

BEWERTUNG DER BLAULICHTGEFAHR VON THEATER- UND BÜHNENBELEUCHTUNG

ASSESSMENT OF THE BLUE LIGHT HAZARD OF THEATRE- AND STAGE-LIGHTING

M. Weber¹, K. Schulmeister¹, E. Kitz²

¹Laser, LED und Lampen-Sicherheit, Seibersdorf Labor GmbH, Österreich

²Unfallverhütung und Berufskrankheitenbekämpfung, Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Hauptstelle Wien, Österreich

Zusammenfassung — *Unterschiedliche Arten von Theater- und Bühnenbeleuchtung (HMI-, LED-, Halogen-Scheinwerfer) wurden unter Anwendung der Messvorschriften gemäß IEC 62471:2006 (Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen) und der Grenzwerte gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC („künstliche optische Strahlung“, Grenzwerte entsprechen jenen in der OStrV in Deutschland bzw. VOPST in Österreich) im Arbeitsabstand hinsichtlich Ihrer Blaulichtgefahr bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem bei HMI-Scheinwerfern eine Grenzwertüberschreitung innerhalb kurzer Zeit möglich ist. Weiters wird aufgezeigt, wie sich unterschiedliche Einflussgrößen auf die maximale Expositionsdauer für die Augen auswirken und wie derartige Quellen möglichst realitätsnah in Zukunft hinsichtlich Ihrer Blaulichtgefahr bewertet werden können.*

Summary — *The blue light hazard of different types of theatre- and stage-lighting (metal halide, LED, quartz halogen) were assessed according to IEC 62471:2006 (Photobiological safety of lamps and lamp systems) at their usual working distance. The measured effective radiances were compared with the limits according to EU-directive 2006/25/EC (“artificial optical radiation”, limits identical as given in OStrV in Germany and VOPST in Austria). The results show that the limit can be exceeded within a very short exposure period, especially in case of metal halide lighting. The influence of different parameters on the maximum exposure duration for the retina is explained. A method is presented which allows a more realistic blue light hazard assessment of stage lighting in the future.*

Schlüsselwörter — *Blaulichtgefahr, Bühnenbeleuchtung, EU-Richtlinie 2006/25/EC, IEC 62471:2006*

Keywords — *Blue Light Hazard, Stage Lighting; EU-directive 2006/25/EC, IEC 62471:2006*

1. Einleitung

Expositionsgrenzwerte für optische Breitbandstrahlung werden in Österreich durch die Verordnung optische Strahlung (VOPST [1]) im Anhang A vorgegeben (identische Expositionsgrenzwerte aus EU-Richtlinie 2006/25/EG [2] für künstliche optische Strahlung). Die EU-Richtlinie bzw. die entsprechenden nationalen Verordnungen (in Österreich: VOPST, in Deutschland: OStrV [3]) sehen keine Ausnahmen bezüglich der Gefährdungsermittlung am Arbeitsplatz vor, d.h. es müssen alle Quellen künstlicher optischer Strahlung am Arbeitsplatz bezüglich Einhaltung der Expositionsgrenzwerte in einer Gefährdungsbeurteilung berücksichtigt werden. Angaben seitens der Hersteller von Theater- und Bühnenbeleuchtung sind derzeit nicht bzw. nur in seltenen Fällen verfügbar, sodass es bei den meisten

Scheinwerfern noch nicht möglich ist, aufgrund von Herstellerangaben auf das Gefahrenpotential eines Bühnenscheinwerfers zu schließen.

Ziel des Projekts BÜHNE im Auftrag der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt (AUVA) war die Ermittlung des Gefährdungspotentials von Theater- und Bühnenbeleuchtung betreffend der emittierten Ultraviolett (UV)-Strahlung und des emittierten blauen Lichts (kurz Blaulicht), sowie die Erarbeitung einer Evaluierungsmethode (Methode für Gefährdungsbeurteilung) für die durch Theater- und Bühnenbeleuchtung verursachte Exposition von Arbeitnehmern (Schauspieler, Lichttechniker, Beleuchter) durch optische Strahlung. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur die Blaulichtgefahr berücksichtigt, da diese von den untersuchten photobiologischen Gefahren die Bestrahlungsdauer für das Auge (Netzhaut) limitiert. Aufgrund des Blendungsempfindens bei sichtbarer Strahlung hat die exponierte Person die Möglichkeit zu reagieren, im einfachsten Fall sich abzuwenden. Bei Quellen, die intensives sichtbares Licht abgeben, kann von kurzen Expositionsdauern ausgegangen werden. Beim Blick in einen HMI (Halogen-Metaldampfampe)-Verfolgerspot kommt es aufgrund des intensiven sichtbaren Lichts zu einer starken Blendung. Die maximal erlaubte Expositionsdauer für die Augen ist aufgrund der Blaulichtgefahr für die Netzhaut für solche Scheinwerfer kurz.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden Messungen auf vier Bühnen in Wien durchgeführt und dabei insgesamt 19 Scheinwerfer (HMI-, Halogen- sowie LED-Scheinwerfer) hinsichtlich Gefährdung durch Blaulicht beurteilt. Für das jeweilige „worst-case“ Expositionsszenario (direkter Blick in den Scheinwerfer) wurde die maximal erlaubte Bestrahlungsdauer (Zeit, bis Grenzwert erreicht ist) bestimmt. Diese Daten erlauben, unter Berücksichtigung weiterer Parameter wie beispielsweise Pupillengröße und Augenbewegungen, eine Abschätzung des realen Gefährdungspotentials für die Netzhaut des Auges durch Blaulicht auf Bühnen.

Nähere Details zu dem Forschungsprojekt (z. B. Gefahren durch UV-Strahlung bei Bühnenbeleuchtung) können dem AUVA-Report Nr. 53 [4] entnommen werden.

2. Messung der Strahldichte

Weder in der EU-Richtlinie, noch in der VOPST werden Angaben über zu verwendende Messparameter gemacht. Hierbei wird auf den Stand der Technik verwiesen, der durch aktuelle technische Normen gegeben ist (zum Zeitpunkt der Durchführung des Projekts im Jahr 2012: z.B. IEC 62471:2006 [5], zum Zeitpunkt der NIR 2018: z. B. ICNIRP-Guidelines 2013 [6] bzw. IEC 62471-5:2015 [7]).

2.1 Spektrale Messung der Strahldichte mit abbildendem Verfahren

Um die blaulichteffektive Strahldichte möglichst genau zu messen, wurde ein abbildendes Verfahren gewählt werden, bei dem die zu messende Quelle mittels Sammellinse auf die Eingangsoptik abgebildet wird. Als Eingangsoptik diente eine Ulbrichtkugel (Typ IS-50) auf deren Eingangsöffnung eine Apertur definierten Durchmessers (bzw. Irisblende) angebracht war. Über eine Faser wird das Licht aus der Ulbrichtkugel aus- und ins Spektrometer eingekoppelt. Der verwendete Messaufbau zur Messung der blaulichteffektiven Strahldichte ist in Abb. 1 gezeigt. Die Sammellinse (mit einer Aperturblende des Durchmessers 7 mm)

entspricht der Linse des Auges, die Aperturblende der Irisblende und der Detektor sitzt an der Stelle der Netzhaut.

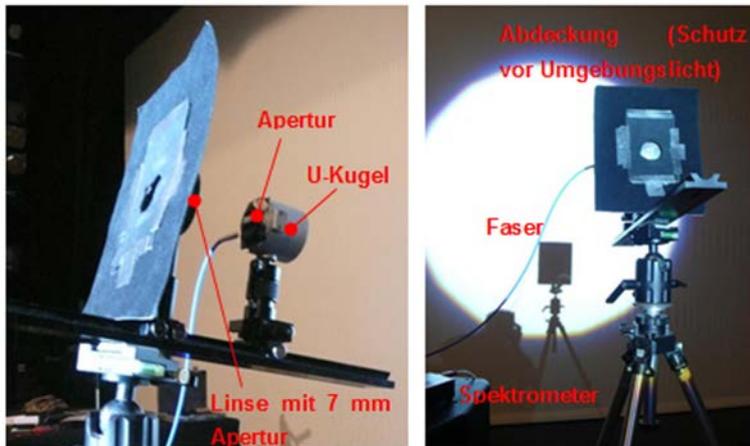


Abb. 1: Praktische Umsetzung der Strahldichtemessung mit abbildendem Verfahren. Links: seitliche Ansicht; Rechts: Ansicht von vorne. Die Apertur bzw. Linse wird vom Scheinwerfer angestrahlt.

