

BACHELORARBEIT

Untersuchung praxisnaher Bewertungsmöglichkeiten zur Gefahr photochemischer und thermischer Netzhautschädigungen im Bühnen- und Studiobereich

vorgelegt am 03. Juni 2024
Tim Stellwag

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Greule
Zweitprüfer: B. Sc. Fabian Oving

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**
Department Medientechnik
Finkenau 35
20081 Hamburg

Zusammenfassung

Die folgende Thesis untersucht praxisnahe Bewertungsmöglichkeiten zur Gefahr photochemischer und thermischer Netzhautschädigungen im Bühnen und Studiobereich, um Personen aus der Branche eine Gefährdungsbeurteilung zu erleichtern und einen Überblick über die Gefährdungen zu geben.

Zunächst werden die benötigten Grundlagen der Lichttechnik und optischen Strahlung erklärt. Im Hauptteil wird eine Einführung in das Thema der photochemischen und thermischen Netzhautgefährdung gegeben, sowie die aktuellen Vorschriften zu diesen vorgestellt, welche eine Gefährdungsbeurteilung ermöglichen sollen. In zwei Messungen werden verschiedene Scheinwerfer in Bezug auf die Netzhautgefährdung untersucht. Zudem wird in einer dritten Messreihe die Leuchtdichte genauer betrachtet.

Daraufhin werden unterschiedliche Bewertungsmethoden vorgestellt, welche eine unkompliziertere Gefährdungsbeurteilung ermöglichen sollen, um komplizierte Messungen zu vermeiden. Außerdem werden deren Vor- und Nachteile diskutiert und bewertet. Auch Schutzmaßnahmen bezüglich der vorgestellten Gefährdungen werden aufgezeigt. Abschließend betrachtet gibt es durchaus vereinfachte Bewertungsmöglichkeiten im Bereich der photochemischen Netzhautgefährdung. Bei der thermischen Netzhautgefährdung gibt es aktuell jedoch keine vereinfachte Bewertungsmethode.

Abstract

The following thesis examines practical assessment options for the risk of photochemical and thermal retinal damage in the stage and studio area in order to make it easier for people in the industry to carry out a risk assessment and provide an overview of the hazards.

First, the necessary basics of lighting technology and optical radiation are explained. In the main part, an introduction is given to the topic of photochemical and thermal retinal hazards, and the current regulations on these are presented, which should enable a risk assessment to be carried out. In two measurements, various headlamps are examined with regard to the retinal hazard. In addition, the luminance is examined more closely in a third series of measurements.

Various evaluation methods are then presented, which are intended to facilitate a more straightforward risk assessment in order to avoid complicated measurements. Their advantages and disadvantages are also discussed and evaluated. Protective measures relating to the hazards presented are also outlined. In conclusion, there are certainly simplified assessment options in the area of photochemical retinal hazards. There is currently no simplified assessment method for thermal retinal hazards.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	I
ABSTRACT	I
1. GRUNDLAGEN	1
1.1. WAHRNEHMUNG VON LICHT	1
1.1.1. Strahlung und Spektrum	1
1.1.2. Das menschliche Auge	2
1.2. LICHTTECHNISCHE GRUNDGRÖßEN	4
1.2.1. Spektrale Hellempfindlichkeit	4
1.2.2. Ω - Raumwinkel	5
1.2.3. Radiometrische vs. Photometrische Größen	5
1.2.4. Φ – Strahlungsleistung, Lichtstrom	5
1.2.5. I – Strahlstärke, Lichtstärke	6
1.2.6. E – Bestrahlungsstärke, Beleuchtungsstärke	6
1.2.7. L – Strahldichte, Leuchtdichte	7
1.3. WINKEL	8
1.3.1. α – Quellwinkel	8
1.3.2. γ – Empfangswinkel	9
2. LEUCHTMITTEL	10
2.1. HALOGENGLÜHLAMPE	10
2.2. GASENTLADUNGSLAMPEN	11
2.2.1. Hochdruck-Metallhalogendampflampe	12
2.2.2. Ultra High Pressure (UHP)	12
2.3. LICHEMITTIERENDE DIODEN (LED)	12
2.4. HALBLEITER-LASER	14
3. GEFÄHRDUNGEN DURCH KÜNSTLICHE INKOHÄRENTE OPTISCHE STRAHLUNG	16
3.1. PHOTOCHEMISCHE SCHÄDIGUNG DER NETZHAUT	17
3.2. THERMISCHE SCHÄDIGUNG DER NETZHAUT	18
4. GESETZLICHE REGELUNGEN KÜNSTLICHER STRAHLUNG	19
4.1. NORMEN	19
4.2. GRENZWERTE & BEWERTUNGSFUNKTIONEN	20
4.2.1. Photochemische Netzhautgefährdung	21
4.2.2. Photochemische Netzhautgefährdung – Kleine Quelle	21
4.2.3. Thermische Netzhautgefährdung	23
4.2.4. Thermische Netzhautgefährdung – schwacher visueller Reiz	23
4.2.5. ICNIRP-Empfehlung thermische Netzhautgefährdung	25
4.3. RISIKOGRUPPENKLASSIFIZIERUNG	26
4.4. DIN IEC/TR 62778	29
4.5. DIN EN IEC 62471-7	31
5. MESSVERFAHREN	32
5.1. MESSUNG DER BESTRAHLUNGSSTÄRKE	32
5.2. MESSUNG DER STRAHLDICHTEN	33
5.2.1. Grundlegendes zur Strahldichtemessung	33
5.2.2. Standardmethode	35
5.2.3. Alternative Methode	36
5.3. VORGEHEN ZUR MESSUNG DER BLAULICHTGEFÄHRDUNG	37
5.4. MESSUNG DER QUELLGRÖßE	38
6. MESSUNGEN	40
6.1. MESSTECHNIK	40
6.1.1. JETI Specbos 1211UV	40

6.1.2.	<i>Gigahertz-Optik X1-3</i>	42
6.1.3.	<i>fruitcore Horst 900</i>	42
6.2.	MESSUNG 1 – LED-ENGINES	43
6.2.1.	<i>Messaufbau</i>	43
6.2.2.	<i>Durchführung</i>	43
6.2.3.	<i>Auswertung: ARRI L7-C</i>	44
6.2.4.	<i>Auswertung: ARRI SkyPanel X</i>	46
6.2.5.	<i>Auswertung: ETC SourceFour LED Series 2 Lustr</i>	48
6.2.6.	<i>Auswertung: Robe Robin Spider</i>	49
6.2.7.	<i>Auswertung: JB-Lighting P12 Profile HP</i>	51
6.3.	MESSUNG 2 – LASER-ENGINE	52
6.3.1.	<i>Messaufbau</i>	52
6.3.2.	<i>Durchführung</i>	52
6.3.3.	<i>Auswertung</i>	53
6.4.	LEUCHTDICHTEMESSUNG <i>L_v</i>	54
6.4.1.	<i>Messaufbau</i>	54
6.4.2.	<i>Durchführung</i>	54
6.4.3.	<i>Auswertung</i>	54
6.5.	FAZIT	56
6.6.	KRITISCHE WÜRDIGUNG DER MESSUNGEN	56
7.	PRAXISNAHE EVALUATIONSMETHODEN	58
7.1.	WELCHE SCHEINWERFER MÜSSEN DETAILLIERT BETRACHTET WERDEN?	58
7.2.	VEREINFACHTE BEURTEILUNGSMETHODE FÜR WEIBLICHTQUELLEN	58
7.2.1.	<i>Ergebnis-Vergleich mit Messwerten von Scholl</i>	59
7.2.2.	<i>Ergebnis-Vergleich mit eigenen Messwerten</i>	62
7.3.	KEGELDIAGRAMM	66
7.4.	REGELUNGEN KLEINE QUELLEN	67
7.5.	HANDLICHE MESSGERÄTE	68
7.6.	AUFKLÄRUNGSARBEIT	69
8.	SCHUTZMAßNAHMEN	70
8.1.	TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHMEN	70
8.2.	ORGANISATORISCHE SCHUTZMAßNAHMEN	70
8.3.	PERSÖNLICHE SCHUTZMAßNAHMEN	71
9.	FAZIT & AUSBLICK	73
10.	ANHANG	75
10.1.	SPEKTRALE WERTE DER GEWICHTUNGSFUNKTIONEN	75
10.2.	<i>KB, v</i> WERTE IN ABHÄNGIGKEIT DER FARBTEMPERATUR	76
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	77
	TABELLENVERZEICHNIS	79
	LITERATURVERZEICHNIS	80
	EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	83

1. Grundlagen

In diesem Kapitel werden zum besseren Verständnis der Arbeit einige Begrifflichkeiten sowie theoretische Grundlagen erklärt und erläutert.

1.1. Wahrnehmung von Licht

1.1.1. Strahlung und Spektrum

Die für das menschliche Auge sichtbare Strahlung ist Teil der elektromagnetischen Strahlung. Dabei beschreibt die optische Strahlung den Bereich von kurzwelliger UV-Strahlung ab 100 nm bis zur langwelliger IR-Strahlung mit Wellenlängen bis 10^6 nm.¹

Als Licht wird der Teil des elektromagnetischen Spektrums bezeichnet, welcher über das menschliche Auge wahrnehmbar ist. Der Bereich des sichtbaren Lichts wurde von 380 bis 780nm definiert. Die Grenzen sind jedoch von Mensch zu Mensch unterschiedlich und somit fließend.² Die unterschiedlichen Wellenlängen werden vom menschlichen optischen System jeweils anders interpretiert, wodurch die unterschiedlichen Farbeindrücke entstehen.³

Die UV-Strahlung deckt den Bereich von 100 bis 380 nm ab und kann erhebliche Schäden beim menschlichen Organismus oder den Augen hervorrufen.⁴ Die UV-Strahlung wird in folgende drei Bereiche unterteilt:

- **UV-C** von 100 bis 280 nm besitzt stark keimtötende Wirkung und kann Luftsauerstoff in Ozon umwandeln, kann beim Menschen Sonnenbrand und Bindehautentzündungen hervorrufen
- **UV-B** von 280 bis 315 nm, welches beim Menschen das Vitamin D2 bildet, kann ebenfalls Sonnenbrand und Bindehautentzündungen erzeugen.
- **UV-A** von 315 bis 380 nm bräunt die menschliche Haut, ohne einen Sonnenbrand zu erzeugen.

Auch die IR-Strahlung, welche am langwelligen Ende des Lichts anschließt, umfasst den Bereich von 780 nm bis 1 mm. Die IR-Strahlung erzeugt eine Wärmewirkung in der Haut und kann ebenfalls in drei Bereiche unterteilt werden:

- **IR-A** von 780 bis 1400 nm, welche zur Linsentrübung auch als Grauer Star bekannt, und Verletzung der Netzhaut führen kann.
- **IR-B** von 1400 bis 3000 nm kann zur Linsentrübung und Verbrennung der Hornhaut (Prediger Lichtberater kein Datum)führen.
- **IR-C** von 3000 nm bis 1 mm ist in der Lage die Hornhaut zu verbrennen.⁵⁶

¹ (Greule 2021), S. 4

² (Lübbe 2013), S. 2

³ (Witting 2014), S. 25

⁴ (Mueller 2014), S. 44

⁵ (Scholl 2022), S. 34

⁶ (Ris 2008), S. 18

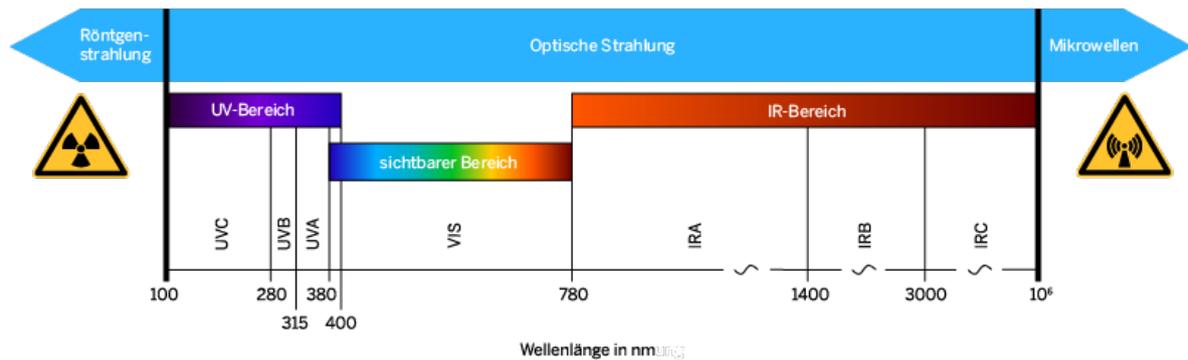


Abbildung 1: Spektrum optische Strahlung; Quelle: (Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsgestaltung Nordrhein-Westfalen kein Datum)

In Abbildung 1 ist die optische Strahlung in die einzelnen Bereiche aufgeschlüsselt dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass der sichtbare Bereich nur einen kleinen Teil der gesamten Strahlung abdeckt. Der UV-Bereich ist ebenfalls nicht allzu groß, den Hauptteil der optischen Strahlung wird von der Infrarotstrahlung belegt.

1.1.2. Das menschliche Auge

Das Auge ist für den Menschen das wohl wichtigste Sinnesorgan, denn 80 % aller Sinneseindrücke werden über das Auge wahrgenommen.⁷

Das Auge kann als optisches System betrachtet werden, welches sich aus der Hornhaut, Iris, Linse und dem Glaskörper zusammensetzt.

Die Iris regelt die Menge des einfallenden Lichts und bestimmt somit auch die Größe der Pupillenöffnung, wobei die Iris als mechanische Blende fungiert.⁸

Die Linse ist in der Lage das Auge durch veränderlichen Krümmungsradius und damit variabler Brechkraft auf unterschiedliche Sehdistanzen anzupassen. Im Alter verhärtet sich die Linse, wodurch Nahobjekte unscharf erscheinen (Altersweitsichtigkeit).⁹

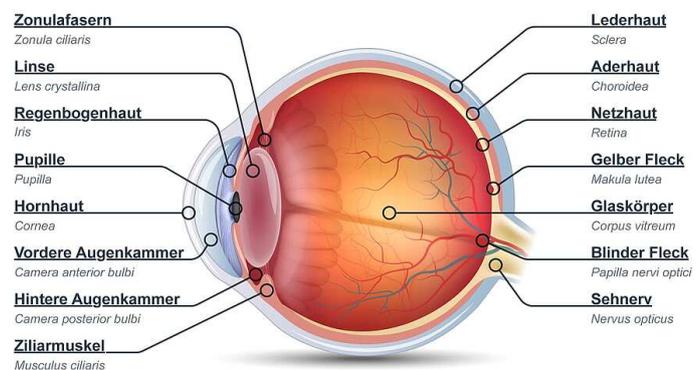


Abbildung 2: Anatomie des menschlichen Auges; Quelle: (Kuratorium Gutes Sehen e.V. kein Datum)

⁷ (Ris 2008), S.45

⁸ (Witting 2014), S. 162

⁹ (Ris 2008), S.45

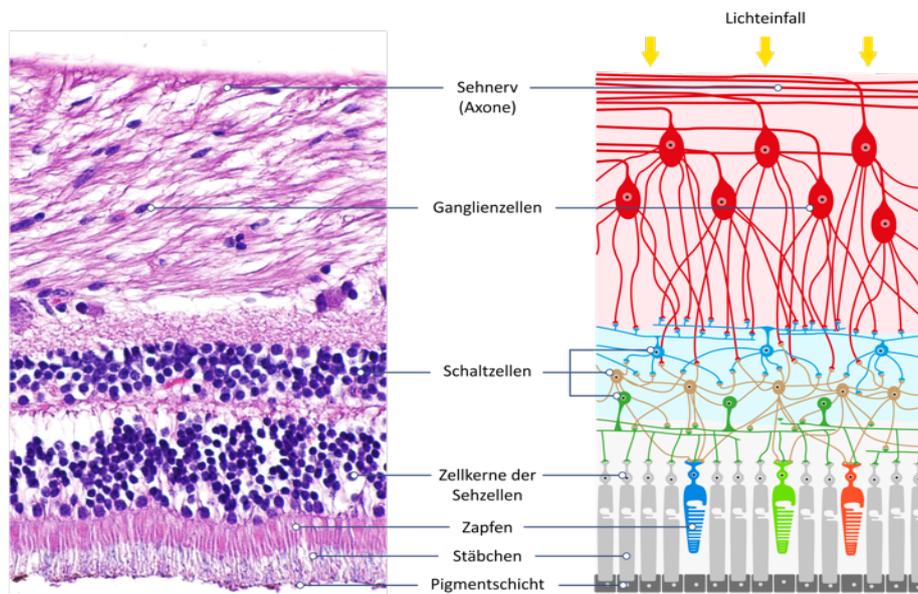


Abbildung 3: Aufbau der Netzhaut; Quelle: (BVmed - Bundesverband Medizintechnologie e.V. kein Datum)

In der Netzhaut werden einfallende Lichtstrahlen durch chemische Prozesse in elektrische Signale umgewandelt. Diese Signale werden über den Sehnerv zum Gehirn weitergeleitet, in dem aus den Nervensignalen Bilder gebildet werden. Die Netzhaut besteht aus verschiedenen Schichten, welche unter anderem die Photorezeptoren beinhalten. Bei diesen wird zwischen den Stäbchen und Zapfen unterschieden.

Die Stäbchen sind für das Helligkeitsempfinden zuständig und deutlich lichtempfindlicher als die Zapfen. Daher sind sie besonders wichtig bei niedrigen Leuchtdichten und größtenteils für das Nachtsehen zuständig. Insgesamt sind auf der Netzhaut rund 130 Millionen Stäbchen-Rezeptoren vorhanden.

Die Zapfen hingegen haben eine geringe Lichtempfindlichkeit und sind geringfügig für das Helligkeitsempfinden zuständig. Ihre Hauptaufgabe liegt in der Farbwahrnehmung und somit dem Tagsehen. Es wird zwischen drei Zapfentypen unterschieden, die jeweils bestimmte Bereiche des Lichtspektrums abdecken: Blau, Grün und Rot. Die Farben können bis zu einem Wellenlängenbereich von 1 bis 2 nm unterschieden werden. Die 6,5 Millionen Zapfen liegen größtenteils im Bereich der Fovea, dem Punkt des schärfsten Sehens. In diesem Bereich sind nur Zapfen und keine Stäbchen vorhanden, die Anzahl der Zapfen nimmt nach außen hin ab. Die Farbwahrnehmung ist daher nicht gleichmäßig über den visuellen Bereich verteilt, am Rand können Objekte nur noch grau wahrgenommen werden.¹⁰

Aufgrund der Aufteilung von Stäbchen und Zapfen ist der Bereich des scharfen Sehens auf 1 bis 2 Grad beschränkt. Durch ständige schnelle Bewegungen des Auges bleibt die Begrenzung der maximalen Sehschärfe im Normalfall unbemerkt.¹¹ Diese ruckartige Bewegung nennt sich Saccade. Das Auge ruht für ungefähr 0,25 s auf einem Punkt und springt dann zum nächsten Detail.¹²

¹⁰ (Mueller 2014), S.51 f

¹¹ (Witting 2014), S. 168

¹² (Mueller 2014), S. 53

1.2. Lichttechnische Grundgrößen

1.2.1. Spektrale Hellempfindlichkeit

Das menschliche Auge empfindet Helligkeiten nicht nur aufgrund der Strahlungsleistung als unterschiedlich, sondern auch durch die spektrale Zusammensetzung des Lichts. Für normalsichtige Menschen hat die CIE (Internationale Beleuchtungskommission) daher eine spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion mit der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ bestimmt. Für das Tag- und Nachtsehen gibt es jeweils eine eigene Funktion, da diese unterschiedlich wahrgenommen werden.

