere Leuchtdichte im Vergleich zu weißen Quellen und folglich ist auch der UGR-Wert dieser Quellen kleiner als bei Weißlicht-Quellen. Daraus resultiert, dass Quellen ausschließlich blauen Lichts bereits bei kleineren UGR-Werten eine potentielle Gefahr für die Netzhaut darstellen können.

3.3 Vereinfachte Bewertung bei hellen Quellen

Vereinfacht kann gesagt werden: verursacht eine Quelle keine Blendung, so geht von ihr keine Gefahr aufgrund von zu intensivem Licht aus, selbst bei langem Starren in die Quelle. Es gibt allerdings helle Quellen, die bei langem absichtlichem Hineinstarren zu einer

Schädigung der Netzhaut aufgrund von zu intensivem Licht führen können. Beispiele hierfür sind

- Sonne bei kleinem Zenitwinkel
- Entladungslampen (z. B. Xenon-Kurzbogenlampen)
- Beamer & Projektoren
- Bühnenscheinwerfer
- Schweißplasma

Bei der Exposition am Arbeitsplatz kann man im Rahmen der Risikoanalyse durchaus ein entsprechendes natürliches Verhalten der Arbeitnehmer berücksichtigen. Die Wahrscheinlichkeit, dass jemand absichtlich länger in eine blendend helle Quelle starrt, wenn es dazu keinen speziellen Grund gibt, ist gering. Wenn es aufgrund des Arbeitsvorganges wie z.B. beim Schweißen einen Grund gibt, in die blendend helle Quelle zu blicken, dann wird alleine schon deshalb ein entsprechender Filter in den Schutzbrillen verwendet werden, weil man sonst aufgrund der Blendung den Arbeitsvorgang nicht beobachten kann.

Zusammenfassend kann bei der Gefährdungsbeurteilung von Quellen aufgrund der Strahlungsintensität sowie des Blickverhaltens nach dem in Abb. 10 dargestellten Schema vorgegangen werden. Das in Abb. 10 dargestellte Schema gilt nicht für Blitzlichtlampen, da ein thermisches Risiko bei dieser Art von Quellen besteht.