Bei der Strahldichtemessung mit abbildendem Verfahren wird die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ am Ort des Detektors (Eingangsöffnung U-Kugel) gemessen. Der Detektor wird dabei so hinter der Linse platziert, dass auf der Eingangsoptik ein scharfes Bild der Quelle entsteht. Der Detektor sitzt somit in Bildweite hinter der Linse. Die Bildweite lässt sich bei Kenntnis der Gegenstandsweite (Abstand Scheinwerfer - Linse) und der Brennweite der Linse mit Hilfe der Linsengleichung berechnen. Vor der Eingangsöffnung der U-Kugel ist eine Apertur definierten Durchmessers angebracht. Das Verhältnis von Durchmesser der Apertur des Detektors zu Abstand zwischen Apertur und Hauptebene der Linse legt den Messempfangswinkel γ fest (Sichtfeld des Detektors - field of view (FOV)) über den bei der Messung gemittelt wird. Für die Messung der blaulichteffektiven Strahldichte sind je nach Expositionsdauer unterschiedliche Messempfangswinkel γ gemäß IEC 62471 bzw. EN 62471 zu verwenden. Für eine Expositionsdauer von 10000 s beträgt der zu verwendende Messempfangswinkel $\gamma = 110$ mrad, für eine Expositionsdauer von 100 s hingegen nur $\gamma = 11$ mrad.

Die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ wird mit dem Wirkungsspektrum für die Blaulichtgefahr $B(\lambda)$ gewichtet und über den für das Blaulicht relevanten Spektralbereich (300 nm - 700 nm) integriert. Das Ergebnis ist die blaulichteffektive Bestrahlungsstärke E_B . Zwischen effektiver Bestrahlungsstärke E_B und effektiver Strahldichte L_B kann bei kleinen Öffnungswinkeln über den Raumwinkel Ω gemäß unten stehender Gl. 1 umgerechnet werden.

$$L_B [W m^{-2} sr^{-1}] = \frac{E_B [W m^{-2}]}{\Omega [sr]} \quad (1)$$

Die so berechnete effektive Strahldichte L_B kann mit dem Strahldichtegrenzwert für die Blaulichtgefahr verglichen werden. Der Raumwinkel Ω (Einheit: Steradian, sr) ergibt sich gemäß Gl. 2 aus dem ebenen Winkel γ (Einheit: Radiant, rad), der durch das Verhältnis zwischen Durchmesser der Aperturblende vor der Linse (7 mm) und dem Abstand dieser Apertur zur Apertur des Detektors gegeben ist.

$$\Omega [sr] = \frac{\phi^2[rad] \cdot \pi}{4} \quad (2)$$

2.2 Integrale Messung der Strahldichte mit offenem FOV

Diese Messung entspricht der alternativen Methode zur Messung der Strahldichte wie in der Lampennorm [5] beschrieben. Die Messmethode ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Normalerweise wird bei der alternativen Methode eine Blende direkt vor der Quelle platziert, sodass der gemäß Lampennorm notwendige Messempfangswinkel γ realisiert werden kann. Bei Bühnenmessungen wird jedoch keine Feldblende unmittelbar vor der Quelle platziert, sondern man nimmt die Größe der Quelle (z. B. im Falle eines Verfolgerspots den Durchmesser des kreisrunden Austrittsfensters) als „Feldblende“ an.

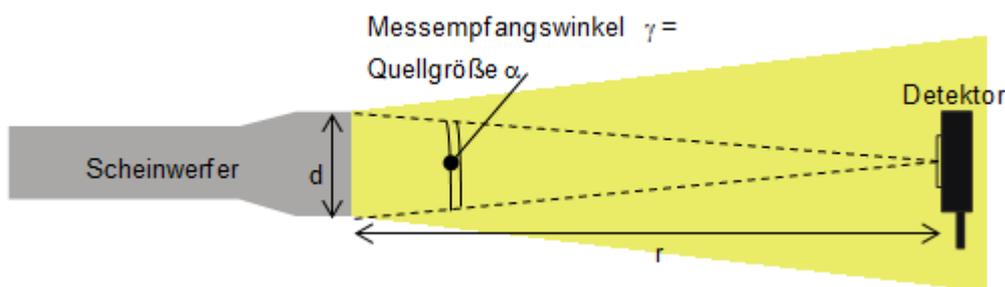


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messung der Strahldichte mit offenem field-of-view (Sichtfeld).

Bei dieser Methode wird die effektive Bestrahlungsstärke E_B mit dem integralen Detektor direkt auf der Bühne gemessen. Die Umrechnung in die photobiologisch effektive Strahldichte L_B erfolgt gemäß nachfolgendem Beispiel.

Beispiel: Auf der Bühne wird in einem Abstand $r = 25,2$ m zum Austrittsfenster der Strahlung am Verfolgerspot eine blaulichteffektive Bestrahlungsstärke $E_B = 1,2$ $W\ m^{-2}$ gemessen. Das kreisrunde Austrittsfenster hat einen Durchmesser $d = 20$ cm. Wie groß ist die effektive Strahldichte L_B ?

Schritt 1: Berechnung des ebenen Messempfangswinkels γ :

$$\gamma = \frac{d}{r} = \frac{0,2}{25,2} = 0,00794\ rad$$

Schritt 2: Berechnung des Raumwinkels Ω :

$$\Omega = \frac{\gamma^2 \cdot \pi}{4} = \frac{0,00794^2 \cdot \pi}{4} = 4,95 \cdot 10^{-5}\ sr$$

Schritt 3: Berechnung der Strahldichte L_B :

$$L_B = \frac{E_B}{\Omega} = \frac{1,2}{4,95 \cdot 10^{-5}} = 24242\ W\ m^{-2}\ sr^{-1}$$

Da Verfolgerspots meist homogene Quellen sind, handelt es sich bei der so berechneten Strahldichte L_B annähernd um die tatsächliche Strahldichte (physikalische Strahldichte) der Quelle.

Die integrale Messung mittels offenem FOV eignet sich vor allem für Quellen, für die der Blaulichtgrenzwert für kleine Quelle herangezogen werden kann. Im Fall einer kleinen Quelle

(Quellgröße $\alpha < 11$ mrad) ist der Grenzwert für die Blaulichtgefahr direkt als effektive Bestrahlungsstärke E_B gegeben. Dies erleichtert die Bewertung eines Bühnenarbeitsplatzes ungemein, da man auf kein abbildendes Verfahren zurückgreifen muss und die Bestrahlungsstärke ohne Berücksichtigung eines Messempfangswinkels γ gemessen werden kann. Der Verfolgerspot im Beispiel kann im Abstand von 25,2 m als kleine Quelle aufgefasst werden, da $\alpha = 7,94$ mrad (< 11 mrad). Bei einer mit offenem FOV gemessenen effektiven Bestrahlungsstärke von $E_B = 1,2 \text{ W m}^{-2}$ beträgt die maximale Expositionsdauer:

$$t_{max, kleine\ Quelle} = \frac{H_B}{E_B} = \frac{100}{1,2} = 83 \text{ s}$$

3. Messergebnisse

Insgesamt wurden 19 Scheinwerfer auf 4 verschiedenen Bühnen in Wien in typischen Arbeitsabständen vermessen. Betreffend der in den Scheinwerfern eingesetzten Leuchtmittel wurden die 19 Scheinwerfer differenziert in:

- LED-Scheinwerfer (2 Stück)
- Halogen-Scheinwerfer (3 Stück)
- HMI-Scheinwerfer (Halogen-Metall dampflampe, 14 Stück)

Für die Messungen der blaulichteffektiven Strahldichte L_B mittels abbildendem Verfahren wurden Diodenarray-Spektrometer verwendet:

- Spektrometer USB4000 (Ocean Optics, SN USB4F03405), Wellenlängenbereich 250 nm - 850 nm, Eingangsoptik: Ulbricht-Kugel IS-50 DP-SMA, SN 1012, Faser: QP600-1-SR
- Spektrometer HR2000+ (Ocean Optics, SN HR+C1192), Wellenlängenbereich 300 nm - 1000 nm, Eingangsoptik: Ulbricht-Kugel IS-50 DP-SMA, SN 1012

Zur Messung der integralen Größe E_B wurde bei den Messungen das

- Optometer X1₃ (Gigahertz Optik) mit Messkopf XD-45-HB sowie Tubus für Strahldichtemessung XD-45-HB-SRT200

eingesetzt. Alle Scheinwerfer wurden so vermessen, dass die jeweilige Eingangsoptik des Messgeräts orthogonal und mittig auf den jeweiligen Scheinwerfer ausgerichtet war.

3.1 Halogen-Scheinwerfer

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 3 Halogen-Scheinwerfer vermessen. Tab. 1 vergleicht die Messwerte der 3 Halogen-Scheinwerfer betreffend Blaulicht - L_B (betroffenes Gewebe: Netzhaut) mit dem Grenzwert gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC [2] und gibt die berechneten maximal erlaubten Expositionsdauern t_{max} an.