- Tagesehen (photopisches Sehen): Farben können deutlich wahrgenommen werden, die maximale Hellempfindlichkeit liegt bei 555 nm im gelb-grünen Bereich.
- Nachtsehen (scotopisches Sehen): Farben werden nicht mehr klar wahrgenommen, die maximale Hellempfindlichkeit liegt bei 507 nm im blau-grünen Bereich.¹³

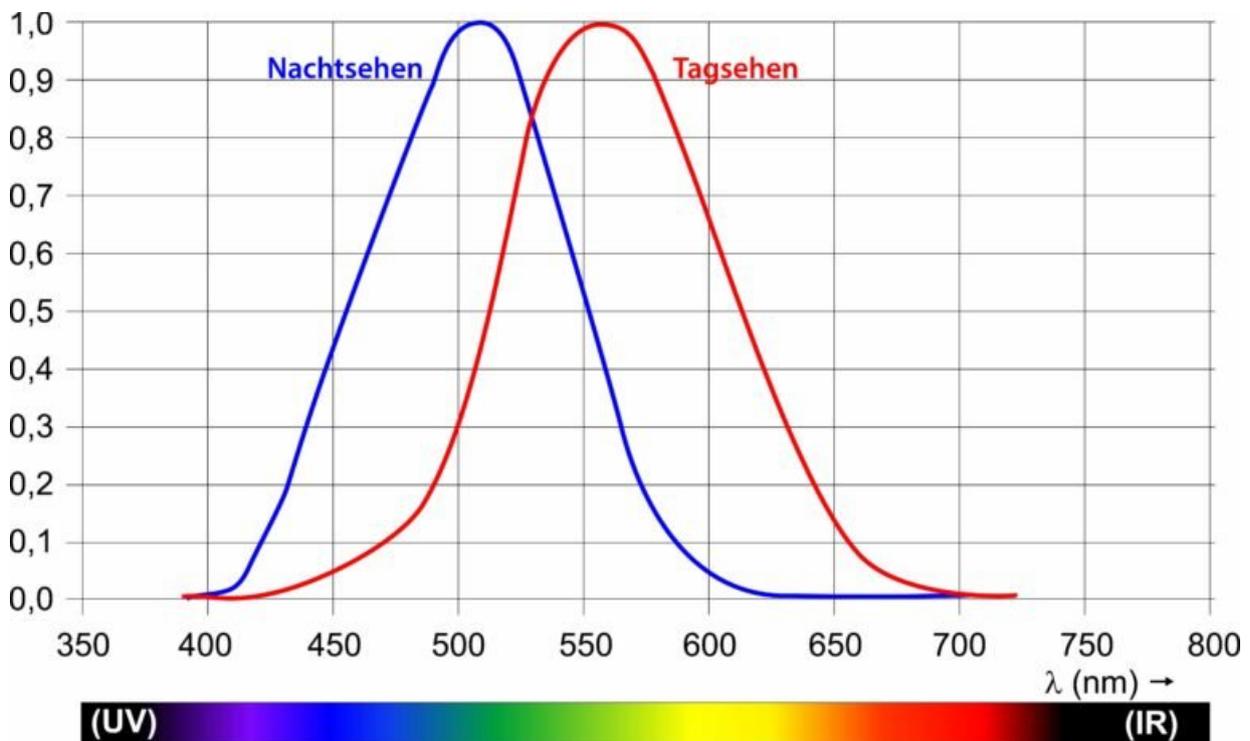


Abbildung 4: Tag- und Nachtsehen; Quelle: (hofstein GmbH kein Datum)

¹³ (Ris 2008), S. 21 f

1.2.2. Ω - Raumwinkel

Zur Berechnung einiger Größen wird der Raumwinkel benötigt. Die Beleuchtungstechnik hat immer mit räumlichen Gebilden zu tun, weshalb diese definiert werden müssen. Dies geschieht mit Hilfe des *Raumwinkels* Ω , welcher mit der Einheit *Steradian* [sr] beschrieben wird. *Steradian* ist die Einheit des Bogenmaßes, welcher den Winkel einer Ebene beschreibt. Meist wird dies in Grad angegeben, jedoch ist auch das Bogenmaß möglich, welches für die Berechnung lichttechnischer Größen genutzt wird.¹⁴

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (1)$$

Ω : Raumwinkel

A: Teilfläche einer Kugel

r: Radius

1.2.3. Radiometrische vs. Photometrische Größen

Radiometrische Größen beschreiben die physikalische Strahlung, während die photometrischen Größen die physiologischen Eigenschaften des menschlichen Auges mit einbeziehen. Diese gewichten die Wellenlängen unterschiedlich, wodurch nicht mehr nur mit den physikalischen Einheiten gearbeitet werden kann. Die Hellempfindlichkeit wird im nächsten Unterpunkt genauer betrachtet. Radiometrischen Größen sollten mit einem tiefgesetzten e (e = energetisch) und die photometrischen Größen mit einem tiefgesetzten v (v = visuell) gekennzeichnet werden.¹⁵

1.2.4. Φ – Strahlungsleistung, Lichtstrom

Die Strahlungsleistung wird wie in der Energietechnik in *Watt* [W] angegeben und stellt die radiometrische Größe dar. Aufgrund der Hellempfindlichkeit des Menschen, ist die eigentliche Strahlungsleistung in der Beleuchtungstechnik nicht sehr relevant. Daher wurde der Lichtstrom eingeführt, welcher die Strahlungsleistung mit der Hellempfindlichkeit bewertet darstellt. Dieser wird mit der Einheit *Lumen* [lm] beschrieben und ist eine photometrische Größe.¹⁶

$$\Phi_v = 683 \text{ lm/W} \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

Φ_v : Lichtstrom

Φ_e : Strahlungsleistung

$V(\lambda)$: Hellempfindlichkeitskurve

¹⁴ (Ris 2008), S. 22 f

¹⁵ (Greule 2021), S. 6, 15

¹⁶ (Ris 2008), S. 22 f

1.2.5. I – Strahlstärke, Lichtstärke

Die Lichtstärke I_e ist der Anteil der Strahlungsleistung Φ_e , der im Raumwinkel Ω von einer Lichtquelle emittiert und in der Einheit $[W / sr]$ angegeben wird. Dabei handelt es sich um eine radiometrische Größe.¹⁷

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad (3)$$

I_e : Lichtstärke

Φ_e : Strahlungsleistung

Ω : Raumwinkel

Die photometrische Lichtstärke I_v ist die Basiseinheit der Lichttechnik und wird in der Einheit *Candela* $[cd]$ angegeben. Sie beschreibt die Lichtmenge, die in eine bestimmte Richtung ausgestrahlt wird und steht im Verhältnis vom Lichtstrom zum Raumwinkel.¹⁸

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad (4)$$

I_v : Lichtstärke

Φ_v : Lichtstrom

Ω : Raumwinkel

1.2.6. E – Bestrahlungsstärke, Beleuchtungsstärke

Die Bestrahlungsstärke E_e wird genutzt, um die Intensität einer Lichtquelle zu definieren und wird in der Einheit Watt pro m^2 $[W / m^2]$ angegeben.¹⁹

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (5)$$

E_e : Bestrahlungsstärke

Φ_e : Strahlungsleistung

A: Fläche

Die Beleuchtungsstärke E_v wird in *Lux* $[lx]$ angegeben und wird durch den Lichtstrom, der auf eine bestimmte Fläche fällt, bestimmt. Die Beleuchtungsstärke wird häufig als Dimensionierungsgröße genutzt, obwohl sie eigentlich nichts über den empfundenen Helligkeitseindruck des Auges aussagt.²⁰

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (6)$$

E_v : Beleuchtungsstärke

Φ_v : Lichtstrom

A: Fläche

¹⁷ (Greule 2021), S. 6

¹⁸ (Ris 2008), S. 26 f

¹⁹ (Greule 2021), S. 6

²⁰ (Ris 2008), S. 27 ff

1.2.7. L – Strahldichte, Leuchtdichte

Bei der Strahldichte L_e handelt es sich um eine physikalische Größe, die die Strahlungsleistung einer Fläche der Strahlungsquelle in einen Raumwinkel beschreibt und die Einheit $[\frac{W}{m^2 sr}]$ besitzt.²¹

$$L_e = \frac{I_e}{A} \quad (7)$$

L_e : Strahldichte

I_e : Strahlstärke

A: Fläche

Die Leuchtdichte ist die einzige lichttechnische Größe, die vom Auge wahrgenommen werden kann und gibt den Helligkeitseindruck einer leuchtenden oder beleuchteten Fläche an. Die Leuchtdichte wird mit der Einheit $[cd / m^2]$ angegeben.²²

$$L_v = \frac{I_v}{A} \quad (8)$$

L_v : Leuchtdichte

I_v : Lichtstärke

A: Fläche

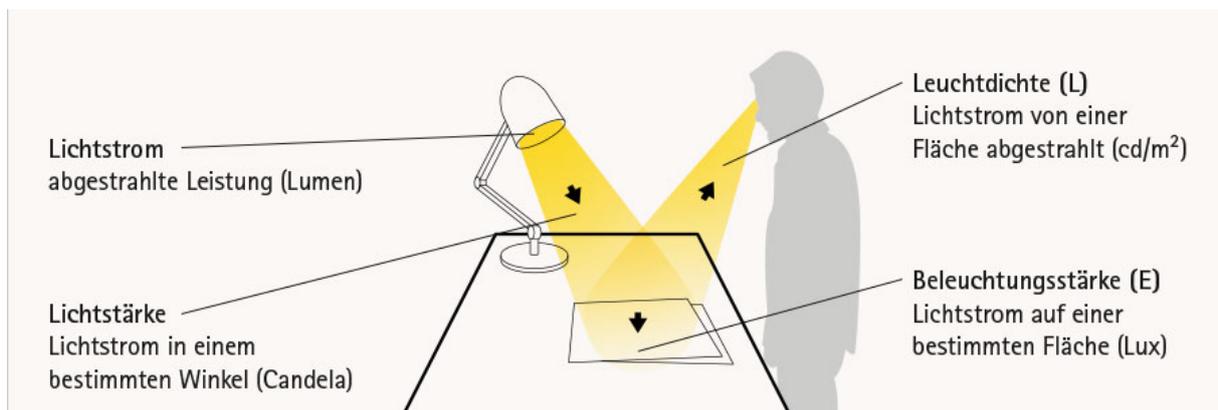


Abbildung 5: Übersicht photometrische Größen; Quelle: (Prediger Lichtberater kein Datum)

In Abbildung 5 sind die photometrischen Grundgrößen zusammengefasst. Zudem sind die Zusammenhänge grafisch dargestellt und beschrieben.

²¹ (Greule 2021), S. 7

²² (Ris 2008), S. 31 f

1.3. Winkel

Für das bessere Verständnis der nächsten Kapitel und zur Bewertung von Lichtquellen im Bezug auf die photochemische und thermische Netzhautgefährdung.

1.3.1. α – Quellwinkel

Der Quellwinkel α beschreibt die Winkelausdehnung der Quelle, welche sich aus der Größe der Quelle d und dem Betrachtungs-/ Messabstand r ergibt. Somit gilt:

$$\alpha = \frac{d}{r} \quad (9)$$

α : Quellwinkel

d : Durchmesser der Quelle

r : Betrachtungs-/ Messabstand

Der Quellwinkel wird in Radiant (rad) angegeben.

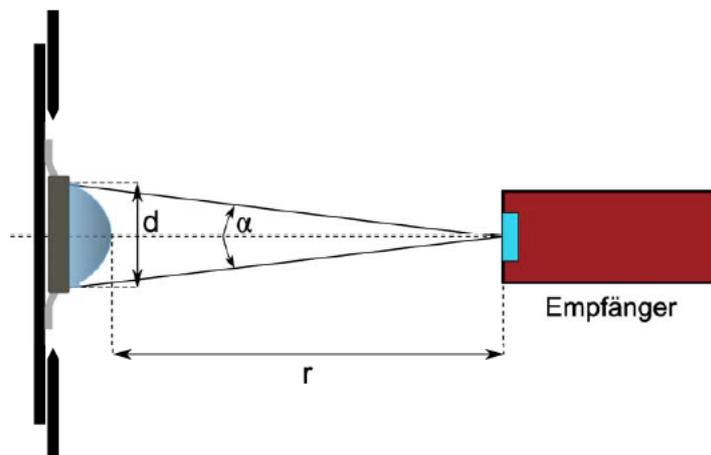


Abbildung 6: Quellwinke α ; Quelle: (Udocičić 2013), S. 29

In Abbildung 6 ist dargestellt, wie sich der Quellwinkel α aufspannt und definiert ist.

Im Fall von Scheinwerfern handelt es sich bei der Strahlungsquelle, solange vorhanden, um die Linse. Durch die Linse entsteht beim direkten Blick für das Auge eine „scheinbare“ Quelle, wobei die Größe d' nicht mit der geometrischen Größe der Linse d übereinstimmen muss. Hierdurch kann eine Änderung des Quellwinkels α entstehen.²³

$$\alpha = \frac{d'}{r} \quad (10)$$

α : Quellwinkel

d' : Durchmesser der scheinbaren Quelle

r : Betrachtungs-/ Messabstand

²³ (Udocičić 2013), S. 29 f

1.3.2. γ – Empfangswinkel

Der Empfangswinkel γ beschreibt das radialsymmetrische Sichtfeld in dem etwas auf optische Strahlung reagiert. Dabei kann es sich beispielsweise um ein menschliches Auge oder ein Messgerät handeln. Das Sichtfeld wird auch als „field of view – FOV“ bezeichnet. Realisiert werden können unterschiedliche Empfangswinkel über Lochblenden oder optische Systeme vor dem Empfänger. Auch dieser ebene Winkel wird in Radiant (rad) angegeben.²⁴

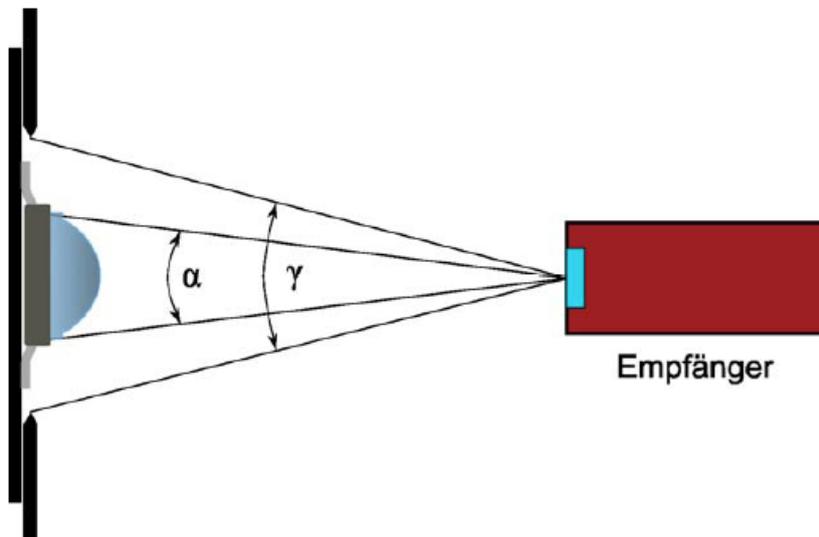


Abbildung 7: Quell- und Empfangswinkel γ ; Quelle: (Udocičić 2013), S. 31

In Abbildung 7 ist das Verhältnis zwischen Quelle und Empfänger dargestellt. Die Quelle spannt den Winkel α auf, während γ den Empfangswinkel beschreibt und den Sichtbereich des Empfängers definiert.

²⁴ (Udocičić 2013), S. 30 f

2. Leuchtmittel

Heutzutage gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Leuchtmitteln, welche in der Lichttechnikbranche eingesetzt werden. Dabei unterscheiden sie sich unter anderem in Wirkungsweise, Spektrum, Effizienz und Leuchtdichte.

In der Vorstellung wird auf die aktuell relevantesten Arten von Leuchtmitteln eingegangen, welche in Bezug auf Netzhautschädigungen eine wichtige Rolle spielen.

2.1. Halogenglühlampe

Bei der Halogenglühlampe handelt es sich um einen Temperaturstrahler, welcher eine höhere Lichtausbeute und verlängerte Lebensdauer hat im Vergleich zur normalen Glühlampe. Dies geschieht durch die sich im Glaskolben befindlichen Halogenverbindungen. Durch die Halogene können zudem höhere Temperaturen erreicht werden, wodurch die Farbtemperatur bei ca. 3200 K liegt.²⁵

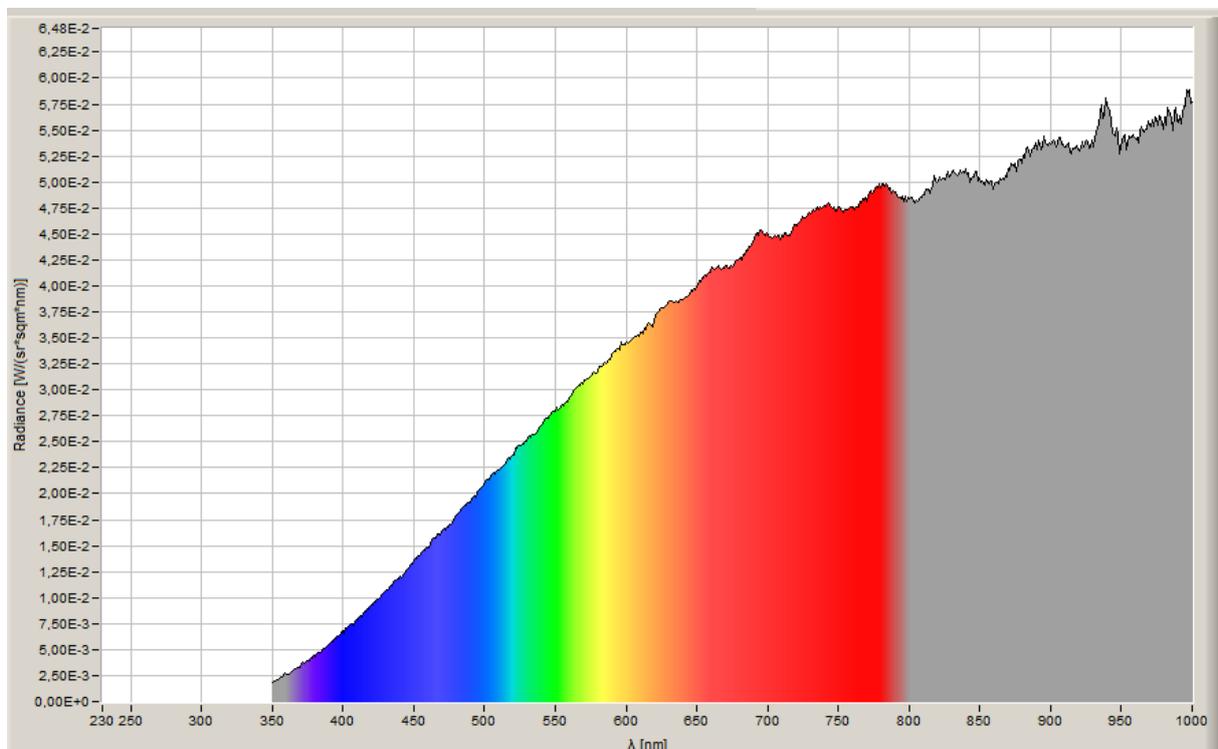


Abbildung 8: Spektrum eines Halogenleuchtmittels; Quelle: Fabian Oving

Am Spektrum eines Halogenleuchtmittels ist zu erkennen, dass dieses von Beginn der sichtbaren Strahlung bis in den IR-Bereich stetig steigt. Es sind kaum Anteile im UV-Bereich und Blau-Bereich der sichtbaren Strahlung vorhanden. Der Großteil liegt im Roten- und IR-Bereich. Durch den hohen IR-Anteil, welchen die menschliche Haut absorbiert, wirkt das Licht auf der Haut warm.