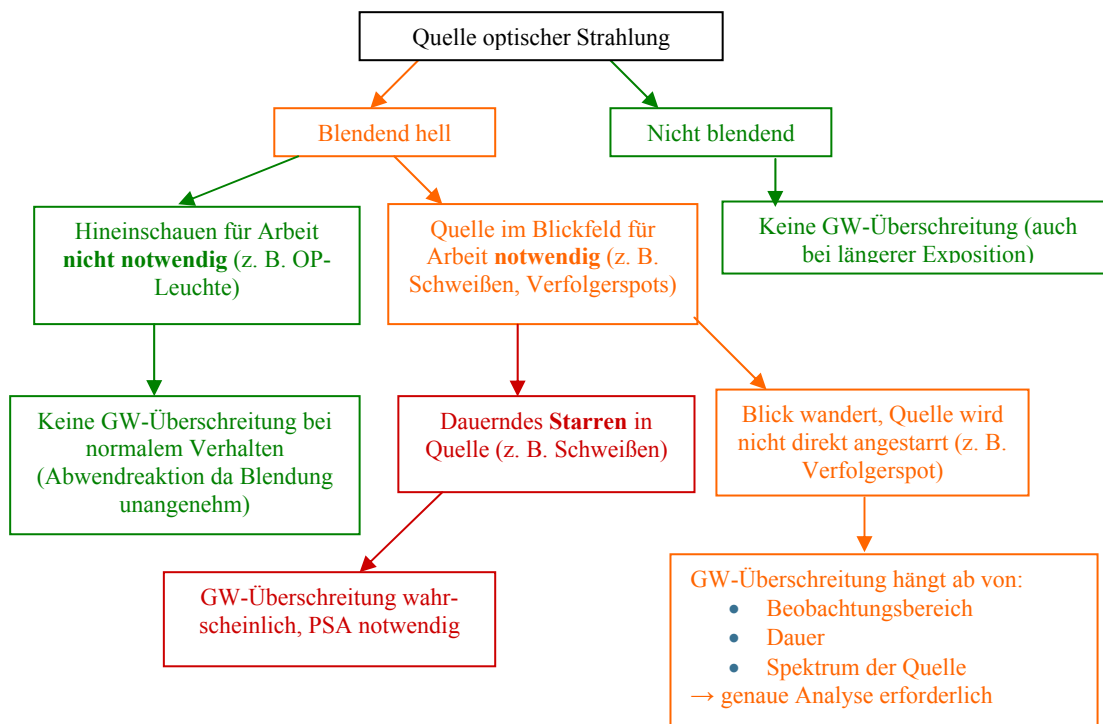


Abb. 10: Schema für die Gefährdungsabschätzung von Quellen optischer Strahlung, basierend auf dem Helligkeitseindruck sowie des Blickverhaltens.

4. Zusammenfassung

Aus Berechnungen und praktischen Messungen auf Arbeitsplätzen kann abgeleitet werden, dass bei Temperaturstrahlern bei Kenntnis ihrer Oberflächentemperatur bzw. bei Berücksichtigung ihres Farbeindrucks eine Abschätzung betreffend einer potentiellen Grenzwertüberschreitung gemäß VOPST/OStrV möglich ist. Je nach Expositionssituation kann dabei bereits a priori eine Grenzwertüberschreitung ausgeschlossen werden, bzw. muss in manchen Fällen die entsprechende Exposition genauer untersucht werden (z. B. betreffend Abstand, Expositionsdauer und Blickverhalten). Für die Bewertung mancher Arbeitsplätze ist eine exakte Messung vor Ort unumgänglich.

Auch die Helligkeit bzw. Blendungsbeurteilung kann bei Weißlicht-Quellen für eine Gefährdungsabschätzung bezüglich der Netzhaut-Gefahren herangezogen werden. Erst wenn Quellen weißen Lichts als stark blendend wahrgenommen werden, können diese auch eine potentielle Gefahr für die Netzhaut darstellen, wie die Gegenüberstellung der UGR-Werte ausgewählter Quellen mit ihren Risikogruppen gemäß EN 62471 zeigt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor der Einwirkung durch optische Strahlung (Verordnung optische Strahlung – VOPST), 8. Juli 2010, Internet: <http://www.arbeitsinspektion.gv.at/NR/rdonlyres/0FE4CEB1-6FFC-4BA4-9634-F97A7A51DFFF/0/VOPST.pdf>
- [2] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV), BGBl. I S. 960, 19. Juli 2010, Internet: <http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/ostrv/gesamt.pdf>
- [3] ÖVE/ÖNORM EN 62471:2009: Photobiologische Sicherheit vom Lampen und Lampensystemen. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2009
- [4] Schulmeister, K.: Expected Changes for the Retinal Thermal Exposure Limits for Broadband Incoherent Radiation of IEC 62471 and ICNIRP. Proceedings of the International Laser Safety Conference, March 14-17th 2011, San Jose, p 255 – 259, published by the Laser Institute of America, Orlando, Florida
- [5] Strahlenschutzkommission, Blendung durch natürliche und neue künstliche Lichtquellen und ihre Gefahren, Februar 2006, Internet: <http://www.ssk.de/de/werke/2006/volltext/ssk0601.pdf>
- [6] Reidenbach, H.-D., Dollinger, K., Ott, G., Janßen, M., Brose, M. Blendung durch optische Strahlungsquellen, BAUA Forschung Projekt F 2185, Dortmund/Berlin/Dresden, 2008, Internet: http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/F2185.pdf?_blob=publicationFile&v=6
- [7] CIE 146 – 147:2002: CIE Collection on Glare, ISBN 3901906150
- [8] CIE 117-195: Technical Report: Discomfort Glare in Interior Lighting, ISBN 3900734704

- [9] Nowakowska, A. Blendungsbeurteilung von Quellen optischer Strahlung und Beurteilung der Blendungsschutzwirkung von Sonnenbrillen, Bachelorarbeit an der FH Technikum Wien, Mai 2009
- [10] Weber, M., Schulmeister, K., E. Kitz, H. Brusl, Sicherheit Optische Strahlung – sichtbare und Infrarotstrahlung, Veröffentlichung voraussichtlich August 2011