Keiner der vermessenen Halogen-SW überschreitet in der Messdistanz und bei den verwendeten Scheinwerfer-einstellungen den Blaulicht-Grenzwert für Dauerbestrahlung. Eine Grenzwertüberschreitung erscheint bei Halogen-Scheinwerfern nur in relativ naher Entfernung zu den Scheinwerfern möglich. Bei Entfernungen, wie sie jedoch im Rahmen der durchgeführten Messungen vorgefunden wurden, erscheint eine Grenzwertüberschreitung in der Praxis relativ unwahrscheinlich. Von Halogen-Scheinwerfern geht daher, bei normaler

Verwendung der Scheinwerfer (Abstand, Betriebseinstellungen), keine Blaulicht-Gefahr für die Augen von Akteuren auf der Bühne aus.

Tab. 1: Vergleich der Messwerte (spektrale, abbildende Messung) betreffend Blaulicht (L_B) an den 3 Halogen-SW mit dem entsprechenden Grenzwert gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC und Angabe der maximalen Expositionsdauer t_{max} .

Scheinwerfer	Verfolger Selecon Pacific 1200 W/ 80 V	Stufenlinsen-SW ARRI 5 kW	Pani Spot 1000 W
Messdistanz [m]	25,2	15,0	14,9
Öffnungswinkel θ [°]	5,5 (Minimum)	Minimum	-
Quellgröße α [mrad]	7,9	20,0	20,1
$L_{B,110 \text{ mrad}}$ [$\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$]	36	57	78
Grenzwert für Dauerexposition	100		
t_{max} [h:min]	>2:46	>2:46	>2:46

3.2 LED-Scheinwerfer

Im Rahmen des Projekts wurden 2 LED-Scheinwerfer vermessen. Bei beiden vermessenen Scheinwerfern handelte es sich um LED-Arrays, d.h. mehrere Licht emittierende Dioden waren in einem Scheinwerfer integriert. Ein LED-Scheinwerfer, der Chauvet COLORado 2 200 W, bestand aus LEDs blauer, weißer, grüner und roter Lichtfarbe. Das abgegebene Spektrum dieses Scheinwerfers und der Scheinwerfer sind in Abb. 3 dargestellt. Die Lichtfarbe dieses LED-Scheinwerfers ist regelbar, die LEDs unterschiedlicher Lichtfarbe können einzeln angesteuert werden. Für die Messung wurde der Scheinwerfer so betrieben, dass alle LEDs unterschiedlicher Lichtfarbe gleichzeitig emittierten. Auf der Wächter-Probephöhne der Staatsoper wurde ein Weißlicht-LED-Scheinwerfer Model MiniNova2.2-1K-dimm (230 V 800 W) vermessen, der rechteckig ausgeführt war (Länge x Breite = 29 cm x 18,5 cm) und in dem ausschließlich LEDs kaltweißer Lichtfarbe (6500 K) verwendet wurden. Bei der Messung emittierten alle LEDs mit maximaler Leistung.

Tab. 2 vergleicht die Messwerte der 2 LED-Scheinwerfer betreffend Blaulicht - L_B mit den Grenzwerten gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC und gibt die berechneten maximal erlaubten Expositionsdauern t_{max} an.

Der Blaulicht-Grenzwert wird beim LED-SW Chauvet COLORado 2 200 W in 5 m Abstand nach einer kumulierten Bestrahlungsdauer von 200 s erreicht. Dasselbe Netzhautareal darf innerhalb von 8 h nicht länger als insgesamt 200 s aus 5 m Abstand vom LED-Scheinwerfer bestrahlt werden, da es ansonsten zu einer Grenzwertüberschreitung kommt. In 15 m Messdistanz wird beim Weißlicht-LED-Array MiniNova 2.2 800 W bei den verwendeten Scheinwerfer-Einstellungen der Blaulicht-Grenzwert für Dauerexposition nicht überschritten. Es ist allerdings damit zu rechnen, dass es bei kürzeren Abständen (< 10 m) auch bei diesem Scheinwerfer zu einer Überschreitung des Blaulicht-Grenzwertes für Dauerexposition kommen kann.

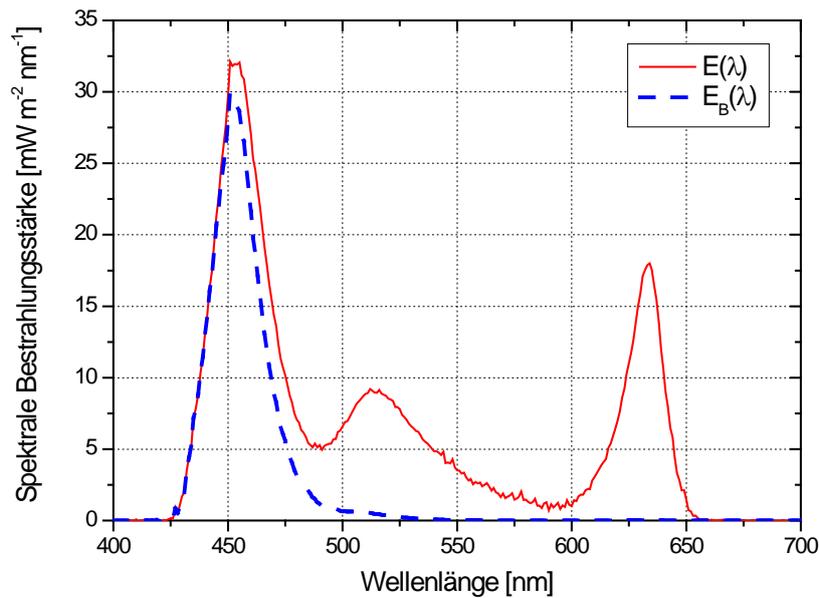


Abb. 3: Gemessenes Spektrum des Rechts gezeigten LED-Scheinwerfers Chauvet COLORado 2 200 W im Abstand von 5 m (roter Graph) mittels abbildendem Verfahren. Gewichtet man das Spektrum mit dem Wirkungsspektrum $B(\lambda)$, so erhält man die blaulichteffektive Bestrahlungsstärke (blau strichlierter Graph). Zur blaulichteffektiven Bestrahlungsstärke E_B tragen hauptsächlich die blauen und weißen LEDs bei, während der Beitrag der grünen sowie roten LEDs vernachlässigbar ist.

Tab. 2 vergleicht die Messwerte der 2 LED-Scheinwerfer betreffend Blaulicht - L_B mit den Grenzwerten gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC und gibt die berechneten maximal erlaubten Expositionsdauern t_{max} an.

Tab. 2: Vergleich der Messwerte (spektrale, abbildende Messung) betreffend Blaulicht (L_B) an den 2 LED-SW mit dem entsprechenden Grenzwert gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC und Angabe der maximalen Expositionsdauer t_{max} .

Scheinwerfer	Chauvet COLORado 2 200 W (110 - 120 V)	Weißlicht LED-Array MiniNova2.2-1K-dimm, 230 V, 800 W, 6500 K
Messdistanz [m]	5,0	15,0
Quellgröße α [mrad]	37	19,3
$L_{B,110 \text{ mrad}}$ [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$]	234	78
Grenzwert für Dauerexposition	100	
$L_{B,11 \text{ mrad}}$ [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$]	4877	-
Grenzwert für $t = 100 \text{ s}$	10000	-
t_{max}	3 min 20 s	>2h:46min

Betreffend Blaulicht müssen auf jeden Fall LED-SW untersucht und bewertet werden, die LEDs blauer und kalt- bzw. neutralweißer Lichtfarbe beinhalten. Bei LEDs dieser Lichtfarbe ist die Überschreitung des Blaulicht-Grenzwertes sehr wahrscheinlich. Für die Exposition in

der Praxis sind die in Abschnitt 4 beschriebenen Punkte zu berücksichtigen, die darüber entscheiden, ob es in der Praxis zu einer tatsächlichen Grenzwertüberschreitung kommt (z. B. Blickverhalten, Position des Scheinwerfers). LED-Scheinwerfer, die LEDs anderer Lichtfarbe beinhalten, wie z. B. grüne, rote oder warmweiße LEDs müssen bezüglich Blaulicht in der Praxis nicht bewertet werden, da eine Grenzwertüberschreitung durch LEDs dieser warmen Lichtfarben unwahrscheinlich ist.

3.3 HMI-Scheinwerfer

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 14 HMI-Scheinwerfer vermessen. Die relativ hohe Anzahl an untersuchten HMI-SW im Vergleich zu Halogen- und LED-SW liegt darin begründet, dass bereits bei den ersten Messungen an HMI-SW erkannt wurde, dass von diesen Scheinwerfern die höchste potentielle Gefahr bezüglich Blaulicht ausgeht. Folglich wurde das Hauptaugenmerk bei allen weiteren Messungen auf Scheinwerfer mit Halogen-Metall dampflampen als Leuchtmittel gelegt.