²⁵ (Mueller 2014), S. 137 f

2.2. Gasentladungslampen

Bei den Gasentladungslampen wird zwischen den Niederdrucklampen, wie beispielsweise der Leuchtstofflampe und den Hochdrucklampen unterschieden. Es wird sich im Folgenden auf zwei Hochdrucklampen konzentriert, da diese eher auf Bühnen und in Studios eingesetzt werden und in Bezug auf Netzhautschäden deutlich relevanter sind als die Niederdrucklampen.

Bei Hochdruckentladungslampen gibt es allgemein zwei Elektroden, zwischen denen durch einen Stromfluss ein Lichtbogen entsteht. Das Gasgemisch im Glaskolben steht hierbei unter Hochdruck, daher der Begriff Hochdruckentladungslampe. Zur Erzeugung des Lichtbogens wird zunächst eine sehr hohe Spannung benötigt, welche durch einen Zünder erreicht wird, danach regelt ein Vorschaltgerät den Stromfluss. Neben den sichtbaren Farben produzieren Hochdrucklampen auch Strahlung im UV-Bereich, daher ist ein direkter Kontakt zum brennenden Leuchtmittel zu vermeiden. Sonst können Augen- und Hautschäden auftreten. Aus diesem Grund muss diese Lampenart immer eine Linse oder Schutzglas besitzen.²⁶

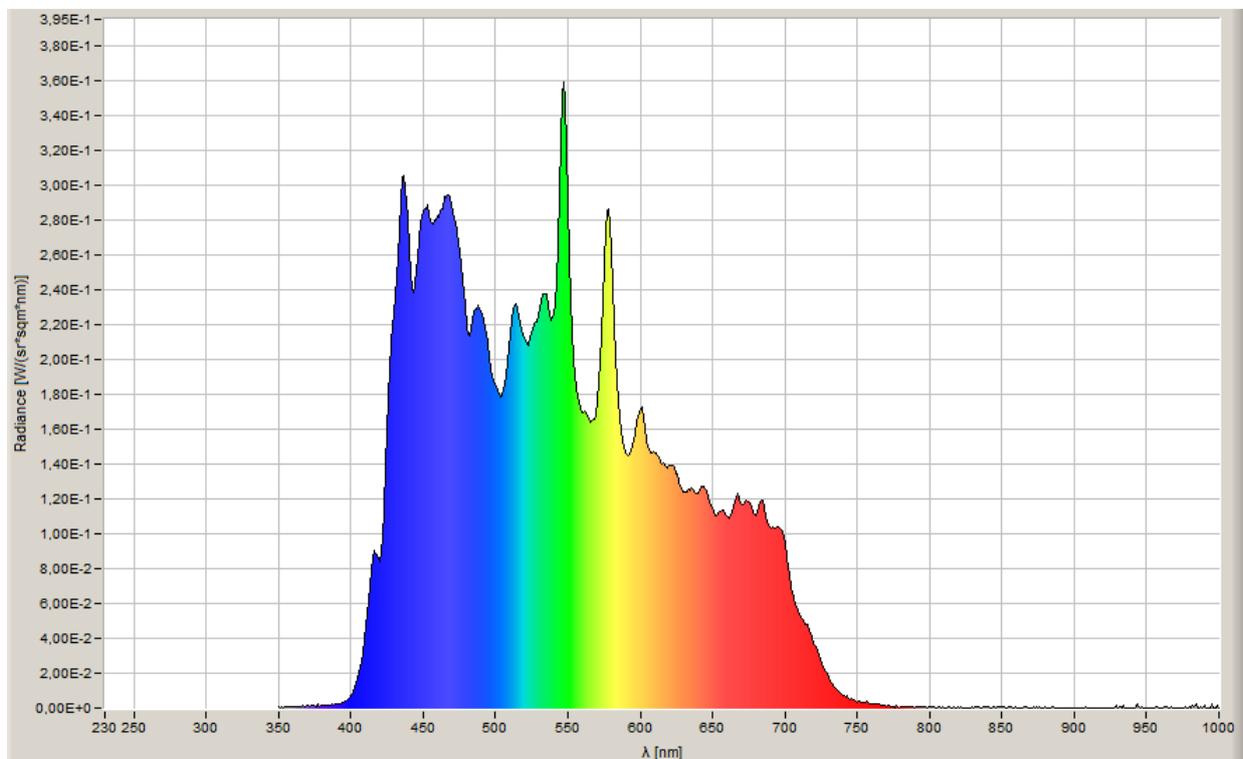


Abbildung 9: Spektrum einer Entladungslampe; Quelle: Fabian Oving

Das Spektrum einer Entladungslampe zeigt, dass die Strahlung bei Messungen von 230 – 1000 nm nur im Bereich 400 – 750 nm liegt. Dies ist jedoch nur mit UV-Filter der Fall, ansonsten wäre im UV-Bereich ebenfalls Strahlung vorhanden. Die einzelnen Peaks im Spektrum entstehen durch die unterschiedlichen Gase im Gasgemisch der Entladungslampe. Einige Entladungslampen haben noch ein wenig Strahlung über 1000 nm andere hingegen sind optisch dicht ab 800 nm.²⁷

²⁶ (Mueller 2014), S. 144 f

²⁷ (Scholl 2022), S. 15 f

2.2.1. Hochdruck-Metallhalogendampflampe

Die Hochdruck-Metallhalogendampflampe ist ein Nachfolger der Quecksilberdampf-Hochdrucklampe und wird heutzutage noch auf vielen Bühnen verwendet. Sie ist so beliebt, da sie aufgrund bestimmter Halogenverbindungen oder seltenen Erden, das Spektrum weiter auffüllen kann und somit bessere Farbwiedergabeeigenschaften erreicht. Zudem ist die Lichtausbeute höher. Die Farbtemperatur kann dabei zwischen 3000 – 6000 K liegen.²⁸ Im Bühnen- und Studiobereich werden die Lampen hauptsächlich als Leuchtmittel für Tageslichtscheinwerfer und Movinglights genutzt.²⁹

2.2.2. Ultra High Pressure (UHP)

Diese Lampe wurde zunächst für den Einsatz in Beamern entwickelt, bei denen es auf eine hohe Lebensdauer und Leuchtdichte ankommt. Zudem sollte diese Lampe ohne seltene Erden und Alkali Metalle funktionieren. Nur Quecksilber sollte die Brennspannung und Lichtemission übernehmen. Um dies zu erreichen wird ein Druck von 200 bar und höher benötigt. Später wurde die Lampenart weiterentwickelt, sodass sie auch in Bühnenscheinwerfern zum Einsatz kommt. Die Farbtemperaturen liegen meist bei 7.000 bis 10.000 K und der Farbwiedergabeindex ist nicht ganz so hoch, wie bei den Hochdruck-Metallhalogendampflampen.³⁰

2.3. Lichtemittierende Dioden (LED)

Die LED besteht aus mehreren Schichten halbleitenden Materials, wie alle Dioden. Dabei wandelt sie in der aktiven Schicht Gleichspannung in Licht um. Dieses Licht wird jedoch nur in einer bestimmten Farbe bzw. in einem bestimmten Spektrum emittiert und ist relativ schmalbandig, anders als die Glühlampe, die ein Vollspektrum erzeugt. Die Farben hängen hierbei vom verwendeten Material ab.³¹

Halbleiter Leuchtdioden bestehen aus einem Halbleiter-Chip und einem Kunststoffüberzug, welcher zeitgleich als Linse dient. Diese bündelt das divergent abgestrahlte monochromatisches Licht und schützt den LED-Chip zugleich vor Feuchtigkeit und Korrosion. Über die Jahre wurden durch Chipvergrößerungen, Optimierung der Chipgeometrie und dem Einsatz von Heterostrukturchips immer höhere Leistungen erzielt.

Lichtemittierende Dioden sind heutzutage in fast allen Farben des sichtbaren Spektrums, sowie als UV- oder Infrarotemitter vorzufinden. In der Veranstaltungsbranche wird bei leistungsstarken LED-Lichtquellen meist von LED-Engines gesprochen, welche aus vielen einzelnen LED-Chips bestehen. Diese lassen sich grundlegend in die zwei Formen Weißlicht-LED-Engine und Multispektrale-LED-Engine unterteilen, wobei es ab und an auch Mischformen gibt.

²⁸ (Ris 2008), S. 120 f

²⁹ (Greule 2021), S. 136

³⁰ (Scholl 2022), S. 17 ff

³¹ (Ris 2008), S. 132

Bei Weißlicht-LED-Engines werden ausschließlich blaue LEDs verbaut, welche mit einer Leuchtstoffschicht überzogen sind, die meist aus Phosphorverbindungen besteht. Sie geben dadurch weißes Licht einer bestimmten Farbtemperatur ab und die Veränderung der Lichtfarbe geschieht subtraktiv durch das optische System des Scheinwerfers.

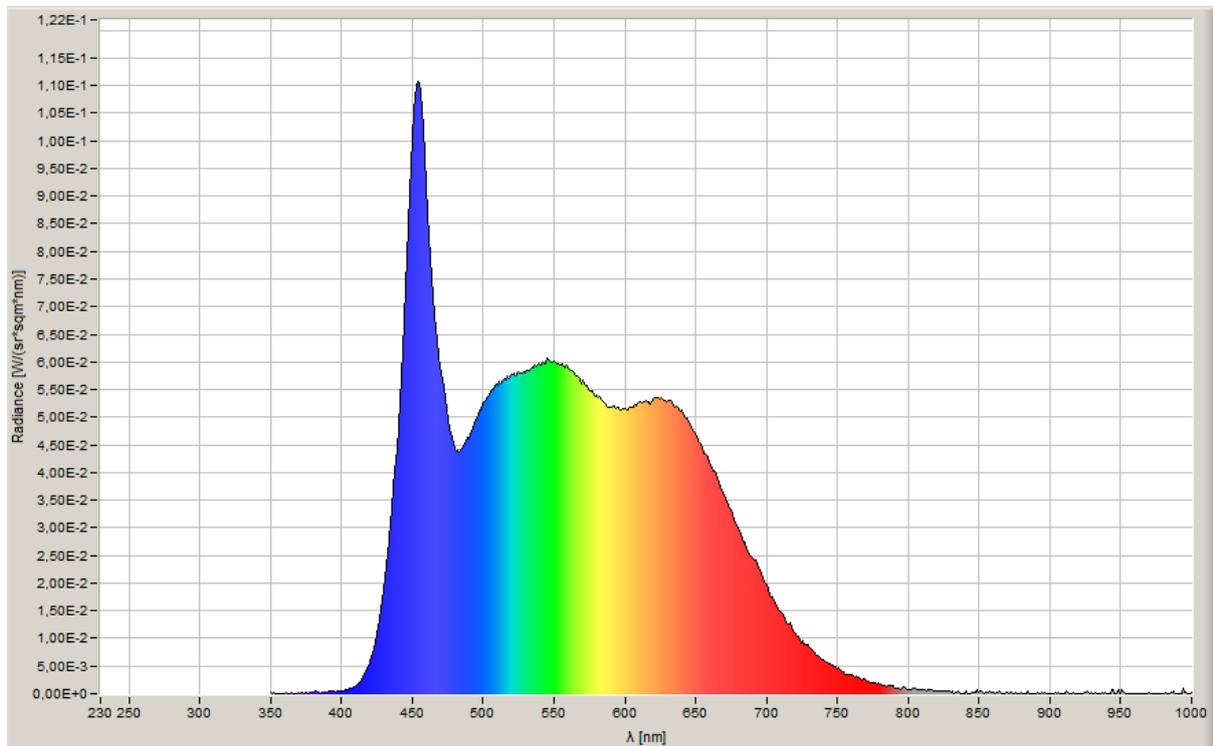


Abbildung 10: Spektrum einer Weißlicht LED-Engine; Quelle: Fabian Oving

Im Spektrum der Weißlicht-Engine ist ein deutlicher Peak im blauen Bereich um 450 nm zu sehen. Dieser tritt auf, da es sich um eine blaue LED handelt. Der weitere Verlauf entsteht durch die Leuchtstoffschicht, welche die blaue LED bedeckt.

Multispektral-LED-Engines bestehen aus LED-Chips unterschiedlicher Gruppen, diese geben jeweils unterschiedliche Lichtfarben ab. Typischerweise bestehen diese aus drei bis acht verschiedenen LED-Gruppen, wobei weißes Licht sowie andere Lichtfarben additiv erzeugt werden. Dabei besitzen die Multispektrale-LED-Engines den Vorteil, dass Farben meist deutlich besser eingestellt werden können und auch der Alterungsprozesse besser ausgeglichen werden kann. Trotz der Vorteile werden aufgrund niedrigerer Preise aktuell häufiger Weißlicht-LED-Engines verbaut als Multispektrale LED-Engines.³²

³² (Greule 2021), S. 136 - 146

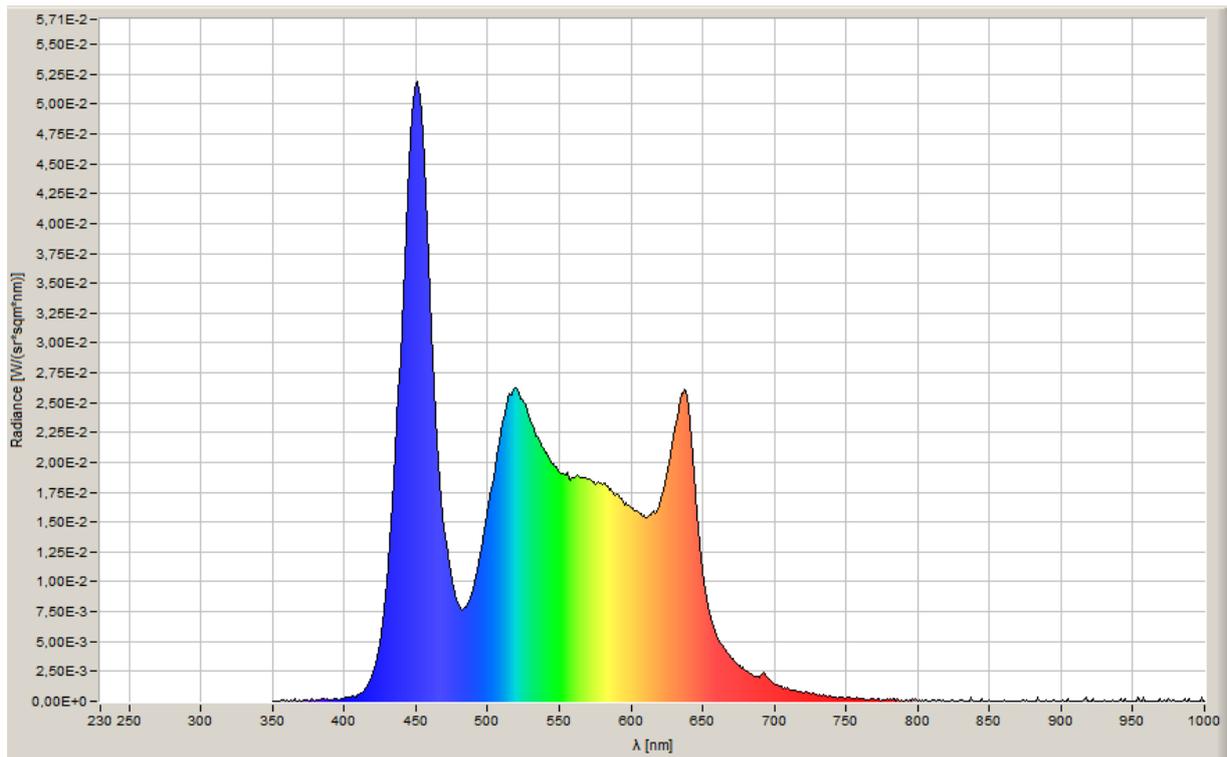


Abbildung 11: Spektrum einer Multispektralen LED-Engine; Quelle: Fabian Oving

Auch beim Spektrum einer Multispektralen LED-Engine gibt es einen Peak im blauen Bereich bei ungefähr 450 nm. Hinzu kommen jedoch weitere Peaks in anderen Spektralbereichen, bei dieser Engine. Wie in Abbildung 11 zu erkennen ist, liegen diese bei 520 nm, 650 nm sowie 700 nm. Die Peaks kommen aufgrund der unterschiedlichen LEDs in den jeweiligen Spektralbereichen zustande.

2.4. Halbleiter-Laser

Durch die hohen möglichen Strahldichten sind Laser-Engines zunehmend interessant für die Bühnentechnik, sie werden auch als Diodenlaser oder Laser bezeichnet. Vor ein paar Jahren wurden die ersten Movinglights mit Laser-Engine vorgestellt.