Die untersuchten HMI-Scheinwerfer waren als unterschiedliche Scheinwerfertypen ausgeführt: Verfolger-SW, Stufenlinsen-SW, Vari- bzw. Washlight-SW, etc. Abb. 4 zeigt jeweils einen der vermessenen HMI-Verfolgerspots, HMI-Stufenlinsenscheinwerfer bzw. HMI-Washlight. Zwei typische Spektren (spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$) von HMI-Scheinwerfern sind in Abb. 5 dargestellt. Anhand der Spektren ist zu erkennen, dass HMI-Scheinwerfer einen beträchtlichen UV- sowie Blaulichtanteil aufweisen. Abb. 5 rechts verdeutlicht auch den Einfluss des Öffnungswinkels θ des HMI-Scheinwerfers auf die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ bzw. blaulichteffektive Bestrahlungsstärke $E_B(\lambda)$.

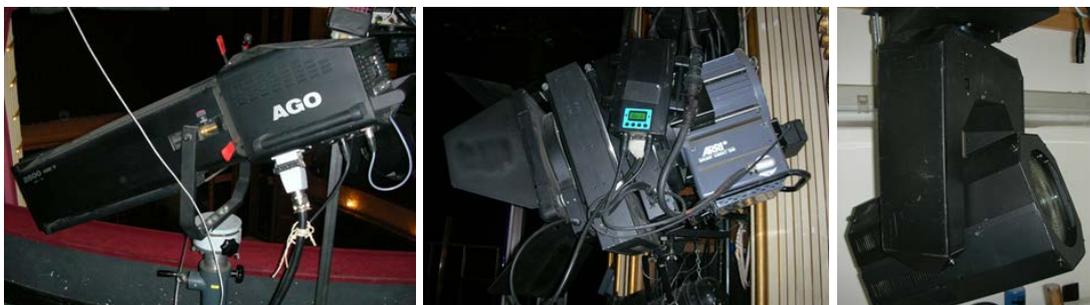


Abb. 4: Links: Verfolgerspot AGO 2500 HMI 4°, Mitte: Stufenlinsenscheinwerfer ARRI daylight compact 2500 7° Spot, Rechts: Ampton HMI Washlight 575 W.

Tab. 3 vergleicht die Messwerte der HMI-Scheinwerfer betreffend Blaulicht - L_B mit den Grenzwerten gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC und gibt die berechneten maximal erlaubten Expositionsdauern t_{max} an.

Der Blaulicht-Grenzwert gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EG [2] kann bei direktem Blick in einen HMI-Scheinwerfer bereits nach wenigen Sekunden überschritten werden. Wird z. B. ein und dasselbe Netzhautareal innerhalb von 8 h für 7 s vom HMI-Scheinwerfer Wash 1500 W Vari bestrahlt, so ist der Blaulicht-Grenzwert bereits erreicht. Gleichzeitig gibt es auch HMI-Scheinwerfer, die sicher bezüglich Blaulichtgefahr selbst bei Dauerbestrahlung sind. Für die Praxis bedeutet dies, dass HMI-Scheinwerfer unbedingt bezüglich Blaulicht bewertet werden müssen, da eine Grenzwertüberschreitung nicht ausgeschlossen werden kann.

Tab. 3: Vergleich der Messwerte (spektrale, abbildende Messung) betreffend Blaulicht (L_B) an den HMI-SW mit dem entsprechenden Grenzwert (GW) gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EC und Angabe der maximalen Expositionsdauer t_{max} .

Scheinwerfer	Messdistanz	Öffnungswinkel θ	Quellgröße α	$L_{B,110}$ mrad	GW Dauerexposition	$L_{B,11}$ mrad	GW $t = 100$ s	t_{max}
	[m]	[°]	[mrad]	[W m ⁻² sr ⁻¹]				
Wash 1500W Vari	14,9	13	16,8	1627	100	144983	10000	0:00:07
Verfolger AGO 2500 HMI 4° (2,5kW)	19	4	12,1	1574		68207		0:00:14
ARRI daylight compact 4kW	14,9	-	20,1	942		50666		0:00:19
Verfolger PANI HMI 1200 (1200W)	25,2	Minimum	7,9	315		37225		0:00:27
Profil-SW Source Four Zoom 15°-30° 575W	14,9	15	12,1	-		34164		0:00:29
Verfolger ARRI 2,5kW	37,0	Minimum	5,4	191		19099		0:00:52
Stufenlinsen-SW ARRI daylight compact 2500 7° Spot	7,6	7	39,5	1647		18314		0:00:54
Vari Lite VL1000 HMI 575W	5,8	Minimum	22,4	417		10512		0:01:35
Stufenlinsen-SW ARRI daylight 2,5kW	6,0	-	26,7	365		6188		0:02:41
Ampton HMI Washlight 575W	11,5	Minimum	15,7	122		3999		0:04:10
Stufenlinsen-SW ARRI HMI 4000	13,4	Minimum	24,6	170		2656		0:06:16
Panasonic PT-D 12000U	23,0	-	1,1	84,3		-		>2:46:40
Verfolger Juliat 2500 HMI (2,5 kW)	15,5	Minimum	4,5	58		-		>2:46:40
Innofour 575W HMI (ohne Filter)	12,0	Minimum	14,2	47,8		-		>2:46:40

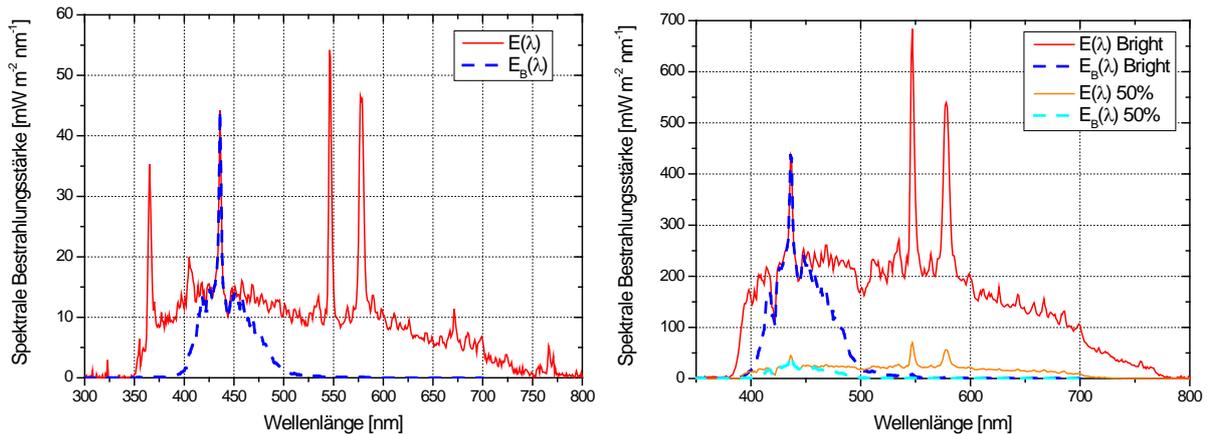


Abb. 5: Links: Spektrum des Tageslicht-HMI-Verfolgers PANI HMI 1200 im Messabstand von 25,2 m (roter Graph) sowie blaulichteffektive Bestrahlungsstärke (blau strichlierter Graph), Rechts: Spektren des Wash HMI 1500 W Vari im Messabstand von 14,9 m (roter Graph: offener FOV - „Bright Mode“, oranger Graph: offener FOV - „50 %“). Gewichtet man die Spektren mit dem Wirkungsspektrum $B(\lambda)$, so erhält man die blaulichteffektive Bestrahlungsstärken („Bright Mode“: blau strichlierter Graph, „50 %“: cyan strichlierter Graph). Bei Vergrößerung des Öffnungswinkels θ von 13° (Bright Mode) auf 43° (50 %) nimmt die Blaulichtgefahr deutlich ab.

Ob es in der Praxis tatsächlich zu einer Grenzwertüberschreitung bezüglich des Blaulicht-Grenzwerts kommt, hängt von mehreren Parametern ab und wird näher in Abschnitt 4 erläutert. Scheinwerferposition, Öffnungswinkel θ des Scheinwerfers, Blickverhalten aber auch die Berücksichtigung der tatsächlichen Pupillengröße können dazu führen, dass der Blaulicht-Grenzwert auf der Bühne nicht überschritten wird. Kann eine Grenzwertüberschreitung nicht ausgeschlossen werden, so müssen Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Das Blaulicht kann jedoch nicht durch Filter entfernt werden, da kaltes Licht auf der Bühne für viele Szenen benötigt wird und HMI-Scheinwerfer daher auch nicht flächendeckend durch Halogen-Scheinwerfer, die ein deutlich wärmeres Licht emittieren und daher deutlich ungefährlicher sind, ersetzt werden können. Organisatorischen Schutzmaßnahmen wie Unterweisung von Lichttechnikern/Beleuchtern sowie Schauspielern bezüglich des Blickverhaltens kommt daher eine besondere Bedeutung zu.

4. Einflussgrößen auf die maximale Expositionsdauer

Für die Messungen wurde die jeweilige Eingangsoptik direkt (orthogonal) und mittig auf den zu vermessenden Scheinwerfer ausgerichtet. Zusätzlich wurden alle Scheinwerfer mit voller Leistung (ungedimmt) bei kleinstmöglichem Öffnungswinkel betrieben, um eine möglichst spotähnliche Beleuchtung mit hoher Bestrahlungsstärke auf der Bühne bzw. eine hohe Strahldichte zu erzeugen. Diese Punkte, sowie die Annahme eines größeren Pupillendurchmessers (7 mm - bei direktem Blick in einen SW ist die Pupille jedoch deutlich kleiner) führen dazu, dass die in Abschnitt 3 angegebenen maximalen Expositionsdauern t_{\max} als „worst-case“-Expositionsdauern angesehen werden können. Die maximalen Expositionsdauern werden in der Praxis daher höher sein. Einfluss darauf, wie lange in der Praxis die maximale Expositionsdauer ist bzw. ob es in der Praxis zu einer Grenzwertüberschreitung betreffend des Blaulichtgrenzwertes kommt, haben nachfolgende Parameter:

- Abstand
- Öffnungswinkel θ
- Linsengröße
- Spot-/Flächenbeleuchtung
- Dimmung
- Position des Scheinwerfers
- Pupillengröße
- Blickverhalten

Auf die wichtigsten Punkte wird in den nachfolgenden Abschnitten im Detail eingegangen. Für Hintergrundinformationen zu allen Punkten wird auf den AUVA-Report Nr. 53 [4] verwiesen.

4.1 Abstand

Je größer der Abstand zu einem Scheinwerfer, desto kleiner ist die Bestrahlungsstärke und desto kleiner ist normalerweise die photobiologisch effektive Strahldichte. Da bei den meisten Bühnenscheinwerfern ihre Austrittsöffnung im Vergleich zum Bestrahlungsabstand sehr klein ist, kann das quadratische Abstandsgesetz angewendet werden: Verdoppelt man den Abstand zur Quelle, so sinkt die Bestrahlungsstärke um den Faktor 4. Das quadratische Abstandsgesetz kann allgemein angewandt werden, wenn der Abstand zum Scheinwerfer zumindest fünfmal der größten Abmessung der Lichtaustrittsöffnung des Scheinwerfers entspricht (z. B. Abstand zu Scheinwerfer \geq fünfmal dem Durchmesser bei kreisrunder Austrittsöffnung). Der Fehler für die Abschätzung der Bestrahlungsstärke mittels quadratischen Abstandsgesetzes bei Verwendung dieser Regel ist kleiner 1 %.

Bei ausgedehnten Quellen (z. B. LED-Scheinwerfer mit Diffuser für Flächenbeleuchtung) kann das lineare Abstandsgesetz angewandt werden kann: Verdoppelt man den Abstand zur Quelle, so halbiert sich die Bestrahlungsstärke.

Setzt man einen homogenen Scheinwerfer voraus, so bleibt die Strahldichte solange konstant, solange sich innerhalb des Mittelungssichtfeldes (FOV) γ nur Teile bzw. exakt die Austrittsöffnung des Scheinwerfers befindet (Mittelungssichtfeld $\gamma \leq$ Quellgröße α). Vergrößert man den Abstand zum Scheinwerfer, so kann das Mittelungssichtfeld γ auch Bereiche größer als die Austrittsöffnung des Scheinwerfers erfassen. Die photobiologisch effektive Strahldichte nimmt für den Fall, dass das Mittelungssichtfeld (FOV) γ größer als die Quellgröße α ist (tritt ab einem gewissen Abstand bei konstantem γ auf), dann deutlich ab. Kennt man von einem Scheinwerfer die Bestrahlungsstärke E_1 in einem Abstand x_1 , so lassen sich die Bestrahlungsstärken (auch die blaulichteffektive Bestrahlungsstärke E_B) für andere Abstände rechnerisch ermitteln.

4.2 Öffnungswinkel θ

Je kleiner der Öffnungswinkel eines Scheinwerfers, desto höher die blaulichteffektive Strahldichte L_B . Im Rahmen des Projekts wurden 3 HMI-Scheinwerfer mit unterschiedlich großen Öffnungswinkeln vermessen. Wie sich eine Vergrößerung des Öffnungswinkels auf die blaulichteffektive Strahldichte L_B bei HMI-Scheinwerfern auswirkt, ist in Tab. 4 dargestellt.

Bei Verdoppelung des Öffnungswinkels θ von 15° auf 30° ist der Profil-HMI-Scheinwerfer Source Four Zoom $15^\circ - 30^\circ$ (575 W) im Messabstand sicher bezüglich Blaulicht, da die blaulichteffektive Strahldichte L_B den Grenzwert von $100 \text{ W m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ unterschreitet. Beträgt die maximale Expositionsdauer beim Öffnungswinkel von $\theta = 15^\circ$ lediglich 29 s, so ist sie beim Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ > 2 \text{ h } 46 \text{ min}$. Ähnliches gilt für den HMI-Scheinwerfer Vari Lite VL 1000 575 W. Durch Aufweitung des Öffnungswinkels (auf maximalen Öffnungswinkel) wird der Blaulichtgrenzwert für Dauerbestrahlung unterschritten. Die Verringerung der spektralen Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ bzw. blaulichteffektiven Bestrahlungsstärke $E_B(\lambda)$ bei Aufweitung des Öffnungswinkels θ ist in Abb. 5 rechts für den HMI-Scheinwerfer Wash 1500 W Vari dargestellt.

Tab. 4: Vergleich der Messwerte (spektrale, abbildende Messung) betreffend Blaulicht (L_B) an 3 HMI-SW mit den entsprechenden Grenzwerten (GW) gemäß EU-Richtlinie 2006/25/EG und Angabe der maximalen Expositionsdauer t_{max} bei Variation des Öffnungswinkels.

Scheinwerfer	Messdistanz	Öffnungswinkel θ	Quellgröße α	$L_{B,110 \text{ mrad}}$	GW Dauerexposition	$L_{B,11 \text{ mrad}}$	GW $t = 100 \text{ s}$	t_{max}
	[m]							
Wash 1500W Vari	14,9	13	16,8	1627	100	144983	10000	0:00:07
		43	16,8	163		15209		0:01:05
Profil-SW Source Four Zoom $15^\circ - 30^\circ$ 575W	14,9	15	12,1	-	100	34165	10000	0:00:29
		22,5	12,1	172		14448		0:01:09
		30	12,1	72		-		>2:46:40
Vari Lite VL1000 HMI 575W	5,8	Minimum	22,4	417	100	10512	10000	0:01:35
		Maximum	22,4	77		3332		>2:46:40

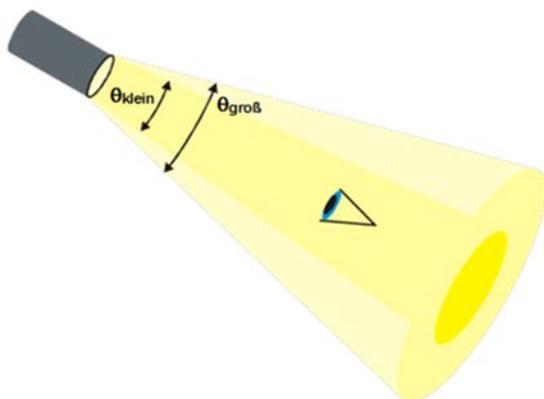


Abb. 6: Durch Aufweitung des Öffnungswinkels θ lässt sich die Blaulicht-Gefahr deutlich verringern. Bei Kenntnis des kleinen Öffnungswinkels θ_{klein} sowie des aufgeweiteten Öffnungswinkels θ_{groess} lässt sich, unter der Voraussetzung, dass es sich um einen homogenen Scheinwerfer handelt, ein Verringerungsfaktor V_θ bezüglich der Blaulichtgefahr angeben. Der Verringerungsfaktor V_θ gibt an, um welchen Faktor die blaulichteffektive Strahldichte L_B bei Aufweitung eines Scheinwerfers sinkt.

Für die Blaulichtgefahr lässt sich ein sogenannter Verringerungsfaktor V_θ angeben, der beschreibt, um welchen Faktor die blaulichteffektive Strahldichte L_B (photobiologisch effektive Strahldichte) in Abhängigkeit von der Aufweitung des Öffnungswinkels θ sinkt. Wird der Öffnungswinkel θ gemäß Abb. 6 aufgeweitet, so ergibt sich für den Verringerungsfaktor V_θ bezüglich der Blaulichtgefahr:

$$\text{Verringerungsfaktor } V_{\theta} = \frac{(\tan \frac{\theta_{\text{gro\ss}}}{2})^2}{(\tan \frac{\theta_{\text{klein}}}{2})^2} \quad (3)$$

Voraussetzung für die Gültigkeit der Formel betreffend den Verringerungsfaktor V_{θ} ist, dass der Scheinwerfer homogen ist.