Technisch sind die Halbleiter-Laser ähnlich wie LEDs aufgebaut. Sie bestehen aus denselben Materialien, aber die Dotierungen sind deutlich höher und der lichtemittierende Bereich wird räumlich eingeschränkt, um den Laserbetrieb zu gewährleisten. Auch bei den Diodenlasern wird zwischen zwei Technologien unterschieden, dem durch Phosphor konvertiertem Laserlicht und den monochromatischen Halbleiterlasern in den drei Grundfarben rot, grün und blau, welche eine Multispektral-Engine bilden.³³

³³ (Scholl 2022), S. 30 ff

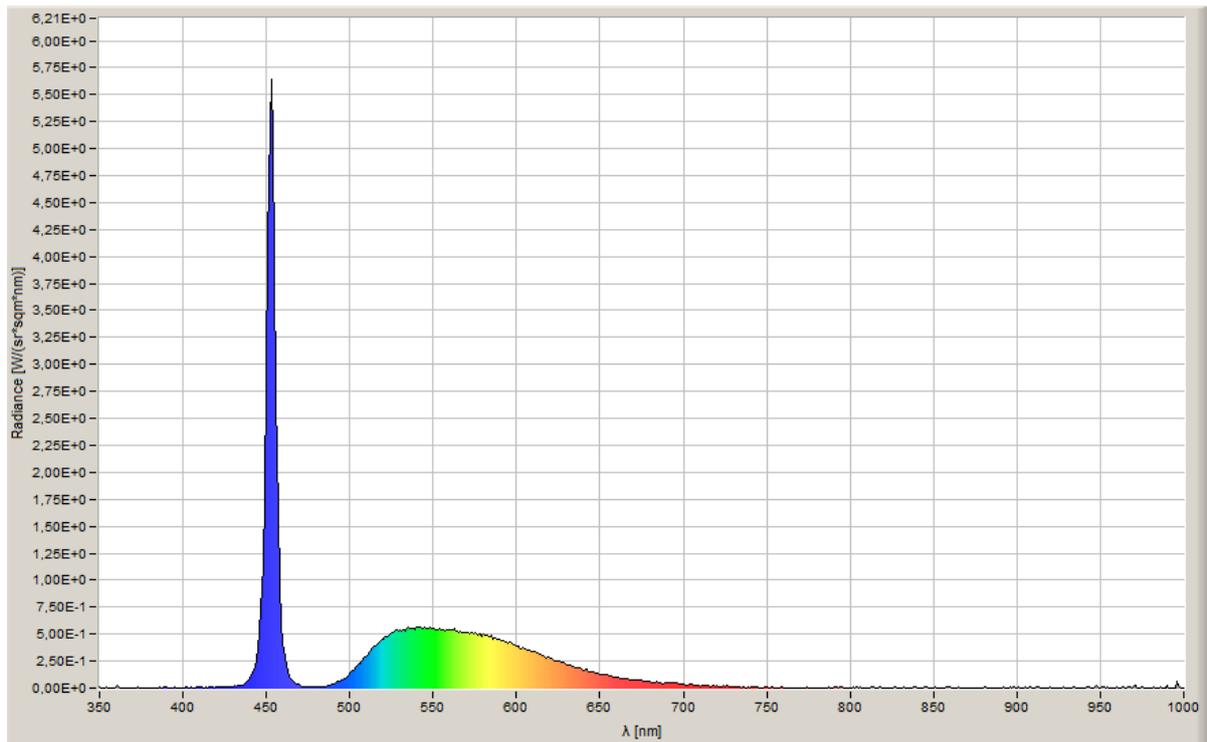


Abbildung 12: Spektrum einer Weißlicht Laser-Engine; Quelle: Fabian Oving

Auch in dem Spektrum der Weißlicht Laser-Engine gibt es einen Peak bei 450 nm, dieser ist jedoch schmalbandiger und stärker im Vergleich zu dem einer Weißlicht LED-Engine. Zudem ist im weiteren Verlauf, anders als bei der Weißlicht LED-Engine zu erkennen, dass die Engine bei ca. 475 nm sowie über 700 nm kaum Licht emittiert.

3. Gefährdungen durch künstliche inkohärente optische Strahlung

Inkohärente künstliche optische Strahlung kann bei übermäßiger Bestrahlung zu Schäden von Haut und Augen führen und stellt somit eine Gefahr für den Menschen dar. Durch alle drei Bereiche der optischen Strahlung kann es zu Schädigungen kommen.³⁴

Im UV-Bereich wird zwischen akuten und chronischen Schäden unterschieden. Akute Schäden treten nach einmaliger zu hoher UV-Belastung auf wie beispielsweise Sonnenbrand oder Hornhautentzündung des Auges, während chronische Schäden erst nach oftmaliger UV-Exposition nach Jahren auftreten wie zum Beispiel grauer Star oder Hautkrebs. Die Wirkung der UV-Strahlung ist wellenlängenabhängig und ruft fast nur photochemische Schäden hervor, was bedeutet, dass die Photonen, die ins Gewebe eindringen im Gewebe direkt eine chemische Veränderung hervorrufen. Nur im UV-A Bereich kann es zu thermischen Schäden kommen, welche durch eine Temperaturerhöhung hervorgerufen wird. Die Temperaturerhöhung ergibt sich durch die Absorption im Gewebe.³⁵

Auch im Bereich der IR-Strahlung wird zwischen photochemischen und thermischen Schäden unterschieden, wobei sie größtenteils thermische Schäden hervorrufen kann. Ebenfalls wird zwischen akuten Schäden, wie Verbrennungen der Haut, thermischer Schädigung der Netzhaut oder der photochemischen Schädigung der Netzhaut und den chronischen Schäden wie die thermische Schädigung der Linse unterschieden.³⁶

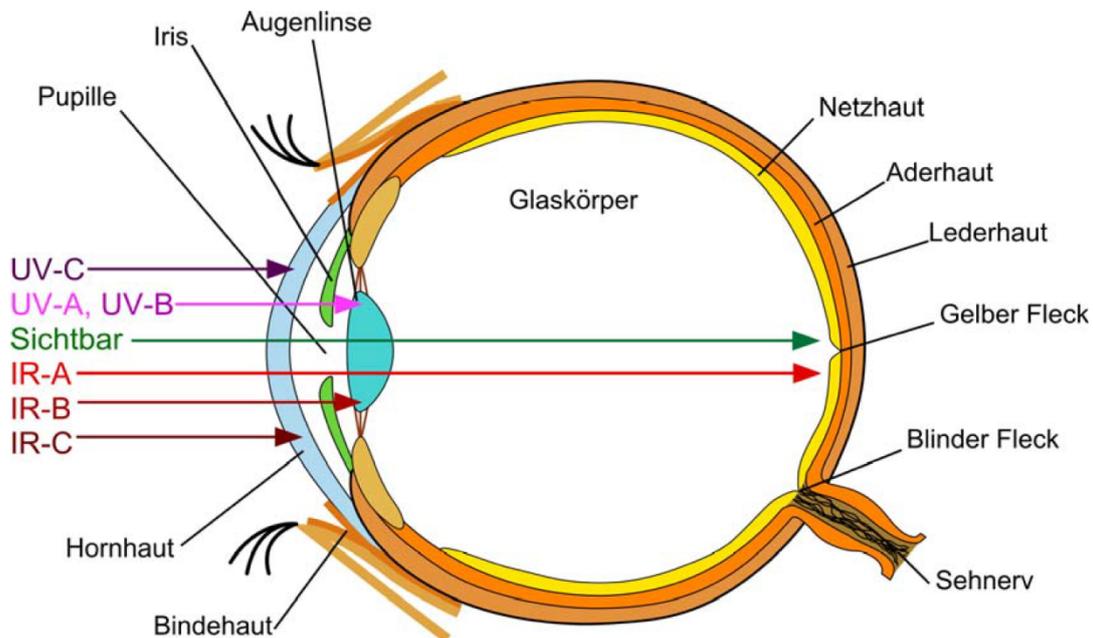


Abbildung 13: Optische Strahlung im Auge; Quelle: (Udocičić 2013), S. 25

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass ein Großteil der optischen Strahlung bereits durch die vorderen Augenmedien absorbiert wird und diese nicht bis auf die Netzhaut treffen. Lediglich die sichtbare Strahlung sowie die IR-A Strahlung gelangen auf die Netzhaut. Aus diesem

³⁴ (Greule 2021), S. 70

³⁵ (Weber 2015), S. 24 f

³⁶ (AUVA 2011), S. 9 f

Grund können auch nur diese beiden Arten der optischen Strahlungen zu Netzhautschäden führen. Die anderen Bereiche der optischen Strahlung sind jedoch in der Lage andere Teile der Augen und Haut zu schädigen.

Schädigungen an der Netzhaut können besonders schwerwiegend sein und zur erheblichen Beeinträchtigung des Sehvermögens führen. Häufig bleiben kleinere Schäden unbemerkt solange sie außerhalb der Fovea, dem Fleck des schärfsten Sehens liegen. Größere geschädigte Bereiche können hingegen zu Ausfällen im Sichtfeld führen. Schäden im Bereich der Fovea können das Farbsehen sowie das Scharfsehen stark beeinträchtigen. Im Zweifel können die Schäden bis hin zur völligen Erblindung reichen.³⁷

Inwieweit die optische Strahlung die Netzhaut schädigen kann, welche Normen es zu beachten gibt, wie die Grenzwerte lauten und wie diese zu ermitteln sind, wird im Folgenden betrachtet.

3.1. Photochemische Schädigung der Netzhaut

Die photochemische Gefährdung der Netzhaut ist auch unter den Begriffen Blaulichtgefährdung oder Blue-Light-Hazard (BLH) bekannt. Dieser Name basiert darauf, dass die schädigende Strahlung aus dem blauen und violetten Spektralbereich stammt,³⁸ wobei das Maximum bei 437nm liegt.³⁹ Der wissenschaftliche Fachbegriff für die photochemische Netzhautschädigung lautet Photoretinitis.⁴⁰

Die Energie von kurzwelligeren Photonen ist deutlich höher als die von langwelligeren Wellen, somit ist blaues Licht energiereicher als rotes Licht. Dadurch können photochemische Reaktionen hervorgerufen werden, welche innerhalb von maximal zwei Tagen zur Schädigung der Netzhaut beitragen können.⁴¹ Die Schädigung tritt im Allgemeinen eher bei längeren Bestrahlungsdauern über 10 Sekunden auf, wobei die bemerkbare Schädigung sich um mehr als zwölf Stunden verzögert.⁴²

Zu Beginn der photochemischen Reaktion wird ein Chromophor durch die Photonenenergie angeregt, wobei das Chromophor den lichtabsorbierenden Teil eines Moleküls darstellt. Dadurch kommt es zur chemischen Transformation des Chromophors und/oder zur Interaktion mit weiteren Molekülen. Während der Photonenanregung können die Chromophore freie Radikale und reaktive Sauerstoffspezies bilden. Diese werden als Photonensitizer bezeichnet. Auch Mitochondriale Atmungskettenenzyme sind in der Lage Licht im Bereich von 440 bis 450 nm zu absorbieren und reaktive Sauerstoffspezies zu bilden, welche toxisch sind. Diese können zu Lipid-Peroxidation, Protein-Peroxidation und Apoptose führen, was bedeutet, dass die Zellen geschädigt werden oder sogar absterben.⁴³

³⁷ (Udocičić 2013), S. 25

³⁸ (Weber 2015), S. 31

³⁹ (Christoph Schierz 2019), S. 50

⁴⁰ (Udocičić 2013), S. 26

⁴¹ (Weber 2015), S. 31

⁴² (Udocičić 2013), S. 26

⁴³ (Y. König 2020), S. 111

Schädigungen der Netzhaut des menschlichen Auges sind irreversibel und führen zu einem dauerhaften Sehverlust in dem beschädigten Bereich.⁴⁴ Entscheidend für die Schädigung ist die aufgenommene Dosis, wobei die Belastung sich aufakkumuliert. Je länger die Bestrahlungsdauer und je größer die Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte ist, desto größer ist die Belastung. Somit ist nicht nur ein einzelner Blick in die Quelle zu betrachten, sondern jeder Blick in Quellen über einen bestimmten Zeitraum.⁴⁵ Bei dem betrachteten Zeitraum wird von 10.000 s ausgegangen, in dem sich die Belastungen aufaddieren. Wird der Grenzwert innerhalb dieses Zeitraumes nicht überschritten, so gilt die Quelle auch für längere Bestrahlungsdauern als sicher. Während des Schlafes sind die Zellen in der Lage mögliche Schäden zu reparieren, wodurch die Belastung immer für einen Arbeitstag betrachtet werden kann.⁴⁶

3.2. Thermische Schädigung der Netzhaut

Thermische Netzhautschäden entstehen durch das Absorbieren von optischer Strahlung. Durch die Absorption der auftreffenden Strahlenleistung kommt es zu einer Temperaturerhöhung im Gewebe. Welche Auswirkungen diese haben, hängt von der Erhöhung ab.⁴⁷ Schäden treten ab einer Temperaturerhöhung von 10 °C – 20 °C auf.⁴⁸ Im Normalfall tritt die Schädigung direkt nach der Belastung oder spätestens wenige Minuten danach auf, der Schädigungsmechanismus tritt bei kurzen Bestrahlungsdauern von maximal 10 s ein.⁴⁹ Der Expositionsgrenzwert ist ab 10 s konstant, da bei längeren Expositionsdauern die Wirkung durch Augenbewegungen abgeschwächt wird. Entscheidend für die thermische Netzhautgefährdung sind die sichtbare optische Strahlung sowie die IR-Strahlung bis 1400 nm.

Da die Wärmeleitung des absorbierenden Gewebes eine wichtige Rolle spielt, kann dieselbe Bestrahlungsstärke unterschiedliche Temperaturerhöhungen hervorrufen, je nachdem, wie groß die bestrahlte Fläche ist. Bei einer großen Fläche dauert es länger, bis die Wärme abgeleitet werden kann im Vergleich zu einer kleineren Fläche⁵⁰

⁴⁴ (Weber 2015), S. 31

⁴⁵ (AUVA 2011), S. 9

⁴⁶ (Weber 2015), S. 14, S.16

⁴⁷ (AUVA 2011), S. 13

⁴⁸ (Udocičić 2013), S. 25

⁴⁹ (Weber 2015), S. 31

⁵⁰ (Udocičić 2013), S.43

4. Gesetzliche Regelungen künstlicher Strahlung

Zum Schutz vor den Gefahren durch künstliche optische Strahlung liegen internationale sowie nationale Richtlinien und Empfehlungen vor. Im Nachfolgenden wird auf die wichtigsten gesetzlichen Regelungen sowie aktuellen Empfehlungen für inkohärente künstlich optische Strahlung eingegangen.

4.1. Normen

Im April 2006 wurde die „Europäische Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch physikalische Einwirkung (künstliche optische Strahlung)“ verabschiedet.⁵¹ In dieser sind Mindestanforderungen für den Schutz von Arbeitnehmenden festgelegt, welche für künstlich optische Strahlung im Spektralbereich von 100 nm bis 1 mm gelten. Es wird sich sowohl auf inkohärente als auch kohärente (Laserstrahlung) optische Strahlung bezogen. Es wurden verbindliche Expositionsgrenzwerte festgelegt, um einen Schutz vor allen gesundheitlichen Auswirkungen durch optische Strahlung aus künstlichen Quellen für Beschäftigte zu bieten.⁵² Außerdem sind die Pflichten des Arbeitgebers bezüglich der Ermittlung und Bewertung sowie, falls erforderlich, einer Berechnung und/oder Messung der Gefahren der optischen Strahlung festgelegt.

Die EU-Richtlinie basiert auf veröffentlichten Leitlinien der Internationalen Kommission für den Schutz von nichtionisierender Strahlung (International Commission on non-ionizing radiation protection, ICNIRP).⁵³ Die ICNIRP ist eine internationale Vereinigung, die mit etablierten wissenschaftlichen Prinzipien Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu Auswirkungen durch nichtionisierende Strahlung auf den Menschen entwickeln. Sie wird weltweit von der Wissenschaft und Politik hoch angesehen und die ausgesprochenen Empfehlungen dienen häufig als Basis für Rechtsregelungen.⁵⁴

Im Jahr 2010 wurde die EU-Richtlinie 2006/25/EG in Deutschland mit der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstlich optische Strahlung (OStrV) in nationales Recht umgesetzt. Dabei ist die OStrV für jegliche Gefährdung durch künstliche optische Strahlung am Arbeitsplatz verbindlich. Nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes muss im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung vom Arbeitgeber festgestellt werden, ob die Beschäftigten am Arbeitsplatz optischer Strahlung aus künstlichen Quellen ausgesetzt sind. Falls dies der Fall ist, müssen ausgehende Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit beurteilt werden und gegebenenfalls Maßnahmen zum Schutz getroffen werden. Zu der OStrV wurden technische Regeln erarbeitet, um zu konkretisieren wie Gefährdungsbeurteilungen und Messungen von optischer Strahlung aus künstlichen Quellen stattfinden müssen und wie Schutzmaßnahmen aussehen können.⁵⁵

⁵¹ (Udocičić 2013), S. 37

⁵² (Weiskopf 2018), S. 25

⁵³ (Udocičić 2013), S. 37

⁵⁴ (Pepler 2019), S. 18

⁵⁵ (Weiskopf 2018), S. 26 f

Zum besseren Verständnis der Rechtsverordnung wurden Technische Regeln zur OStrV erarbeitet, die Technischen Regeln für inkohärente optische Strahlung aus künstlichen Quellen (TROS IOS) wurde im Jahr 2013 veröffentlicht. Die Regelungen sind in vier Teile aufgeteilt. Zunächst werden einige allgemeine Dinge zur Erklärung vorgestellt. Im ersten Teil geht es um die Beurteilung der Gefährdung durch inkohärente optische Strahlung, darauf folgt Teil zwei, in dem Verfahren zu Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung erklärt werden. Im letzten Teil werden Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung erläutert.⁵⁶

In der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 ist festgehalten, wie die Untersuchung von inkohärenten Breitbandstrahlungsquellen bezüglich der photobiologischen Gefahren stattzufinden hat. Es sind standardisierte Verfahren, Grenzwerte und Klassifizierungsmöglichkeiten festgelegt.⁵⁷ Die Norm gilt für alle elektrisch betriebenen, inkohärenten und optischen Breitbandstrahlungsquellen im Bereich von 200 nm bis 3000 nm. Früher wurden LED-Leuchtmittel in einer Laser-Norm mitbehandelt, mittlerweile gilt auch für LED's die DIN EN 62471.⁵⁸ Zudem gibt es seit 2014 die DIN IEC/TR 62778, die Hinweise zur Blaulichtgefährdung von weißen Lichtquellen in Abhängigkeit von Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur aufzeigt.⁵⁹

Im April 2024 wurde die DIN EN 62471-7 eingeführt, welche ein Zusatz zur DIN EN 62471 darstellt und sich mit elektrischen Lichtquellen und Leuchten beschäftigt, die zur Beleuchtung von Räumen, Gegenständen oder zur Signalisierung eingesetzt werden und überwiegend Strahlung im sichtbaren Spektralbereich emittieren.⁶⁰

4.2. Grenzwerte & Bewertungsfunktionen

Die Grenzwerte aus der Norm DIN EN 62471 sind so definiert, dass auch bei wiederholter Bestrahlung keine nachteilige Wirkung auf die Gesundheit auftritt. Die Grenzwerte können trotz allem nicht als präzise Grenzlinie zwischen sicherem und nicht sicherem Bestrahlungsniveau betrachtet werden, da jeder Mensch die Strahlung unterschiedlich aufnimmt.⁶¹ Zudem gelten die Grenzwerte nur für normal sensitive Personen, überdurchschnittlich photosensitive Menschen wie Kinder, Personen mit künstlichen Augenlinsen oder Netzhautschädigungen, sowie Personen, die unter bestimmten Medikamenten stehen, werden nicht mit abgebildet.⁶²

Wie auch die Helligkeitswahrnehmung vom menschlichen Auge ist die schädigende Wirkung von optischer Strahlung wellenlängenabhängig. Daher werden zur Gewichtung der Strahldichte Wirkungsfunktionen herangezogen. Im Bereich der photochemischen

⁵⁶ (Weiskopf 2018), S. 27 f

⁵⁷ (Pepler 2019), S. 63

⁵⁸ (Weiskopf 2018), S. 39

⁵⁹ (VBG 2020), S. 22

⁶⁰ (DIN e.V. 2024)

⁶¹ (Pepler 2019), S. 68

⁶² (Y. König 2020), S. 113

Netzhautgefährdung durch blaues Licht wird die Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ verwendet (siehe Abbildung 14). Für die thermische Netzhautgefährdung im nah-infraroten Bereich gilt nach DIN 62471 Wirkungsfunktion $R(\lambda)$ (siehe Abbildung 15). Die ICNIRP hat hingegen 2013 eine neue Wirkungsfunktion für den thermischen Bereich vorgestellt $R'(\lambda)$ (siehe Abbildung 16).