Bei Aufweitung des Öffnungswinkels (Lichtkegels) eines Scheinwerfers von θ_{klein} auf $\theta_{\text{gro\ss}}$ erhält man die in Tab. 5 angegebenen Verringerungsfaktoren V_{θ} . Die berechneten Werte für V_{θ} wurden mit den Messergebnissen an den beiden Scheinwerfern Wash 1500 W Vari sowie Profil-HMI-Scheinwerfer Source Four Zoom 15° - 30° (575 W) überprüft und zeigen eine gute Übereinstimmung.

Tab. 5: Berechnete Verringerungsfaktoren V_{θ} für die Aufweitung des Lichtkegels von θ_{klein} auf $\theta_{\text{gro\ss}}$ und Vergleich mit dem Verhältnis von tatsächlich gemessenen blaulichteffektiven Strahldichten L_B bei unterschiedlichen Öffnungswinkeln.

θ_{klein}	15	15	13
$\theta_{\text{gro\ss}}$	30	22,5	43
$V_{\text{berechnet}}$	4,1	2,3	11,9
$V_{\text{gemessen}}^1)$ Profil SW Source Four 575W	5,0	2,4	-
$V_{\text{gemessen}}^1)$ Wash 1500W Vari	-	-	10,1

¹⁾Verhältnis der blaulichteffektiven Strahldichte gemessen bei Öffnungswinkel θ_{klein} zur blaulichteffektiven Strahldichte gemessen bei Öffnungswinkel $\theta_{\text{gro\ss}}$ (bei beiden Messungen Mittelung über denselben FOV γ).

Durch Aufweitung des Lichtkegels lässt sich eine deutliche Reduktion der Blaulichtgefahr erreichen. Unter Anwendung der Formel für den Verringerungsfaktor V_{θ} ist die Messung der Blaulichtgefahr bei einem Öffnungswinkel ausreichend, und man kann anhand der Formel die Blaulichtgefahr für andere Öffnungswinkel abschätzen (Voraussetzung: homogener Scheinwerfer).

4.3 Spot-/Flächenbeleuchtung

Bezüglich Blaulichtgefahr stellt Spotbeleuchtung ein deutlich höheres Risiko dar, im Vergleich zu großer, flächenhafter Beleuchtung bzw. Fluter. Je kleiner der Spot, desto kleiner der Öffnungswinkel θ , desto kürzer die maximale Expositionsdauer t_{max} bis der Blaulicht-Grenzwert erreicht ist. Fluter weisen hingegen eine deutlich höhere maximale Expositionsdauer t_{max} bezüglich der Blaulichtgefahr auf bzw. sind in den Abständen, wie sie auf Bühnen gebräuchlich ist, sicher, selbst für lang andauernde Expositionen.

Große, flächenhafte Beleuchtung (z. B. LED-Scheinwerfer mit Diffuser für Flächenbeleuchtung) wurde im Rahmen des AUVA-Projekts BÜHNE nicht vermessen. Bisherige Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass die Quelle zu einem intensiven Blendungseindruck führen muss, damit sie eine Gefährdung bezüglich Blaulicht darstellt. Dies ist bei LED-Beleuchtung mit Diffuser nicht der Fall. Daraus lässt sich ableiten, dass diese Art der Beleuchtung zu keiner Grenzwertüberschreitung bezüglich des Blaulichtgrenzwertes auf der Bühne führt und daher nicht näher untersucht werden muss.

4.4 Position des Scheinwerfers

Ein Bühnenscheinwerfer muss im Blickfeld bzw. in Blickrichtung liegen, damit es überhaupt zu einer Grenzwertüberschreitung betreffend Blaulichtgefahr kommen kann. Bei Beleuchtung von vorne besteht daher ein höheres Risiko zur Grenzwertüberschreitung im Vergleich zur Beleuchtung von oben, seitlich oder hinten.

Je nach Position des Scheinwerfers lässt sich dadurch schon unterscheiden, welche Beleuchtung tiefergehend zu evaluieren ist. Bühnenbeleuchtung direkt über der Bühne kann im Normalfall zu keiner Grenzwertüberschreitung hinsichtlich Blaulicht führen. Bühnenbeleuchtung die seitlich bzw. hinten an der Bühne angebracht ist, kann nur dann zu einer Grenzwertüberschreitung führen, wenn die Akteure auf die Bühne diese Beleuchtung über längere Zeit bzw. oftmalig im Blickfeld haben. Im Normalfall richtet sich die Blickrichtung der Akteure in einem Spieltheater Richtung Publikum, in einem Singtheater Richtung Dirigent bzw. Publikum. Für Beleuchtung von der Seite und von hinten besteht daher im Normalfall ein deutlich reduziertes Risiko einer Grenzwertüberschreitung im Vergleich zur Beleuchtung von vorne.

Bei der Gefährdungsbeurteilung ist daher darauf zu achten, welche Bühnenbeleuchtung in der Blickrichtung der Akteure liegt. Beleuchtung, die normalerweise nicht in Blickrichtung liegt (z. B. Beleuchtung von oben) muss nicht im Detail untersucht werden.

Bei der Gefährdungsbeurteilung von Scheinwerfern gilt es auch die Lage verschiedener Scheinwerfer zueinander zu berücksichtigen. Für die Bewertung betreffend Blaulichtgefahr (L_B) ist zumindest über den Messempfangswinkel $\gamma = 110$ mrad zu mitteln, bei vielen Quellen, bei denen der Grenzwert für Dauerbestrahlung überschritten wird, ist auch eine Mittelung über 11 mrad notwendig. Innerhalb des Mittelungssichtfeldes von 11 mrad liegt meist nur ein Teil eines Scheinwerfers aber nie mehr als ein vollständiger Scheinwerfer. Innerhalb der 110 mrad können, je nach Abstand, mehrere Scheinwerfer liegen. Diese sind dann auch in Kombination bezüglich der Blaulichtgefahr zu messen und zu bewerten falls sie während einer Vorstellung/Probe gleichzeitig eingesetzt werden.

4.5 Pupillengröße

Die Pupillengröße bestimmt, welche Strahlungsleistung auf der Netzhaut des Auges auftrifft. Für die Ableitung des Blaulichtgrenzwertes wurde gemäß IEC 62471 [5] ein Pupillendurchmesser von 3 mm verwendet. Je nach vorliegender Hintergrundleuchtdichte kann der Pupillendurchmesser allerdings stark von 3 mm abweichen (z. B. 7 mm bei sehr kleinen Helligkeiten $< 0,01$ cd/m²). Gemäß IEC 62471 beträgt der Pupillendurchmesser ab Hintergrundleuchtdichten von 10.000 cd/m² nur mehr 2 mm. Auch im technischen Report TR IEC 60825-9 [9] finden sich Daten, die bestätigen, dass bei Hintergrundleuchtdichten ab 10.000 cd/m² der Pupillendurchmesser $d \leq 2$ mm ist (siehe Abb. 7).

Im Bühnenbereich hat man zwar selten großflächige Hintergrundleuchtdichten von 10.000 cd/m², dafür ist man aber Scheinwerfern exponiert, die eher die Charakteristik von Punktquellen aufweisen und eine Leuchtdichte $> 1 \cdot 10^6$ cd/m² besitzen. Blickt man in eine derart helle Quelle, erscheint die Annahme einer 2 mm großen Pupille durchaus berechtigt. Im Fall eines Pupillen-Durchmessers von 2 mm gelangt weniger Strahlungsleistung auf die Netzhaut im Vergleich zu einem Pupillendurchmesser von 3 mm. Der Blaulichtmesswert L_B darf daher um den Faktor

$$\frac{3^2}{2^2} = 2,25$$

verringert werden [8]. Folglich steigt die maximale Expositionsdauer t_{\max} an.

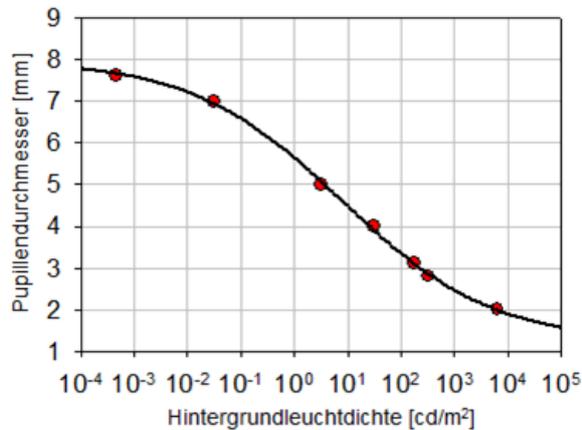


Abb. 7: Pupillendurchmesser in Abhängigkeit von der Hintergrundleuchtdichte nach [9] (bzw. gemäß Reeves, 1920).

Berücksichtigt man die verringerte Pupillengröße und wendet diese auf die Blaulichtmesswerte der HMI-Scheinwerfer aus Abschnitt 3.3 an, so erhöhen sich die maximalen Expositionsdauern t_{\max} gemäß Tab. 6.

Tab. 6: Einfluss der Pupillengröße auf die maximale Expositionsdauer t_{\max} bezüglich Blaulichtgefahr bei HMI-Scheinwerfer.

Scheinwerfer	t_{\max} betreffend Blaulicht je Pupillengröße	
	3 mm Pupille [h:min:s]	2 mm Pupille [h:min:s]
Wash 1500W Vari	0:00:07	0:00:15
Verfolger AGO 2500 HMI 4° 2,5kW	0:00:14	0:00:33
ARRI daylight compact 4kW	0:00:19	0:00:44
Verfolger PANI HMI 1200 (1200 W)	0:00:27	0:01:01
Profil-SW Source Four Zoom 15°-30° 575W	0:00:29	0:01:05
Verfolger ARRI 2,5kW HMI	0:00:52	0:02:02
Vari Lite VL1000 HMI 575W	0:01:35	0:03:35
Stufenlinsen-SW ARRI daylight 2,5kW	0:02:41	>2:46:40
Ampton HMI Washlight 575W	0:04:10	>2:46:40

4.6 Blickverhalten

Das Blickverhalten bzw. die Blickrichtung bestimmen maßgeblich, ob es in der Praxis zu einer Grenzwertüberschreitung kommt. Alle Messungen im Rahmen dieses Projekts wurden so durchgeführt, dass die Ausrichtung der Messegeräte einem direkten Blick in den jeweiligen Scheinwerfer entspricht. In der Praxis ist ein Blick in einen Scheinwerfer stark blendend, ja

sogar schmerzhaft. Es ist daher unwahrscheinlich, dass man Scheinwerfer länger direkt anstarrt. Zu stark ist die jeweilige Blendwirkung des Scheinwerfers, sodass die Akteure auf der Bühne dadurch behindert werden. Es wird jedoch vorkommen, dass die Akteure auf der Bühne einen Scheinwerfer peripher im Blickfeld haben. Auch dabei kommt es zu einer Abbildung der Quelle auf der Netzhaut und eine Grenzwertüberschreitung kann ebenso auftreten, sollte ein und dasselbe Netzhautareal über 8 h eine blaulichteffektive Dosis akkumulieren, die über dem Grenzwert liegt.

Für die Netzhaut führt vor allem die Berücksichtigung von größeren Augenbewegungen zu einer deutlichen Erhöhung der maximalen Expositionsdauern. Die Messempfangswinkel γ wie definiert in IEC 62471 [5] bezüglich der Blaulichtgefahr entsprechen im Sinne von Augenbewegungen worst-case - Werten. Der Winkel von 11 mrad ist ein sehr kleiner Winkel und es ist sehr schwierig, sich dazu zu zwingen, länger als ein paar Sekunden auf einen bestimmten Punkt zu starren ohne sonstige Augenbewegungen. Die Normwerte gehen aber davon aus, dass man bis zu 100 s auf ein und denselben Punkt starrt, und nur minimale Abweichungen davon hat. Wenn für eine gewisse Anwendung und Situation sichergestellt ist (was bei der Exposition auf der Bühne der Fall ist), dass nicht nur auf einen Punkt gestarrt wird, kann man dies wie im Folgenden dargelegt wird, in der Expositionswert-Bestimmung berücksichtigen.

In den ICNIRP-Richtlinien aus dem Jahr 1997 ist angeführt, dass für Expositionen $t > 1.000$ s über einen Winkel von $\gamma \geq 200$ mrad zu mitteln ist. Die in Abschnitt 3.3 spezifizierten maximalen Expositionsdauern für HMI-Scheinwerfer bezüglich Blaulichtgefahr sind sehr konservative Werte, wenn man bedenkt, dass der Winkel von 11 mrad z. B. 11 mm in 1 Meter Entfernung entspricht, also ca. die Winkelausdehnung des kleinen Fingernagels bei ausgestreckter Hand. Ein Winkel von 110 mrad entspricht 11 cm in 1 Meter Entfernung, also ungefähr eine Faust bei ausgestreckter Hand. Es ist relativ unwahrscheinlich, dass man eine Lichtquelle mit nennenswerten Helligkeiten (die zur Blendung führt, so dass man andere Objekte schlecht wahrnehmen kann) für längere Zeit im Blickfeld hat und der Bereich des Blickes (die Augenbewegungen) auf 110 mrad beschränkt bleiben, also sonst nirgends hinblickt als in den Raumwinkel, der ungefähr einer Faust bei ausgestreckten Hand entspricht. Bei Expositionsszenarien, wo die Lichtquelle selbst nicht das Zentrum der Aufmerksamkeit ist (sondern eher das Publikum bzw. der Dirigent), kann man in den meisten Fällen davon ausgehen, dass die gemäß IEC 62471 definierten Mittelungssichtfelder γ bezüglich der Blaulichtgefahr unrealistisch kleine Werte sind.

5. Erweitertes Verfahren

Da für photochemisch induzierte Netzhautgefährdung (Blaulichtgefahr) bekannt ist, wie sich Augenbewegungen auf den Expositionswert auswirken, ist es möglich, eine genauere Analyse für konkrete Bestrahlungssituationen durchzuführen, wie in diesem Abschnitt in Folge gezeigt wird. Es wird nicht der Grenzwert adaptiert, sondern es werden die konkret vorliegenden Augenbewegungen (immer noch in einer worst-case Abschätzung) im Rahmen der Ermittlung des Expositionswertes (der dann mit dem Grenzwert verglichen wird) berücksichtigt. Das hier vorgestellte Verfahren, das für die Gefährdungsanalyse größere Augenbewegungen zulässt, wird in den aktualisierten ICNIRP-Guidelines [6] für inkohärente Strahlung im sichtbaren Bereich sowie im österreichischen Leitfaden „künstliche optische Strahlung“ [8] explizit erlaubt.

Basis des ausgeweiteten Beurteilungsverfahrens ist der Grenzwert für photochemische Schädigung der Netzhaut.

$$L_B \cdot t = \sum L_{Bi} \cdot t_i \quad (4)$$

Also z. B. $L_B \cdot t = L_{B1} \cdot t_1 + L_{B2} \cdot t_2 + L_{B3} \cdot t_3$ (aufsummieren von 3 Episoden konstanter Strahldichte)

Die Strahldichtedosis H_B ($H_B = L_B \cdot \Delta t$) kann auch folgendermaßen als Integral angeschrieben werden:

$$H_B = \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^{t_i} L_{Bi} dt \quad (5)$$

Der Grenzwert für die photochemische Schädigung der Netzhaut (Blaulichtgefahr) ist als Strahldichtedosis gegeben. Die mit dem Grenzwert zu vergleichende Strahldichtedosis (als Expositionswert) wird erhalten aus dem zeitlichen Integral über die Strahldichte – siehe Gl.1.

Für zeitliche Abschnitte t_i , in denen die Strahldichte L_{Bi} jeweils konstant bleibt, kann das Integral ersetzt werden durch eine Summe:

Die effektive Strahldichte L_B wiederum ist eine über den Raumwinkel Ω gemittelte Größe. Im hier beschriebenen erweiterten Analyseverfahren werden nun für Ω nicht die Standardwerte laut IEC 62471 [5] verwendet (z. B. 11 mrad oder 110 mrad), sondern der Raumwinkel, der für die entsprechende Bestrahlungssituation den Blickbereich beschreibt. Dieser Raumwinkel, nennen wir ihn Ω_{Blick} , charakterisiert den Teil des Raumes, über den eine Person, wie z.B. ein Schauspieler auf der Bühne, seinen Blick wandern lässt, also der Bereich im Raum über den sich die Augen bewegen. Bei gegebener effektiver Bestrahlungsstärke E_B , die auf die Hornhaut des Auges auftrifft (z. B. durch das Licht eines Scheinwerfers), die mit einem offenen Empfangswinkel (einem Empfangswinkel, der größer als die Quelle ist) gemessen wurde, ergibt sich die gemittelte Strahldichte aus (unter der Annahme, dass die Quelle kleiner ist als der Blickbereich Ω_{Blick}):

$$L_B \cdot t = \sum \frac{E_{Bi}}{\Omega_{Blick i}} \cdot t_i = \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^{t_i} \frac{E_{Bi}}{\Omega_{Blick i}} dt$$

wobei die Bestrahlungsstärke und der Mittelungswinkel (Blickbereich) über den Zeitabschnitt t_i als konstant angesetzt sind. Die Exposition ist dann unter dem Grenzwert für die Blaulichtgefahr, wenn folgende Gleichung (für das Beispiel von n Zeitabschnitten) erfüllt ist:

$$\frac{E_{B1}}{\Omega_{Blick1}} \cdot t_1 + \frac{E_{B2}}{\Omega_{Blick2}} \cdot t_2 + \dots + \frac{E_{Bn}}{\Omega_{Blickn}} \cdot t_n < 10^6 \frac{J}{m^2 sr}$$