4.2.1. Photochemische Netzhautgefährdung

Zur Bewertung der photochemischen Gefährdung ist die effektive Strahldichte L_B zu ermitteln. Diese ist die spektral integrierte Strahldichte $L(\lambda)$ zwischen 300 nm und 700 nm, welche mit der spektralen Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ für photochemische Netzhautschädigungen bewertet wird.

$$L_B = \int_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} L_e(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (11)$$

L_B : Blaulichtgewichtete Strahldichte

$L_e(\lambda)$: Strahldichte

$B(\lambda)$: Blaulicht-Wirkungsfunktion

Die Grenzwerte für die photochemische Netzhautgefährdung sind zeitabhängig. Für Bestrahlungsdauern von $t > 10.000 \text{ s}$ gilt ein Grenzwert von $L_B \leq 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. Liegt eine Lampe unter diesem Grenzwert, so ergibt sich keine zeitliche Begrenzung der Expositionsdauer und aus Sicht der Blaulichtgefahr gilt die Lampe als sicher. Für Bestrahlungsdauern von $t \leq 10.000 \text{ s}$ ist ein Grenzwert von $L_B \leq 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ festgelegt. Liegt L_B über $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ lässt sich die maximal zulässige Bestrahlungsdauer wie folgt berechnen:

$$t_{max} = \frac{10^6}{L_B} \quad (12)$$

t_{max} : maximale Bestrahlungsdauer in s

L_B : Blaulichtgefahrgewichtete Strahldichte

4.2.2. Photochemische Netzhautgefährdung – Kleine Quelle

Lichtquellen, die einen kleineren Winkel als 11 mrad aufspannen, können als kleine Quelle anderes bewertet werden. Hierbei reicht es mit der spektralen Bestrahlungsstärke zu arbeiten, welche ebenfalls mit der Blaulichtgefährdungsfunktion bewertet werden muss.

$$E_B = \int_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E_e(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13)$$

E_B : Blaulichtgefahrgewichtete Beleuchtungsstärke

$E_e(\lambda)$: Bestrahlungsstärke

$B(\lambda)$: Blaulicht-Wirkungsfunktion

Auch hier sind die Grenzwerte zeitabhängig, für $t > 100 \text{ s}$ ist ein Grenzwert von $E_B \leq 0,01 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ festgelegt. Für $t \leq 100 \text{ s}$ gilt hingegen ein Grenzwert von $E_B \leq 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Wird eine Blaulichtgefahr-gewichtete Bestrahlungsstärke von $E_B = 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ überschritten, so ergibt sich die maximal zulässige Bestrahlungsdauer wie folgt:

$$t_{max} = \frac{100}{E_B} \quad (14)$$

t_{max} : maximale Bestrahlungsdauer in s

E_B : Blaulichtgefahr gewichtete Bestrahlungsstärke

Die Annahme, dass der Durchmesser der effektiv bestrahlten Netzhautfläche mit der Quadratwurzel der Zeit zunimmt, erklärt, dass die Zeiten unterschiedlich sind, an denen E_B beziehungsweise L_B unabhängig von den Bestrahlungsdauern werden. Aufgrund von Augenbewegungen wird davon ausgegangen, dass die effektive Bestrahlungsdauer auf der Netzhaut mit der Bestrahlungsdauer abnimmt. Daher wird die akkumulierte Bestrahlung bei 100 s oder 10.000 s unabhängig von der Bestrahlungsdauer.⁶³

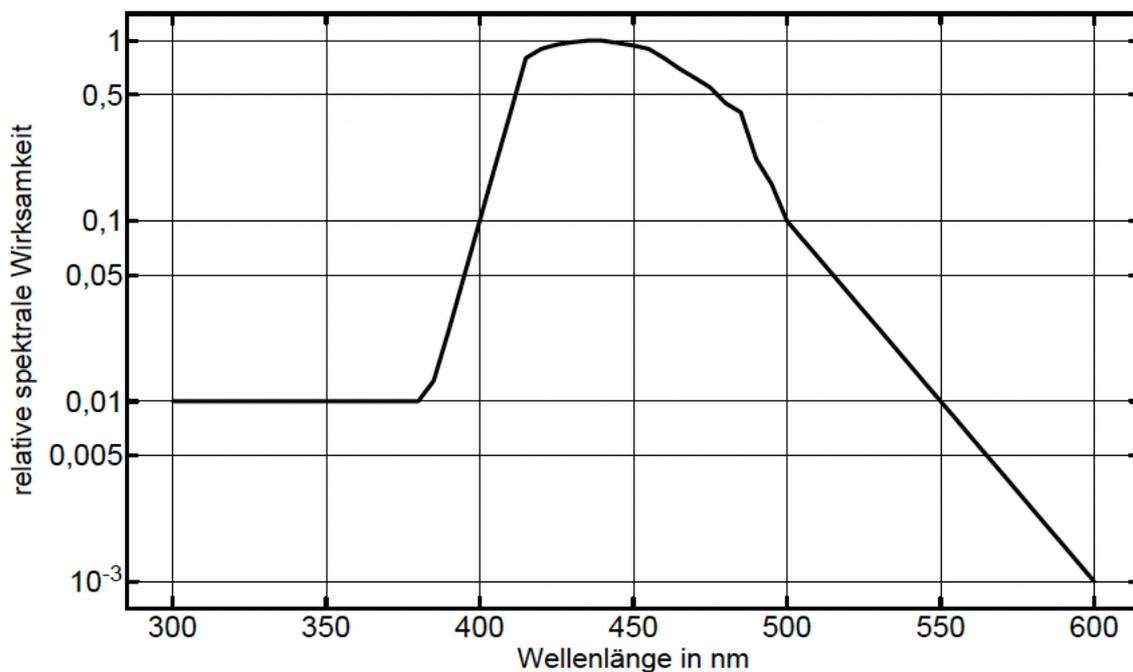


Abbildung 14: Spektrale Wirksamkeit zur photochemischen Netzhautgefährdung nach DIN 62471; Quelle: (Janßen 2016), S. 33

Die Gefährdungsfunktion $B(\lambda)$ der Blaulichtgefährdung ist in Abbildung 14 logarithmisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die spektrale Wirksamkeit nie auf null geht, jedoch im Bereich bis ca. 370 nm und ab 520 nm sehr gering ausfällt. Zudem ist ein Peak bei ungefähr 440 nm gut zu erkennen, bei dem die höchste Empfindlichkeit bezüglich der photochemischen Netzhautgefährdung liegt.

⁶³ (DIN e.V. 2004)

4.2.3. Thermische Netzhautgefährdung

Die thermische Gefährdung einer Schädigung der Netzhaut ergibt sich durch die integrierte spektrale Leuchtdichte $L(\lambda)$ im Bereich von 380 nm bis 1400 nm, welche mit der thermischen Gewichtungsfunktion $R(\lambda)$ gewichtet wurde.

$$L_R = \int_{380 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L_e(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (15)$$

L_R : thermisch gewichtete Strahldichte

$L_e(\lambda)$: Strahldichte

$R(\lambda)$: Verbrennungsgefahr-Wirkungsfunktion

Auch im thermischen Bereich sind die Grenzwerte zeitabhängig, für die unterschiedlichen Expositionszeiten ergeben sich unterschiedliche Grenzwerte. Weiterhin sind sie abhängig von dem Quellwinkel, also der Winkelausdehnung α der Quelle.

Expositionsauern 10 μ s bis 10 s:

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{für } 10 \mu s < t < 10s \quad (16)$$

Expositionsauern über 10 s:

$$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{für } t \geq 10 s \quad (17)$$

Expositionsauern unter 10 μ s:

$$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{für } t \leq 10 \mu s \quad (18)$$

C_α ist dabei ein Korrekturfaktor, welcher die Winkelausdehnung α der Quelle berücksichtigt. Dieser beeinflusst die Temperaturerhöhung der Netzhaut und es gilt:

$$C_\alpha = \begin{cases} 1,7 & \text{für } \alpha < 1,7 \text{ mrad} \\ \alpha & \text{für } 1,7 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad} \\ 100 & \text{für } \alpha > 100 \text{ mrad} \end{cases} \quad (19)$$

4.2.4. Thermische Netzhautgefährdung – schwacher visueller Reiz

Zudem gibt es noch die thermische Gefährdung der Netzhaut durch schwache visuelle Reize. Ein schwacher Reiz ist definiert als Reiz, bei dem die maximale Leuchtdichte 10 cd / m^2 beträgt, bei einem Empfangs-/ Messwinkel von 11 mrad. Der visuelle Reiz ist so gering, dass keine Abwendungsreaktion hervorgerufen wird. Schwache visuelle Reize werden über die effektiven Strahldichten im Bereich von 780 nm bis 1400 nm definiert.

$$L_R = \int_{780 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L_e(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (20)$$

Wie auch die normale thermische Netzhautgefährdung ist die thermische Netzhautgefährdung durch schwache visuelle Reize abhängig von der Expositionsdauer und dem Quellwinkel.

Expositionsauern 10 μ s bis 10 s:

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{für } 10 \mu s < t < 10s \quad (21)$$

Expositionsdauern über 10 s:

$$L_R = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{für } t \geq 10 \text{ s} \quad (22)$$

Expositionsdauern unter 10 μ s:

$$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad \text{für } t \leq 10 \mu s \quad (23)$$

Auch hier beschreibt C_α einen Korrekturfaktor, welcher die Winkelausdehnung α der Quelle berücksichtigt und somit die Temperaturerhöhung der Netzhaut beeinflusst, es gilt:

$$C_\alpha = \begin{cases} 11 & \text{für } \alpha < 11 \text{ mrad} \\ \alpha & \text{für } 11 \text{ mrad} \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad} \\ 100 & \text{für } \alpha > 100 \text{ mrad} \end{cases} \quad {}^{64} \quad (24)$$

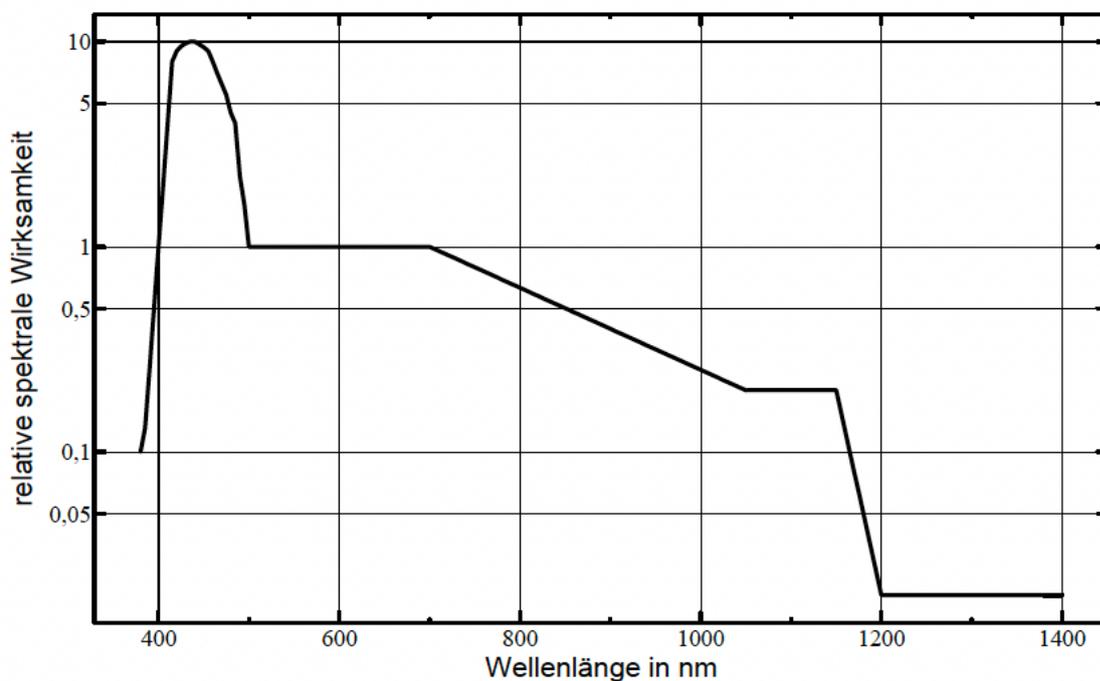


Abbildung 15: Spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautgefährdung nach DIN 62471; Quelle: (Janßen 2016), S. 33

Die Gefährdungsfunktion $R(\lambda)$ der thermischen Netzhautgefährdung nach DIN EN 62471 ist in Abbildung 15 logarithmisch dargestellt. Der Peak liegt hier bei ca. 450 nm mit einem Wert von zehn und somit um ein Vielfaches höher als bei der Blaulichtgefährdung. Zudem liegt der Wert zwischen 500 nm und 700 nm auf dem Wert eins und somit ebenfalls deutlich höher im Vergleich zur spektralen Wirksamkeit der photochemischen Netzhautgefährdung.

⁶⁴ (Udocičić 2013), S. 43 - 46

4.2.5. ICNIRP-Empfehlung thermische Netzhautgefährdung

Die ICNIRP hat 2013 eine Empfehlung für neue Richtlinien zum Umgang mit inkohärenten optischen Quellen vorgelegt. Dies betrifft unter anderem den Bereich der thermischen Netzhautgefährdung. Aktuell besteht noch das Problem, dass unklar ist, ob und wenn ja wann eine Anpassung an der DIN 62471 vorgenommen werden könnte, um die Empfehlungen in dieser mit einzubauen.

Es wird empfohlen die Grenzwerte für Impulsdauern $\leq 0,25$ s um den Faktor 2,5 zu verringern.

Weiterhin sollte die Quellgröße für große Quellen nicht mehr konstant mit 100 mrad angenommen werden, sondern es sollte folgendes für unterschiedliche Expositionszeiten gelten:

$$\begin{array}{lll} a_{max} = 100 \text{ mrad} & \text{für} & t \geq 0,25 \text{ s} \\ a_{max} = 0,2 \cdot t^{0,5} & \text{für} & 0,25 \text{ s} > t \geq 625 \mu\text{s} \\ a_{max} = 5 \text{ mrad} & \text{für} & t < 625 \mu\text{s} \end{array}$$

Außerdem wurde die Gewichtungsfunktion $R(\lambda)$ angepasst. Im Bereich von 385 nm bis 440 nm wurde der Wert aus der DIN 62471 mit dem Faktor 0,1 multipliziert und zwischen 445 nm und 495 nm auf den Wert eins gesetzt.⁶⁵

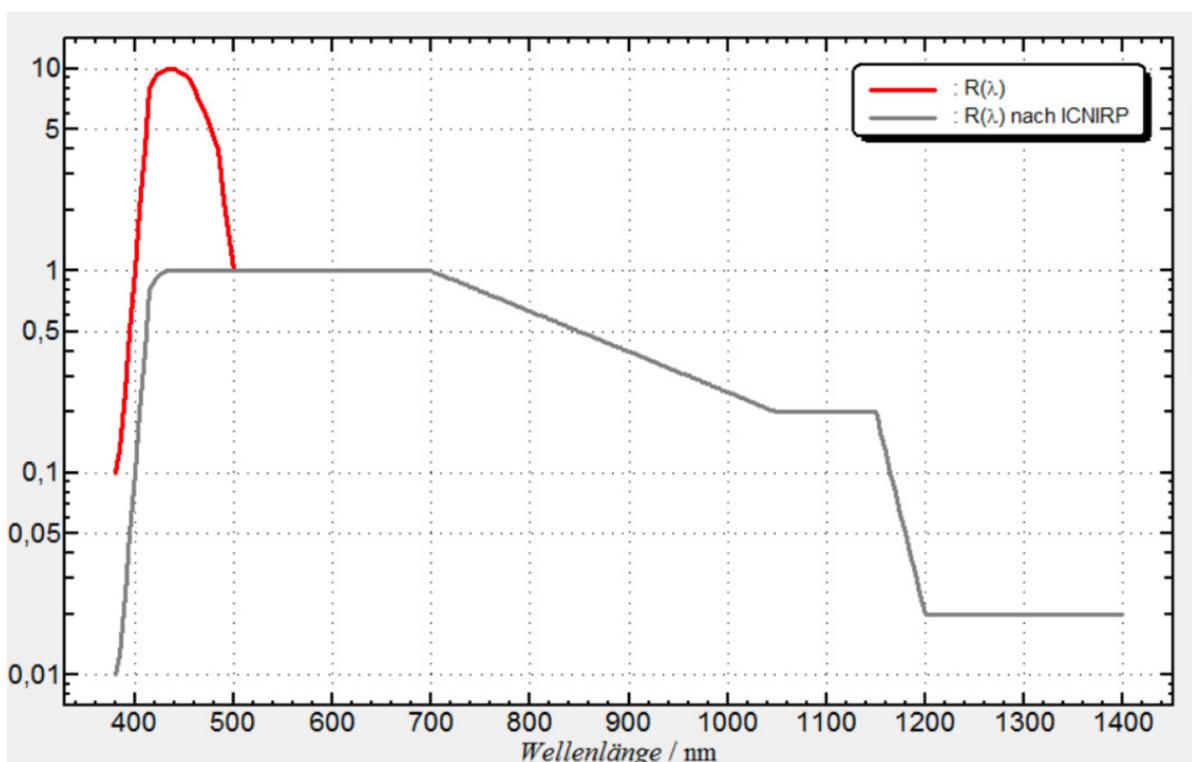


Abbildung 16: Vergleich der Gewichtungsfunktionen der thermischen Netzhautgefährdung; Quelle: (Weiskopf 2018), S. 12

⁶⁵ (Reidenbach 2018), S. 55 f

In Abbildung 16 ist dargestellt, inwieweit sich die spektrale Gewichtungsfunktion für thermische Netzhautgefährdung $R(\lambda)$ durch die Empfehlung der ICNIRP von 2013 verändert hat. Während die rote Kurve die Gewichtungsfunktion nach DIN 62471 abbildet, zeigt die graue Kurve die Empfehlung der ICNIRP. In Tabelle 19: Spektrale Gewichtungsfunktion für Netzhautschädigungen; Quelle: (Weiskopf 2018), S. 13 (Anhang 10.1) sind die spektralen Werte für die unterschiedlichen Gewichtungsfunktionen noch einmal zusammengefasst dargestellt.