Die Bestrahlungsstärke E_B ist hierbei in den Einheiten $W m^{-2}$, der Raumwinkel Ω_{Blick} in der Einheit sr und die Zeit t in Sekunden einzusetzen. Die einzelnen Bestrahlungsdauern t_i können für sich wieder eine Summe von Einzelbestrahlungsdauern sein, d.h. t_i charakterisiert die Gesamtbestrahlungsdauer, für die die Bestrahlungsstärke E_{Bi} auftritt und in welcher der Blick über den Bereich $\Omega_{Blick i}$ wandert. In vielen Fällen ist die auf die Position des Auges auftreffende Blaulicht-Bestrahlungsstärke E_B konstant oder variiert nur relativ wenig, und man verwendet den maximalen Wert für eine vereinfachte Abschätzung, womit sich dann E_B aus obenstehender Gleichung herausziehen lässt:

$$E_B \cdot \left(\frac{t_1}{\Omega_{Blick1}} + \frac{t_2}{\Omega_{Blick2}} + \dots + \frac{t_n}{\Omega_{Blickn}} \right) < 10^6 \frac{J}{m^2 sr}$$

Es sei betont, dass man bei diesem Ansatz davon ausgeht, dass die Bewegungen der Augen über den durch Ω_{Blick} beschriebenen Bereich zeitlich gesehen ausgeglichen sind, d.h. die Mittelung impliziert, dass jeder kleine Teilbereich innerhalb von Ω_{Blick} in Summe gleich lange bestrahlt wird, sodass sich die Leistung, die ins Auge trifft, gleichmäßig über die entsprechende Fläche auf der Netzhaut verteilt. Gibt es einen Punkte von besonderem Interesse ("Hot-Spots"), auf die häufiger geblickt wird als auf die anderen Teilbereiche, ist dies bei der Analyse zu berücksichtigen, z.B. in dem man in der Gleichung für einen der Zeitabschnitte einen kleineren Blickbereich wählt (siehe dazu die Fallstudie in [4]). Man muss jedoch nur diese Raumbereiche berücksichtigen, die sich auch örtlich gesehen überlagern, d.h. dann auch auf der Netzhaut zu einer entsprechenden lokal höheren Bestrahlung führen.

Wenn sich die einzelnen Raumbereiche, die durch Ω_{Blick} charakterisiert werden, räumlich nicht überlagern, dann muss man sie auch nicht aufaddieren, weil sich die entsprechenden Bestrahlungen auf verschiedene Areale auf der Netzhaut beziehen. Man sollte also bei mehreren möglichen Hot-spots die Analyse für den Hot-spot machen, der die größte Summe von t_i/Ω_i ergibt. Das prinzipielle Schema kann wie folgt verstanden werden: bei gegebener Bestrahlungsstärke E_B auf der Hornhaut (und konstantem Pupillendurchmesser) hängt die Bestrahlungsstärke auf Netzhaut nur mehr davon ab, über welche Fläche auf der Netzhaut sich die ins Auge eintretende Leistung verteilt. Diese Fläche wird durch Ω_{Blick} charakterisiert. Das Verhältnis E_B/Ω_{Blick} ist also direkt proportional der Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut (wie dies prinzipiell für die Strahldichte gilt). Die für die Schädigung relevante Größe der lokalen Bestrahlung in der Einheit J/m² ist dann proportional der mit der jeweiligen Bestrahlungsdauer t multiplizierten Größen. In der obenstehenden Gleichung werden Episoden unterschiedlicher Bestrahlung aufsummiert. Wie aus oben stehender Gleichung ersichtlich, wird der größte Beitrag zur Gesamt-Strahldichtedosis von einer Bestrahlungs-Episode geliefert, bei der man für länger Zeit (großes t) direkt in einen Scheinwerfer starrt (der Blick ist auf den Scheinwerfer fixiert, wodurch sich für diese Bestrahlungs-Episode ein kleiner Wert für Ω_{Blick} ergibt). **Um die Strahldichtedosis für die Netzhaut möglichst klein zu halten, sollte daher ein Hot-Spot (z.B. Verfolgerscheinwerfer) nicht bzw. nur für kurze Zeit im Blickfeld sein.**

Neu an diesem Verfahren ist, dass für Ω nicht die vorgegebenen Standard-Werte gemäß IEC 62471 verwendet werden, sondern ein realistischer Wert, der den Blickbereich charakterisiert. Diese Methode ist daher auch keine Abweichung von den ICNIRP Guidelines 1997, da dort schon ein Mittelungswinkel von "mindestens 200 mrad" angeführt ist und sie ist auch keine Abweichung von der EU-Richtlinie 2006/25/EC, weil dort bezüglich Messbedingungen auf Normen bzw. auf den Stand der Technik verwiesen wird.

Diese Methode stellt eine erweiterte Expositionscharakterisierung dar, wobei statt worst-case Werte für die Augenbewegungen, wie sie für die Beschreibung der Emission von Produkten (IEC 62471) sinnvoll sind, Werte verwendet werden, die der wirklichen Bestrahlungssituation besser entsprechen. Das erweiterte Verfahren ist eine Methode

- die wissenschaftlich fundiert ist
- mit der eine zulässige Gefährdungsbeurteilung im Sinne der VOPST durchgeführt werden kann.

Im AUVA-Report Nr. 53 [4] ist ein detailliertes Fallbeispiel angegeben, in dem die erweiterte Analysenmethode für die Blaulichtgefahr auf Bühnenbeleuchtung angewandt wird.

6. Danksagung

Das Projektteam bedankt sich herzlich bei Herrn Alfred Rieger (ÖTHG), Herrn DI Johannes Bättig (Volksoper), Herrn Ing. Rudolf Fischer (Staatsoper) sowie Herrn Friedrich Rom (Burgtheater) für Ihre Mitwirkung im Projekt BÜHNE. Die Seibersdorf Labor GmbH bedankt sich bei der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt (AUVA) für die Finanzierung des Projekts BÜHNE.

7. Literaturverzeichnis

- [1] VOPST-Verordnung optische Strahlung, Bundesgesetzblatt II Nr. 221/2010, Wien, 8. Juli 2010
- [2] Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates – künstliche optische Strahlung, 5. April 2006
- [3] OStrV Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung, Bundesgesetzblatt I S 960 (Nr. 38), Bonn, 19. Juli 2010
- [4] Weber, M.; Schulmeister K.; Kitz, E.: AUVA Report Nr. 53, Optische Strahlung: UV- und Blaulichtgefährdung von Theater- und Bühnenbeleuchtung, Wien, September 2015, Internet:
<https://www.auva.at/portal27/auvaportal/content/contentWindow?viewmode=content&action=2&contentid=10007.758313>
- [5] IEC 62471:2006: Photobiological safety of lamps and lamp systems
- [6] ICNIRP: ICNIRP Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation, Health Physics 105(1), 74-96, 2013
- [7] IEC 62471-5:2015: Photobiological safety of lamps and lamp systems - Part 5: Image projectors
- [8] Österreichische Arbeitsschutzstrategie 2007-2012: Leitfaden “Künstliche optische Strahlung - Evaluierung von biologischen Gefahren durch Lampen und Laser“, 2. Ausgabe, Wien, 2013
- [9] TR IEC 60825-9:1999: Safety of laser products – part 9: Compilation of maximum permissible exposure to incoherent optical radiation



Fachverband für Strahlenschutz e. V.

Mitgliedsgesellschaft der
International Radiation
Protection Association
(IRPA)
für Deutschland
und die Schweiz

Publikationsreihe
FORTSCHRITTE
IM STRAHLENSCHUTZ

Publication Series
PROGRESS IN RADIATION

NIR 2018

NIR 2018: WELLEN – STRAHLUNG – FELDER

**50. Jahrestagung des
Fachverbandes für Strahlenschutz e. V.
für Deutschland und die Schweiz
gemeinsam mit der
BG ETEM Berufsgenossenschaft
Energie Textil Elektro
Medienerzeugnisse**

**3. bis 6. September 2018
Dresden**



Bandherausgeber:
Hans-Dieter Reidenbach
Martin Brose
Stephan Joosten