Durch die Änderung der Gewichtungsfunktion $R(\lambda)$ und der anderen beschriebenen Aspekte, könnten sich, falls diese einmal in die Norm aufgenommen werden sollte, Änderungen bei Bewertungen von Lampen ergeben.

4.3. Risikogruppenklassifizierung

Die Norm DIN EN 62471 bietet ein Klassifizierungsschema für Hersteller, welches Lampen und Leuchten mit einschließt. Je nachdem wie hoch die von der Quelle ausgehende Gefahr ist, werden diese in vier Risikogruppen eingeteilt.⁶⁶ Die Hersteller erfüllen durch die Zuordnung in eine Risikogruppe ihre gesetzliche Pflicht zur Information des Benutzenden über die potenzielle Gefährdung. Dabei gibt die Risikogruppe an, wie lange man der optischen Strahlung einer Lampe ausgesetzt sein darf, ohne dass es zu einer Überschreitung des Emissionsgrenzwertes der entsprechenden Risikogruppe kommt. Die Risikogruppen steigen an, je schneller der Emissionsgrenzwert überschritten wird.⁶⁷ Zudem müssen Leuchten der Risikogruppe 2 und 3 sowohl am Gerät selbst als auch in der Bedienungsanleitung gekennzeichnet werden. Weiterhin müssen Kennzeichnungen zu Mindestabständen und maximalen Expositionszeiten vom Hersteller angegeben werden.⁶⁸



Abbildung 17: Zeichen für "Warnung vor optischer Strahlung" für RG 2 und 3 Geräte; Quelle: (VBG 2020), S. 8

⁶⁶ (Weber 2015), S. 98

⁶⁷ (Udocičić 2013), S. 53

⁶⁸ (VBG 2020), S. 8

Tabelle 1: Risikogruppen gemäß DIN EN 62471; Quelle: (Udocičić 2013), S. 54

Risikogruppe	Mögliche Gefahr	Beschreibung
Freie Gruppe (RG 0)	Kein Risiko	Diese Lampen stellen keine photobiologische Gefährdung dar, auch nicht bei kontinuierlicher, lang andauernder Exposition im Referenzabstand – sie sind unter allen Umständen sicher.
RG 1	Geringes Risiko	Diese Lampen stellen unter Berücksichtigung normalen menschlichen Verhaltens keine Gefährdung dar. In Bezug auf die Augen sind diese Lampen sicher, außer bei einer sehr lang andauernden Betrachtung im Referenzabstand mit direkter Augenexposition.
RG 2	Mittleres Risiko	Die Sicherheit dieser Lampen in Bezug auf die Augen basiert auf Abwendungsreaktionen; sie stellen keine photobiologische Gefährdung dar, solange Abwendungsreaktionen die Expositionsdauer begrenzen.
RG 3	Hohes Risiko	Diese Lampen sind auch bei kurzzeitiger Exposition im Referenzabstand gefährlich.

In der Norm sind den einzelnen Risikogruppen maximale Expositionsdauern zugeordnet, die je nach Art der photobiologischen Gefährdung unterschiedlich ausfallen. Aus den Zeiten und den allgemeinen Expositionsgrenzwerten wurden daraufhin Emissionsgrenzwerte für die einzelnen Risikogruppen kalkuliert.⁶⁹

⁶⁹ (Udocičić 2013), S. 54

In Tabelle 2 sind die Expositionsdauern sowie die Emissionsgrenzwerte für die entsprechenden Risikogruppen zusammengefasst.

Tabelle 2: Einteilung in Risikogruppen nach DIN EN 62471; Quelle: (Scholl 2022), S. 68

Gefährdung	Emissionsgrenzwert/ Expositionsdauer	RG 0	RG 1	RG 2	RG 3
Photochemische Netzhautschädigung	Grenzwert: L_B	< 100	10 000	4 000 000	> 4 000 000
	Expositionsdauer: t	> 10 000	100	0,25	< 0,25
Photochemische Netzhautgefährdung – kleine Quelle	Grenzwert: E_B	< 1	1	4	> 4
	Expositionsdauer: t	> 10 000	100	0,25	< 0,25
Thermische Netzhautgefährdung	Grenzwert: L_R	$< \frac{28\,000\,000}{\alpha}$	$\frac{28\,000\,000}{\alpha}$	$\frac{71\,000\,000}{\alpha}$	$> \frac{71\,000\,000}{\alpha}$
	Expositionsdauer: t	10	10	0,25	< 0,25

Kritisiert werden an der Risikogruppenklassifizierung nach der DIN EN 62471 zum einen, dass der Messabstand zur Klassifizierung einer Quelle nur 20 cm betragen sollte. Im Bühnen- und Studiobereich treten so geringe Abstände in der Praxis quasi nie auf, dadurch werden Geräte gefährlicher bewertet als eigentlich notwendig.⁷⁰ Diesem Kritikpunkt wird mit der im übernächsten Punkt vorgestellten Norm DIN EN 62471-7 entgegengewirkt. Ein anderer Kritikpunkt setzt bei Risikogruppe 2 an, diese basiert auf natürlichen Abwehrreaktionen von hellen Lichtquellen oder thermischen Unbehagen, um den Körper zu schützen.⁷¹ Insbesondere der Lidschlussreflex wird als Abwehrreaktion hervorgerufen. Die Abwehrreaktion sollte innerhalb von 0,25 s stattfinden, Studien haben jedoch gezeigt, dass lediglich 23 % der Untersuchten innerhalb von 0,25 s einen Lidschlussreflex hatten, sondern 2 s – 4 s für eine Abwehrreaktion benötigt wird. Hinzu kommt, dass auch Medikamente, Drogen oder Krankheiten zur Verzögerung des Lidschlussreflexes führen können.⁷²

⁷⁰ (Weber 2015), S. 99

⁷¹ (DIN e.V. 2004)

⁷² (Udocičić 2013), S. 55

4.4. DIN IEC/TR 62778

In der DIN IEC/TR 62778 aus dem Jahr 2014 werden erläuternde Hinweise zur Beurteilung der Blaulichtgefährdung geliefert. Dabei sind alle Beleuchtungsprodukte mit beinhaltet, deren Hauptstrahlung im sichtbaren Spektrum liegen. In der Norm wird sich intensiv mit dem Zusammenhang zwischen der Farbtemperatur und der Leuchtdichte/ Beleuchtungsstärke auseinandergesetzt. Entscheidend ob mit der Beleuchtungsstärke oder der Leuchtdichte gearbeitet werden muss, ist weiterhin die Größe der Quelle.

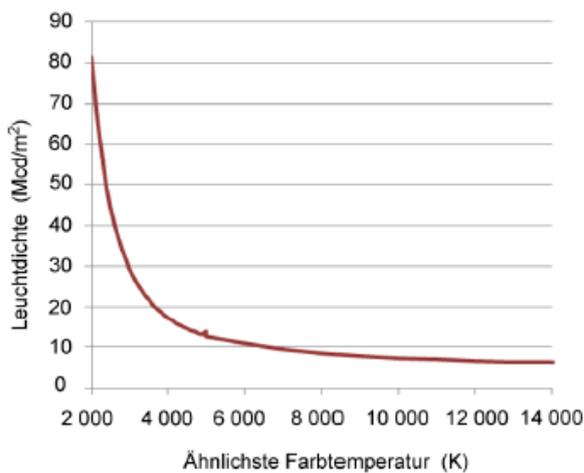


Abbildung 18: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 in Abhängigkeit von Farbtemperatur und Leuchtdichte; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 14

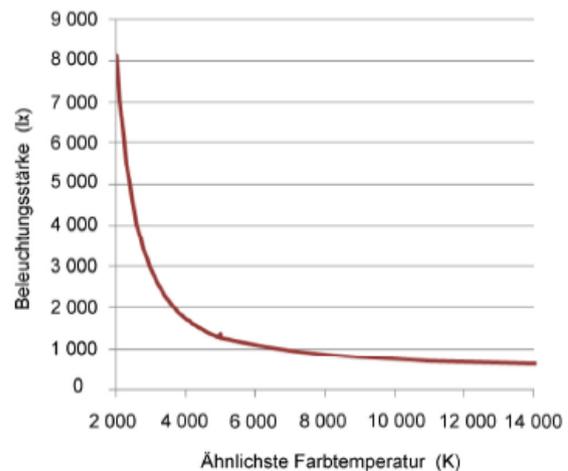


Abbildung 19: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 in Abhängigkeit von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 15

Die Roten-Linien in Abbildung 18 und 19 beschreiben somit die Grenze zwischen den Risikogruppen 1 und 2.

Daraus lässt sich schließen, dass sowohl die Leuchtdichte der Lichtquelle als auch die Beleuchtungsstärke an der Position der betrachtenden Person über dem Grenzwert liegen müssen, um eine Klassifizierung zur RG2 zu erreichen. Dies liegt daran, dass unterhalb der Grenze von $E_B = 1 \frac{W}{m^2}$ die maximale Expositionsdauer t_{max} niemals unter 100 s sein kann und somit nur RG1 klassifiziert werden kann. Die Leuchtdichte ist innerhalb des Bereichs der Großen Quelle unabhängig vom Sehabstand, wenn $L_B < 10\,000 \frac{W}{m^2 sr}$ ist, wird $t_{max} > 100s$ sein. Auch als kleine Quelle kann die maximale Expositionsdauer t_{max} nur ansteigen, solange die Quelle am gemessenen Punkt den Grenzwert nicht übersteigt und kann nicht in RG2 klassifiziert werden, unabhängig davon, in welchem Abstand gemessen wurde.

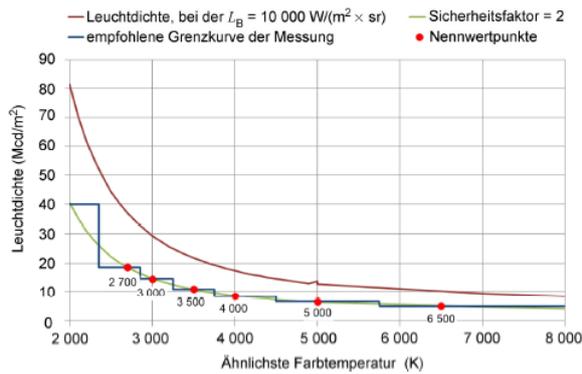


Abbildung 20: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 mit Sicherheitsfaktor und Nennwertpunkten in Abhängigkeiten von Leuchtdichte und Farbtemperatur; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 27

Tabelle 3: Leuchtdichtewerte, die eine Risikogruppe nicht größer als RG1 ergeben; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 27

CCT Bemessungswert	Leuchtdichte L (Mcd/m ²)
$CCT \leq 2\,350\text{ K}$	40
$2\,350\text{ K} < CCT \leq 2\,850\text{ K}$	18,5
$2\,850\text{ K} < CCT \leq 3\,250\text{ K}$	14,5
$3\,250\text{ K} < CCT \leq 3\,750\text{ K}$	11
$3\,750\text{ K} < CCT \leq 4\,500\text{ K}$	8,5
$4\,500\text{ K} < CCT \leq 5\,750\text{ K}$	6,5
$5\,750\text{ K} < CCT \leq 8\,000\text{ K}$	5

Die Bemessungsdaten des Herstellers für CCT und Leuchtdichte können als Grundlage für diese Beurteilung verwendet werden.

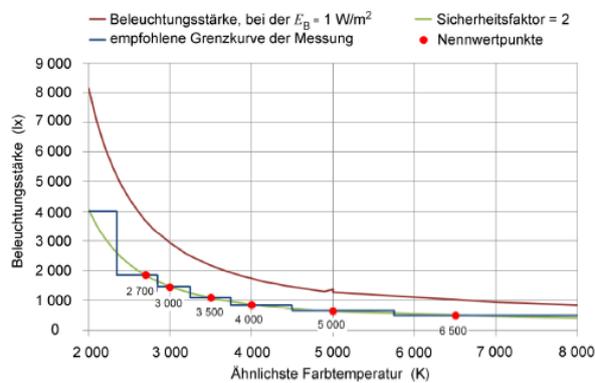


Abbildung 21: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 mit Sicherheitsfaktor und Nennwertpunkten in Abhängigkeiten von Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 28

Tabelle 4: Beleuchtungsstärkewerte, die eine Risikogruppe nicht größer als RG1 ergeben; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 28

CCT Bemessungswert	Beleuchtungsstärke E (lx)
$CCT \leq 2\,350\text{ K}$	4 000
$2\,350\text{ K} < CCT \leq 2\,850\text{ K}$	1 850
$2\,850\text{ K} < CCT \leq 3\,250\text{ K}$	1 450
$3\,250\text{ K} < CCT \leq 3\,750\text{ K}$	1 100
$3\,750\text{ K} < CCT \leq 4\,500\text{ K}$	850
$4\,500\text{ K} < CCT \leq 5\,750\text{ K}$	650
$5\,750\text{ K} < CCT \leq 8\,000\text{ K}$	500

Zu den Erkenntnissen, wurde ein Sicherheitsfaktor hinzugefügt. Zudem wurde die Farbtemperatur in bestimmte Bereiche eingeteilt, um eine bessere Übersicht zu erhalten. Die Werte in den Tabellen 3 und 4 dienen als obere Grenze, an der keine Messungen notwendig sind, da die Lichtquelle oder Leuchte niemals höher als RG1 eingestuft werden würde.⁷³

⁷³ (DIN e.V. 2014)

4.5. DIN EN IEC 62471-7

Im April 2024 wurde eine Erweiterung zur DIN EN 62471 herausgegeben mit dem Titel: „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen – Teil 7: Lichtquellen und Leuchten, die hauptsächlich sichtbare Strahlung aussenden“. Das Dokument führt ein neues Bewertungssystem ein, um unterschiedliche Beleuchtungsanwendungen zu berücksichtigen, die für verschiedene Zwecke angedacht sind.

Zur Bewertung der Blaulichtgefährdung von Leuchten sind nun unterschiedliche Bewertungsabstände vorgegeben, je nachdem für welchen Anwendungszweck die Leuchte vorgesehen ist. Im Bereich der Blaulichtgefährdung wurden Lampen in vier Gruppen eingeteilt. Bei der Gruppe für Bühnen- und Studiobeleuchtung, handelt es sich um die Gruppe BLH-C. Für diese Gruppe wird ein Bewertungsabstand von 1000 mm vorgegeben, somit sollte eine Messung im Abstand von 1m für Bühnen- und Studiobeleuchtung durchgeführt werden. In der Gruppe BLH-C wird davon ausgegangen, dass nur kurze unbeabsichtigte Blicke genau in die Quelle geworfen werden, daher gilt die Zeitklasse von $0,25 \text{ s} < t \leq 10 \text{ s}$ mit einem Emissionsgrenzwert für L_B von $4\,000\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}}$.

Die thermische Netzhautgefährdung muss nur dann berücksichtigt werden, wenn bei Weißlichtquellen die blaulichtgewichtete Strahldichte L_B einen Wert von $100\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}}$ übersteigt. Bei allen anderen Lichtquellen gilt ein Wert von $280\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}}$ für L_B , wird dieser nicht überschritten, braucht keine Bewertung stattfinden. Wenn der Wert von $100\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}}$ beziehungsweise $280\,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}}$ überschritten wird, ist eine Messung im Abstand von 1 000 mm mit einem Messwinkel γ von 11 mrad notwendig.⁷⁴

⁷⁴ (DIN e.V. 2024)

5. Messverfahren

In der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 wird ein standardisiertes Messverfahren für die Bewertung von möglichen Gefährdungen vorgegeben, welches für verschiedene Lampen und Lampensysteme angewendet werden kann. Die Messungen sind recht kompliziert, da es sich nicht um Punktquellen, sondern ausgedehnte Quellen handelt. Zudem können diese noch durch Projektionsoptiken verändert sein.⁷⁵

Generell wird bei den Messverfahren der Bestrahlungsstärke und Strahldichte zwischen integrierenden und spektralen Verfahren unterschieden. Dabei bietet das spektrale Verfahren die höchsten Messgenauigkeiten. Dafür sind integrierende Messungen leichter durchzuführen.⁷⁶

Die DIN EN 62471 empfiehlt Messungen zur Beurteilung der photobiologischen Sicherheit von Quellen inkohärenter optischer Strahlung mit einem Doppelmonochromator durchzuführen.⁷⁷

5.1. Messung der Bestrahlungsstärke

Die Messung der Bestrahlungsstärke kann zur Beurteilung von folgenden photobiologischen Gefährdungen genutzt werden:

- Gefährdung der Augen im UV-A-Bereich
- photochemische Netzhautgefährdung – kleine Quelle
- IR-Gefährdung der Augen

Für Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke muss eine Eingangsoptik verwendet werden, die das Lambertsche Kosinusgesetz erfüllt, welches eine Kosinus-Eingangsoptik oder Ulbricht-Kugel leisten kann.

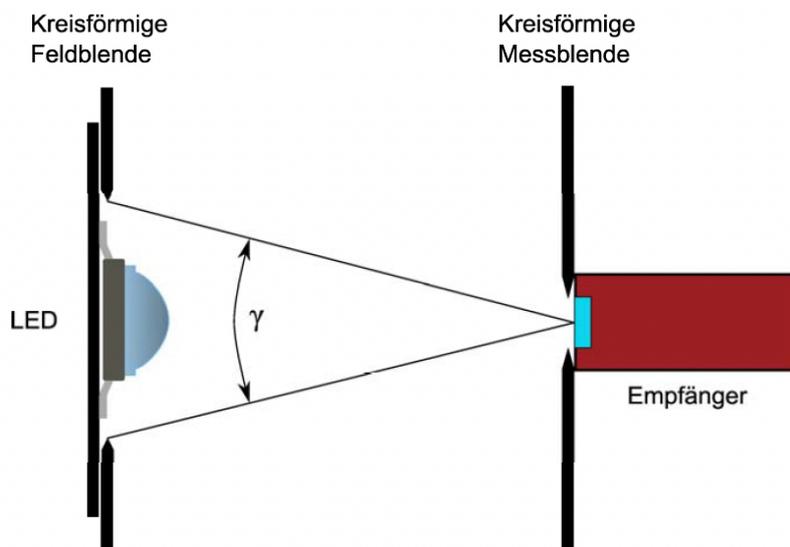


Abbildung 22: Messprinzip Messung der spektralen Bestrahlungsstärke; Quelle: (Udocičić 2013), S. 58

⁷⁵ (Udocičić 2013), S. 55

⁷⁶ (Weber 2015), S. 46

⁷⁷ (Udocičić 2013), S. 64

Die vorliegende Darstellung beschreibt den schematischen Aufbau einer spektralen Bestrahlungsstärkemessung. Für Quellen, die eine räumlich homogene Bestrahlungsstärke erzeugen, ist eine Messblende mit 25 mm Durchmesser üblich. Bei inhomogenen Quellen hingegen 7 mm, um hot spots besser lokalisieren zu können. Durch Verwendung von zu großen Eingangsoptiken könnte es zu einer Unterbewertung der Gefahr führen.

Die Feldblende zur Beurteilung der photochemischen Netzhautgefährdung für kleine Quellen sollte einen Messöffnungswinkel von 11 mrad besitzen.⁷⁸

Auch integrierende Detektoren sollten eine Eingangsoptik besitzen, die dem Lambertschen Kosinusetz entsprechen. Dies kann beispielsweise durch Diffusorscheiben aus PTFE geschehen. Die Wirkungsfunktion wird bei integrierenden Geräten durch Filter realisiert, welche die Wirkungsfunktion möglichst gut nachahmen sollten. Dies kann in der Praxis jedoch nur teilweise realisiert werden, wodurch sich erhöhte Messungenauigkeiten im Vergleich zu den spektralen Messungen ergeben.⁷⁹

5.2. Messung der Strahldichte

Messungen der Strahldichte können zur Beurteilung von folgenden Gefährdungen genutzt werden:

- photochemische Netzhautgefährdung
- thermische Netzhautgefährdung
- thermische Netzhautgefährdung – schwacher visueller Reiz

5.2.1. Grundlegendes zur Strahldichtemessung

Die Größe der bestrahlten Netzhautfläche spielt eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Netzhautschäden. Die kleinstmögliche Abbildung auf der Netzhaut einer punktförmigen Quelle liegt aufgrund physikalischer Einschränkungen bei 1,7 mrad. Wie bereits im Grundlagenteil kurz erwähnt, ist die Fixation des Auges sehr kurz, genauer gesagt zwischen 150 ms und 400 ms. Zwischen den Fixationen gibt es die sprungartigen Sakkaden mit Winkeln zwischen 1° und 5°, welche zwei- bis dreimal pro Sekunde stattfinden. Diese automatischen Augenbewegungen führen dazu, dass die Strahlung einer Quelle innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes über eine größere Netzhautfläche verteilt wird. Dies führt zu einer kleineren effektiven Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut und somit zu einem geringeren Risiko für eine Netzhautschädigung. Das Bild einer punktförmigen Quelle bedeckt nach einer Expositionsdauer von 10 s eine Fläche, die einem Winkel von 11 mrad auf der Netzhaut entspricht.

Nach spätestens 100 s ist es nicht mehr möglich auf einen Punkt zu starren, was zu einer weiteren Verteilung der Strahlungsleistung über die Netzhaut führt. Der Durchmesser der bestrahlten Netzhautfläche nimmt dabei mit der Quadratwurzel der Zeit zu. Nach 10 000 s belegt das verschmierte Abbild eine Fläche auf der Netzhaut, die einem Winkel von ca. 100 mrad entspricht.

⁷⁸ (Weiskopf 2018), S.52

⁷⁹ (Weber 2015), S.46

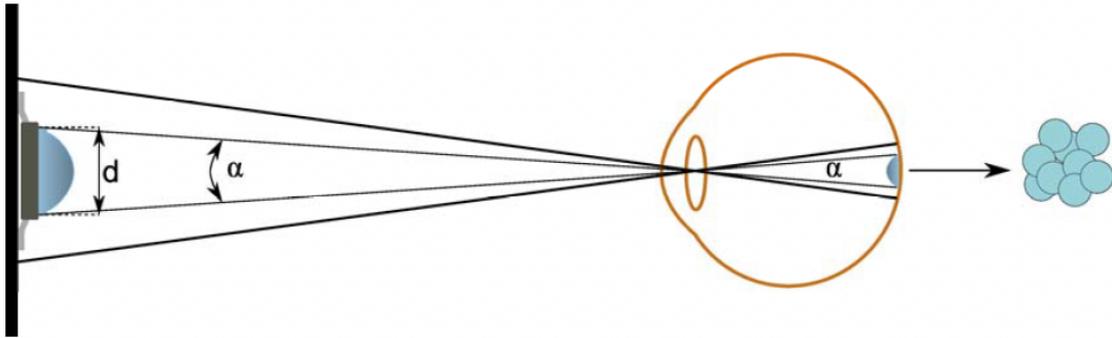


Abbildung 23: Effekt des „Versmierens“ der Abbildung einer Quelle; Quelle: (Udocičić 2013), S. 59

Der Effekt des verminderten Risikos durch natürliche Augenbewegungen wird in den Regelungen zur optischen Strahlungssicherheit berücksichtigt. Für längere Expositionsdauern ist ein größerer Empfangswinkel γ vorgegeben, daher gilt folgendes:

- 1,7 mrad für $0,25 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$
- 11 mrad für $10 \text{ s} \leq t < 100 \text{ s}$
- 100 mrad für $100 \text{ s} \leq t < 10\,000 \text{ s}$

Oberhalb von 10 000 s ist der Empfangswinkel für die Blaulichtgefährdung unabhängig von der Zeit.

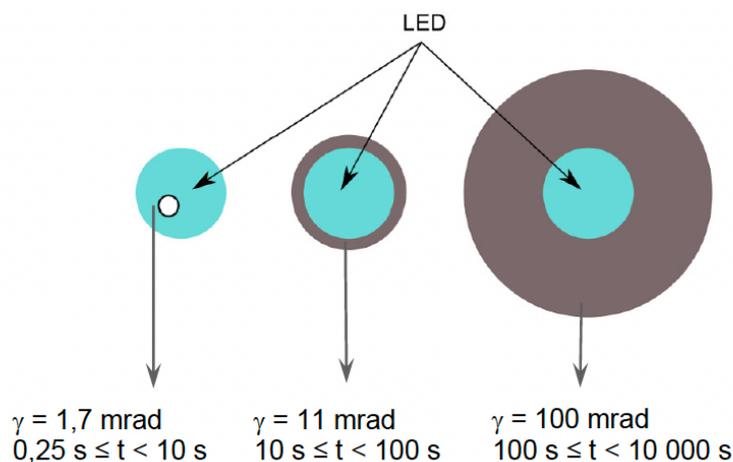


Abbildung 24: Unterschiedliche Empfangswinkel für unterschiedliche Expositionsdauern, weiß/ grau = Blickfläche, hellblau = LED; Quelle: (Udocičić 2013), S. 60

Der Empfangswinkel γ ist unabhängig von der Winkelausdehnung der Quelle α . Bei Quellen, deren Winkelausdehnung α kleiner ist als der Empfangswinkel γ , wird sich bei Messungen die gemittelte Strahldichte ergeben, welche kleiner als die tatsächlich physikalische Strahldichte der Quelle ausfällt. Der gemittelte Wert sollte mit dem entsprechenden Emissionsgrenzwert verglichen werden, da ansonsten eine Überbewertung stattfinden kann. Bei Quellen, die einen größeren Winkel α als 100 mrad aufspannen, sind die Messergebnisse unabhängig vom angewandten Empfangswinkel, da die Empfangswinkel nur Flächen innerhalb der von der Quelle aufgespannten Fläche abdecken.⁸⁰

⁸⁰ (Weiskopf 2018), S. 53 ff

Tabelle 5: Empfangswinkel zur Messung der Strahldichte bei der Beurteilung von Netzhautgefährdungen; Quelle: (Udocičić 2013), S. 61

Photobiologische Gefährdung	Expositionsdauer t	Empfangswinkel γ / mrad
Photochemische Netzhautgefährdung	$0,25 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$	1,7
	$10 \text{ s} \leq t < 100 \text{ s}$	11
	$100 \text{ s} \leq t < 10\,000 \text{ s}$	100
Thermische Netzhautgefährdung	$0,25 \text{ s} \leq t < 10 \text{ s}$	1,7
	$10 \text{ s} \leq t < 100 \text{ s}$	11
Thermische Netzhautgefährdung – schwacher visueller Reiz	$t > 10 \text{ s}$	11

5.2.2. Standardmethode

Bei der Standardmethode wird die optische Quelle mit Hilfe eines optischen Systems auf einem Detektor bzw. einer kreisförmigen Feldblende abgebildet. Die Feldblende realisiert den Empfangswinkel γ . Hinzu kommt eine kreisförmige Messblende, die als Pupille des Auges fungiert.⁸¹

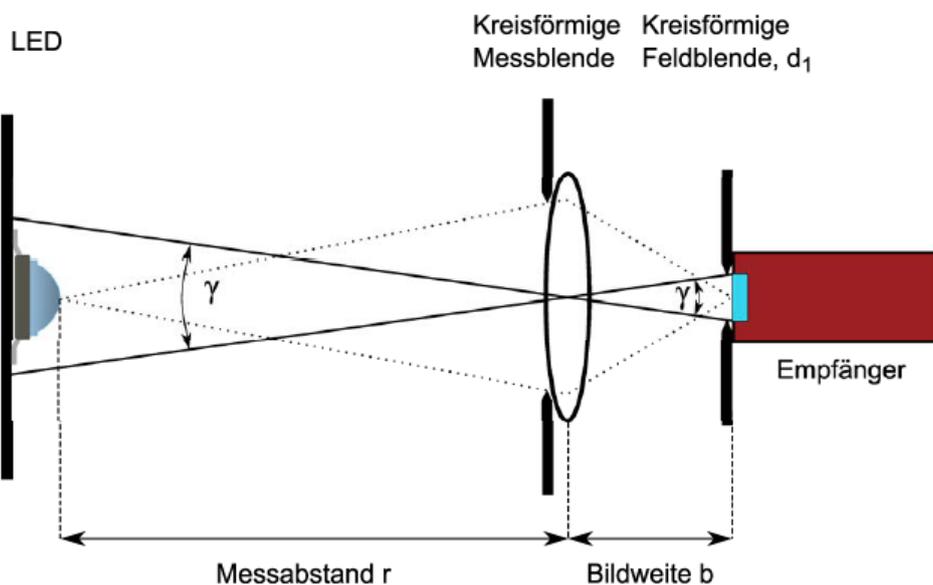


Abbildung 25: Messprinzip der Strahldichtemessung nach der Standardmethode; Quelle: (Udocičić 2013), S. 62

⁸¹ (Udocičić 2013), S. 61

5.2.3. Alternative Methode

Es handelt sich bei der alternativen Methode um eine Bestrahlungsstärkemessung mit definiertem Empfangswinkel γ . Um jedoch wie gewünscht einen Strahldichtemesswert zu erhalten, wird der Bestrahlungsstärkemesswert durch den Raumwinkel dividiert. Zur Anwendung dieser Methode sollte es möglich sein eine kreisförmige Feldblende dicht an die Quelle zu platzieren, um den Messempfangswinkel γ realisiert zu bekommen.

Es ergibt sich daraus:

$$\gamma = \frac{d_2}{r} \quad (25)$$

γ : Empfangswinkel

d_2 : Durchmesser Feldblende

r: Messabstand

Die Beziehung zwischen der Bestrahlungsstärke E_e und der Strahldichte L_e einer Quelle ist gegeben durch:

$$E_e = L_e \cdot \Omega \quad (26)$$

E_e : Bestrahlungsstärke

L_e : Strahldichte

Ω : Raumwinkel

Für kleine kreisförmige Quellen besteht folgende Beziehung zwischen dem Raumwinkel Ω und dem Empfangswinkel γ :

$$\Omega = \frac{\pi \cdot \gamma^2}{4} \quad (27)$$

Ω : Raumwinkel

γ : Empfangswinkel

Anhand dieser Formeln ergibt sich folgende Beziehung zwischen der Bestrahlungsstärke E_e und der benötigten Strahldichte L_e :

$$L_e = E_e \cdot \frac{4}{\pi \cdot \gamma^2} \quad (28)$$

L_e : Strahldichte

E_e : Bestrahlungsstärke

γ : Empfangswinkel

Mit Hilfe der Formel wird aufgezeigt, dass bei einem Empfangswinkel $\gamma = 11 \text{ mrad}$ der Faktor zwischen E_e und L_e bei ca. 10 000 liegt. Die Expositionsgrenzwerte der Bestrahlungsstärke für photochemische Netzhautgefährdung für kleine Quellen wurden abgeleitet, indem der Strahldichte Expositionsgrenzwert durch den Faktor dividiert wurde.⁸²

⁸² (Weiskopf 2018), S. 57 f

Zwischen der Strahldichte L_B und der Bestrahlungsstärke E_B gilt dieselbe Verbindung, da beide gleich gewichtet sind, somit gilt:

$$L_B = E_B \cdot \frac{4}{\pi \cdot \gamma^2} \quad (29)$$

L_B : Blaulichtgewichtete Strahldichte

E_B : Bestrahlungsstärke

γ : Empfangswinkel

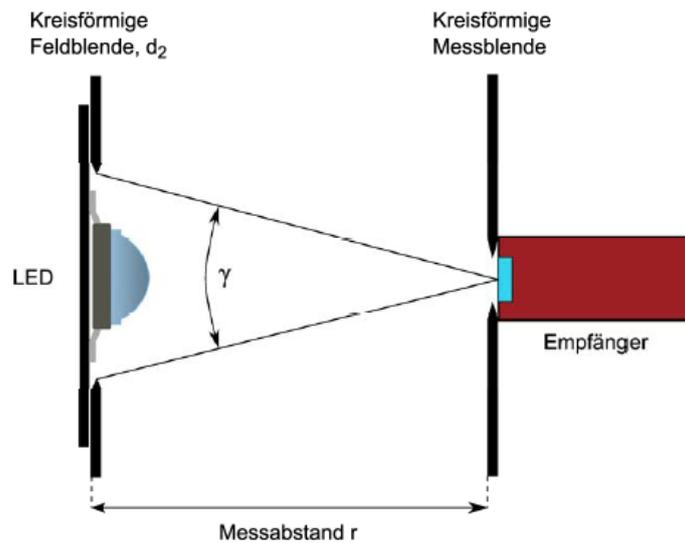


Abbildung 26: Schematische Darstellung des alternativen Strahldichte-Messverfahrens; Quelle: (Udocičić 2013), S. 63

5.3. Vorgehen zur Messung der Blaulichtgefährdung

Zur Ermittlung der Blaulichtisikoklasse sollten die strahldichtebasierten Messungen nach folgendem Ablauf durchgeführt werden:

1. Wahl des Messabstandes: Nach DIN EN 62471-7 gilt für Bühnen- und Studiobeleuchtung ein Messabstand von 1 000 mm
2. Ermittlung der Winkelausdehnung der Quelle (für $\alpha < 11$ mrad kann die Quelle als kleine Quelle angenommen werden und darf bestrahlungsstärkebasiert gemessen werden)
3. Messung der gewichteten Strahldichte mit einem Messwinkel γ von 100 mrad
 - a. Wenn $L_B \leq 100 \frac{W}{sr \cdot m^2}$ Einordnung in die freie Gruppe (RG 0), die Prozedur ist beendet
 - b. Wenn $L_B > 100 \frac{W}{sr \cdot m^2}$ weiter mit Schritt 4
4. Messung der gewichteten Strahldichte mit einem Messwinkel γ von 11 mrad
 - a. Wenn $L_B \leq 10\,000 \frac{W}{sr \cdot m^2}$ Einordnung in Risikogruppe 1, die Prozedur ist beendet
 - b. Wenn $L_B > 10\,000 \frac{W}{sr \cdot m^2}$ weiter mit Schritt 5

5. Messung der gewichteten Strahldichte mit einem Messwinkel von 1,7 mrad
- Wenn $L_B \leq 4\,000\,000 \frac{W}{sr \cdot m^2}$ Einordnung in Risikogruppe 2, die Prozedur ist beendet
 - Wenn $L_B > 4\,000\,000 \frac{W}{sr \cdot m^2}$ Einordnung in Risikogruppe 3, die Prozedur ist beendet⁸³

5.4. Messung der Quellgröße

Die Bestimmung der Quellgröße wird benötigt, um die Winkelausdehnung α der Quelle zu bestimmen. Zur Ermittlung der Quellengröße werden die 50%-Emissionspunkte ermittelt. Da bei Lampensystemen in den allermeisten Fällen Reflektoren oder Linsen im Einsatz sind, wird nicht die geometrische Größe, sondern eine virtuelle „scheinbare“ Quelle wahrgenommen. Die Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle muss bestimmt werden, um die optische Strahlungssicherheit bewerten zu können.⁸⁴

Die Bestimmung der 50%-Emissionspunkte kann durch die Binarisierung der Leuchtdichteaufnahme mit der Schwelle von 50% der maximalen Leuchtdichte im Bild realisiert werden. Bildpunkte, die unter dem Schwellenwert liegen, werden auf den Wert null gesetzt, während Punkte über dem Schwellenwert auf den Wert eins gesetzt werden. Daraufhin kann die Ausdehnung der Quelle zuerst in Pixeln bestimmt werden. Durch das zuvor bestimmte mm/Pixel-Verhältnisses kann daraufhin die Größe der scheinbaren Quelle und somit auch die Winkelausdehnung bestimmt werden.⁸⁵

Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist stark abhängig von der Dynamik der Kamera. Da das Bild nicht überbelichtet sein darf, müssen meist Graustufenfilter (ND-Filter) verwendet werden. Eine Aufnahme ist somit nur verwendbar, wenn das Bild so weit abgedunkelt wird, dass der hellste Bereich klar erkennbar ist, ohne den Sensor der Kamera zu übersteuern.⁸⁶

⁸³ (Görlich 2018)

⁸⁴ (Udocičić 2013), S. 64

⁸⁵ (Pepler 2019), S. 66 f

⁸⁶ (Scholl 2022), S. 60

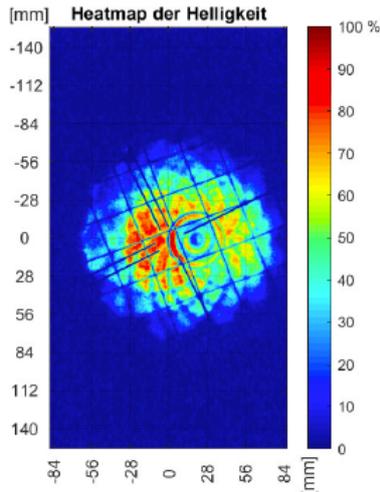


Abbildung 27: Heatmap der Leuchtdichte; Quelle: (Scholl 2022), S. 60

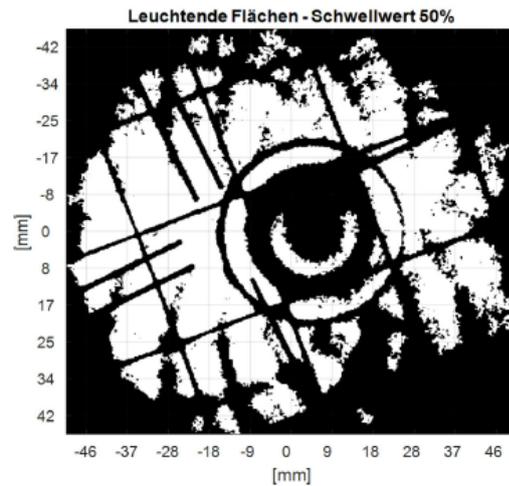


Abbildung 28: Scheinbare Quellgröße beim Schwellwert von 50%; Quelle: (Scholl 2022), S. 60

Die Größe der scheinbaren Quelle kann je nach Linsenart und Zoom-Einstellung teils stark von der tatsächlichen Linsengröße abweichen. Teilweise kann bei der Zoom-Einstellung „Flood“ das Risiko höher sein als bei der Einstellung „Spot“, da die leuchtende Fläche kleiner ist. Mit Hilfe der Heatmap lässt sich zudem der Ort der maximalen Strahldichte ermitteln, an dem die Messung der Blaulichtgefährdungsbewerteten Strahldichten stattfinden sollte, um den Worst-Case-Fall zu berücksichtigen.⁸⁷

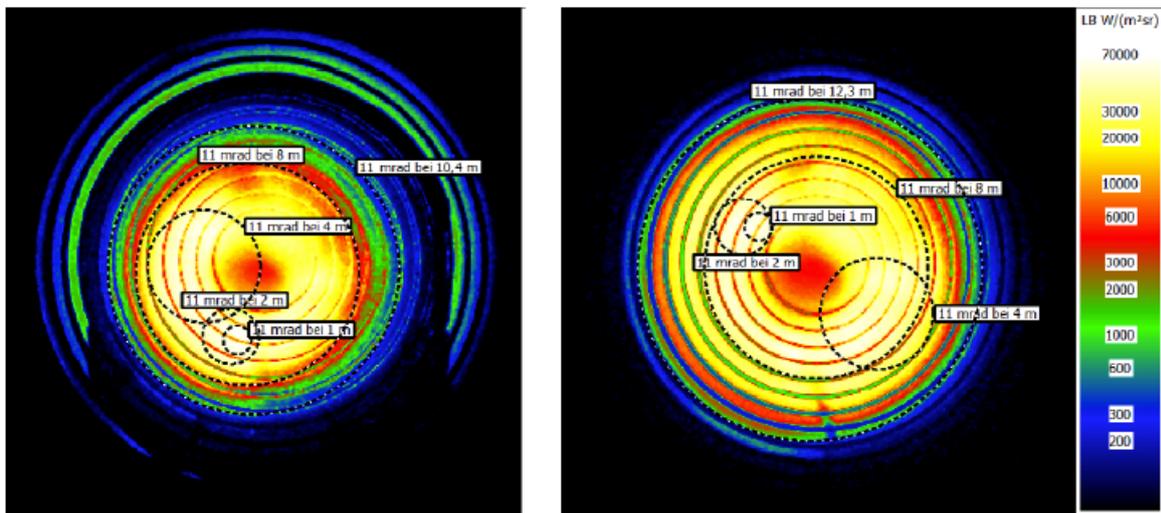


Abbildung 29: BLH-bewertete Strahldichteverteilung eines Scheinwerfers mit Fresnel-Linse. Links: Zoom-Einstellung „Flood“; Rechts: Zoom-Einstellung „Spot“; Quelle: (Christoph Schierz 2019), S. 52

⁸⁷ (Christoph Schierz 2019), S. 52 ff

6. Messungen

Im Rahmen der Arbeit wurden mehrere Messungen zur Erfassung von photochemischer und thermischer Netzhautgefährdung unterschiedlicher Scheinwerfer durchgeführt. Dabei wurden bei LED-Engines die gewichteten Strahldichten L_B und L_R , die Beleuchtungsstärke E_v sowie die maximalen Expositionszeiten t_{max} aufgenommen. Bei der Laser-Engine hingegen wurde die Beleuchtungsstärke E_v sowie die gewichtete Bestrahlungsstärke E_B aufgenommen.

Es wurden folgende Geräte mit LED-Engine vermessen:

- ARRI L7-C
- ARRI Skypanel X
- ETC SourceFour LED 2 Lustr+
- JB lighting P12 Profile HP
- ROBE Robin Spider

Es wurde ein Scheinwerfer mit Laser-Engine betrachtet, nämlich der:

- AYRTON Kyalami

Zudem wurde eine Messreihe zur Überprüfung durchgeführt, ob die Leuchtdichte tatsächlich erst ab dem Punkt nachlässt, bei dem die Quelle nur noch einen Winkel $\alpha \leq 11$ mrad aufspannt und es sich daher um eine kleine Quelle handelt. Zum Vermessen wurde ein Expolite TourLED Power 4 CM+W verwendet. An diesem wurde lediglich die Leuchtdichte L_v aufgenommen.

6.1. Messtechnik

6.1.1. JETI Specbos 1211UV

Für die Messungen der Strahl- und Leuchtdichten wurde das Spektralmessgerät JETI Specbos 1211UV der Firma JETI Technische Instrumente GmbH genutzt. Es ist in der Lage Wellenlängen im Bereich von 230 – 1000 nm aufzunehmen.⁸⁸ Es deckt somit komplett den Blaulicht relevanten Bereich von 300 – 700 nm ab. Der thermische Bereich hingegen, welcher sich bis zu 1400 nm erstreckt, kann nicht komplett abgebildet werden. Da jedoch davon auszugehen ist, dass die LEDs außerhalb des sichtbaren Spektrums keine Strahlung vorweisen, da sie auf den sichtbaren Bereich ausgelegt sind, kann trotz allem auch die thermische Netzhautgefährdung hiermit beurteilt werden.

⁸⁸ (JETI Technische Instrumente GmbH 2021)

Es bietet einen Ziel-Laser, der es ermöglicht das Messgerät genau auf die Probe auszurichten. Zudem gibt es Aufsätze für das Spektrometer, um Messempfangswinkel von 100 mrad, 11 mrad oder 1,7 mrad zu realisieren. Für die vorliegenden Messungen standen jedoch nur die Aufsätze für 100 mrad sowie 11 mrad zur Verfügung. Das Messgerät ist in der Lage Leuchtdichten von 0,1–2.500 cd/m² zu messen und ist zudem mit unterschiedlichen ND-Filtern (neutral-density-filter) ausgestattet, um die Lichtmenge, die ins Messgerät fällt zu reduzieren. So sind auch Messungen in helleren Umgebungen möglich.



Abbildung 30: JETI Specobs 1211UV mit 100mrad Aufsatz; Quelle: (JETI 2021), S. 1

Mit Hilfe der vom Unternehmen eigenen Software JETI LiVal-Software, können die Daten ausgewertet werden, es wurde Version 8.0.0. genutzt. Die Software bietet neben der Anzeige des Spektrums noch viele weitere Auswertungsmöglichkeiten, auch zur Blaulicht- und thermischen Netzhautgefährdung. Über die Software können die maximalen Expositionszeiten, sowie die gewichteten Strahldichten L_B und L_R ausgegeben werden. Dabei bietet die Software zur Bewertung der thermischen Netzhautgefährdung sowohl die Gewichtungsfunktion nach der DIN EN 62471 sowie die Funktion nach der Empfehlung der ICNIRP 2013 an. Zudem findet eine direkte Einteilung in die Risikogruppen statt, sofern möglich.⁸⁹ Es wird nicht angegeben, wie exakt die Berechnungen durchgeführt werden, aber es gibt die Möglichkeit die einzelnen Werte des Spektrums beispielsweise als CSV oder Excel-Datei zu exportieren.

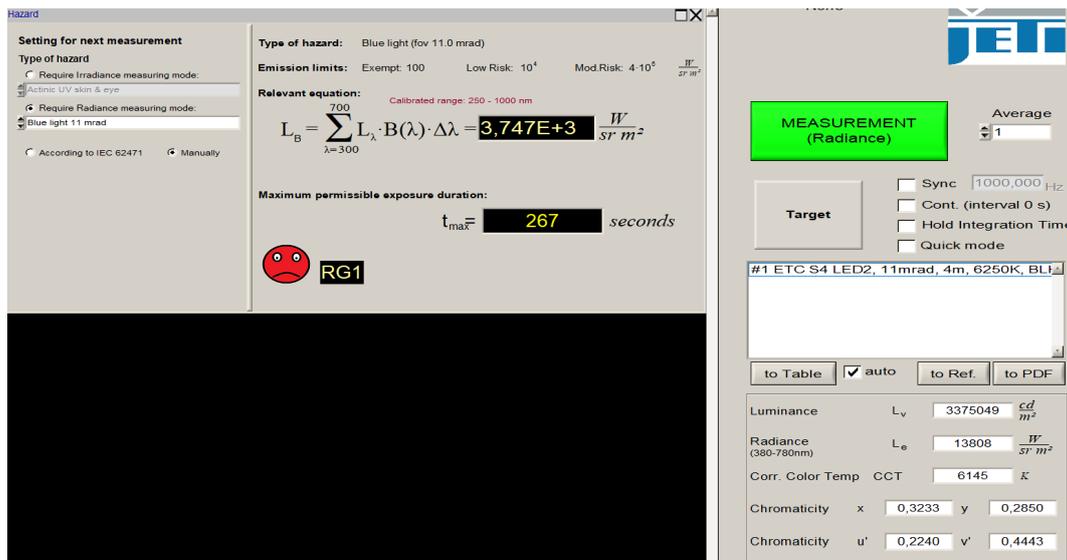


Abbildung 31: JETI LiVal Auswertungssoftware; Quelle: eigene Darstellung

⁸⁹ (JETI Technische Instrumente GmbH 2024)

6.1.2. Gigahertz-Optik X1-3

Zur Messung der Beleuchtungsstärke wurde das Gigahertz-Optik X1-3 mit dem Messkopf XD-45-HB verwendet. Bei dem Gigahertz-Optik X1-3 handelt es sich um ein Handmessgerät, welches mit den entsprechenden Messköpfen in der Lage ist, die Blaulichtgefährdung oder UV-Gefährdung zu detektieren. Dabei wird die integrale Messtechnik verwendet, welche die alternative Methode zu Doppelmonochromatoren darstellt.⁹⁰

Der Messkopf ist DIN EN 62471 und DIN 62778 konform und besteht aus vier Sensoren, drei davon sind zur Bewertung der Blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärke zuständig. Diese decken den Spektralbereich von 300-700 nm ab. Der letzte Sensor ist zur Beleuchtungsstärkemessung verantwortlich. Der Detektor eignet sich zur Bewertung von Lichtquellen jeglicher Art, die UV-A und tiefrote spektrale Anteile besitzen. Zudem gibt es einen Tubusaufsatz für den Messkopf XD-45-HB, welcher es ermöglicht Messwinkel beziehungsweise Sichtfelder von 100 mrad oder 11 mrad zu realisieren, indem er zwei austauschbare Lochblenden besitzt. Dieser Aufsatz ermöglicht es das Risiko kleiner Quellen zu bewerten. Er ist in der Lage effektive Bestrahlungsstärken E_B von $0,02 \frac{mW}{m^2}$ bis $100 \frac{mW}{m^2}$ zu messen und die Beleuchtungsstärke von 0,2 lx bis 1.000.000 lx.⁹¹



Abbildung 32: Gigahertz-Optik X1-3 mit XD-45-HB Messkopf und Tubusaufsatz; Quelle: (Gigahertz Optik GmbH kein Datum)

6.1.3. fruitcore Horst 900

Der Industrieroboter Horst 900 der fruitcore robotics GmbH besitzt sechs bewegbare Achsen. Dank diesen ist es möglich das Messgerät genau auf den Scheinwerfer auszurichten und entsprechend von der Position her anzupassen. Mit Hilfe des horstPanel, dem tragbaren Bedienpanel so wie der eigenen horstFX Software lässt sich der Roboter steuern. Zudem gibt es die Möglichkeit die einzelnen Positionen abzuspeichern, wodurch die Messungen von dieser Seite her reproduzierbar sind. Der Roboter ist in der Lage seine sechs Achsen mit gerade einmal $0,05^\circ$ zu bewegen, wodurch sehr genaue Positionierungen möglich werden.⁹² Das Spektralmessgeräts JETI Specobs 1211UV ist mit einer 3D gedruckten Halterung an den Industrieroboter angebracht.



Abbildung 33: Horst 900 mit horstPanel; Quelle: (fruitcore robotics GmbH 2022)

⁹⁰ (Gigahertz Optik GmbH kein Datum)

⁹¹ (Gigahertz Optik GmbH kein Datum)

⁹² (fruitcore robotics GmbH 2022)

6.2. Messung 1 – LED-Engines

6.2.1. Messaufbau

Die Strahldichtemessungen der Geräte mit LED-Engines wurden im „Schwarzen Labor“ der HAW Hamburg aufgenommen. Sie wurden mit Hilfe einer optischen Bank durchgeführt, welche im reflexionsarmen „Schwarzen Labor“ steht. Die Gestaltung wurde gewählt, um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen und keine Reflexion mit in den Messergebnissen aufzunehmen.

Für die Strahldichtemessung wurde das JETI Specobs 1211UV genutzt, welches am Industrieroboter Horst 900 befestigt wurde. Zur Messung der photochemischen Netzhautgefährdung kamen beide Messwinkelaufsätze mit 11 mrad und 100 mrad zum Einsatz. Die thermische Netzhautgefährdung wurde nur mit dem Messwinkelaufsatz von 11 mrad aufgenommen. Hinzu kamen die ND-Filter, welche je nach Strahldichtestärke vor die Messwinkelaufsätze hinzugefügt wurden. Die Beleuchtungsstärkemessung E_v wurde mit dem Gigahertz-Optik X1-3 und dem Messkopf XD-45-HB aufgenommen.

Der jeweiligen Scheinwerfer wurde auf der optischen Bank befestigt und mit einem Abstand von 1 m und 4 m zum Spektrometer aufgestellt. Dabei galt der Abstand von der Linse des Scheinwerfers bis zum Sensor des Messgerätes und nicht nur bis zum optischen Aufsatz des Messwinkels.

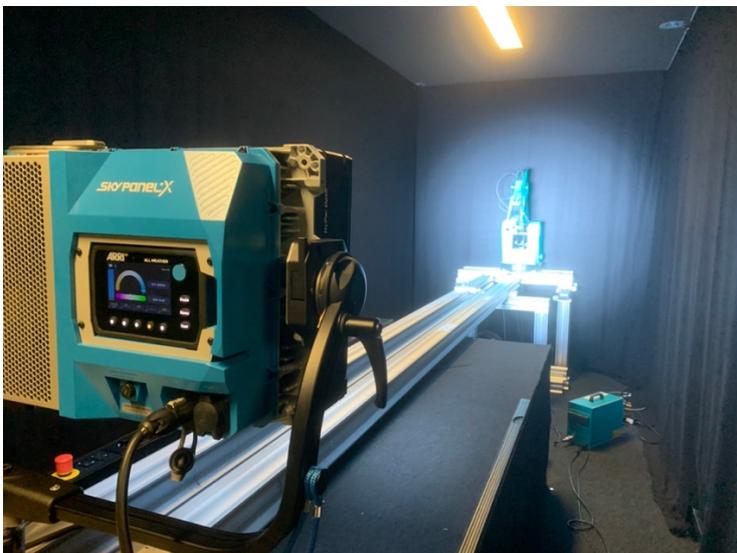


Abbildung 34: Messaufbau LED-Engines, Quelle: eigene Darstellung

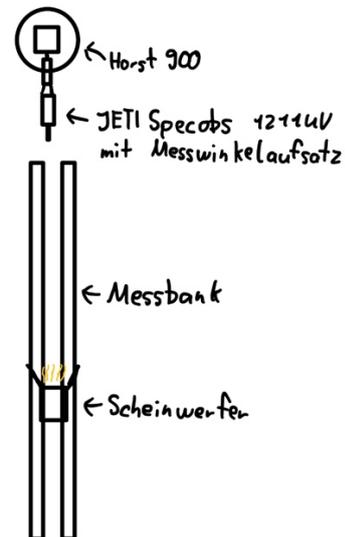


Abbildung 35: Messaufbau Skizze LED-Engines; Quelle: eigene Darstellung

6.2.2. Durchführung

Zunächst wurde das Spektrometer auf die Position des Scheinwerfers angepasst, sodass beide Geräte in Waage sind. Zudem wurde das Spektralmessgerät mit Hilfe des Ziel-Lasers auf den lichtaustretenden Punkt ausgerichtet. Bei allen Quellen wurde über experimentelles Versuchen gesucht, bei welchen Weißlichteinstellungen bzw. bei welcher Farbtemperatur die Geräte die höchste Emission an Strahlung im Bereich der Blaulichtgefährdung vorweisen.

Diese Einstellung wurde dann zur Messung verwendet. Zudem wurde der Zoom bei Lampen, die diese Einstellungsmöglichkeit besitzen so eingestellt, dass das Licht so gebündelt wie möglich aus dieser herauskommt, auch hierbei wurde per experimentellen Verfahren geprüft, ob diese Einstellung tatsächlich die höchsten Emissionen hervorruft, was der Fall war.

Als erstes wurde die gewichtete Strahldichte L_B in 4 m Entfernung mit 100 mrad aufgenommen, sowie die dazugehörige maximale Expositionsdauer t_{max} . Daraufhin folgten die Messungen zu L_B und L_R , welche mit 11 mrad aufgenommen worden sind. Zuletzt wurde die Beleuchtungsstärke E_v mit dem Gigahertz-Optik X1-3 mit dem Messkopf XD-45-HB aufgenommen. Daraufhin wurde das Verfahren im Abstand von 1 m wiederholt. Bei beiden Abständen wurde mit Hilfe des Industrieroboters die Positionierung des Spektrometers über die sechs Achsen so angepasst, dass die maximale Emission aufgenommen wird. Dafür wurde jede einzelne Achse so angepasst, dass die gewichtete Strahldichte L_B einen möglichst hohen Wert betrug, um das Worst-Case Szenario einzufangen. Um den Unterschied aufzuzeigen, inwieweit die Worst-Case Werte sich von den ordentlich aufeinander ausgerichteten Messwerten unterscheiden, wurden teilweise beide Werte mit aufgenommen. Je nach Strahldichtestärke wurde mit den ND-Filtern für den JETI Specobs 1211UV gearbeitet, teilweise hat jedoch auch der stärkere Filter nicht ausgereicht, weshalb keine Messdaten aufgenommen werden konnten.

6.2.3. Auswertung: ARRI L7-C

Beim ARRI L7-C handelt es sich um eine Multispektrale LED-Engine mit RGBW-Dioden⁹³. Die höchste Blaulichtgefahr im Weißlichtbereich lag bei einem CCT von 6250 K und dem kleinstmöglichen Zoom bei 15°, weshalb die Messwerte bei diesen Einstellungen aufgenommen wurden. Zusätzlich wurden die Messungen mit der Einstellung bei einem CCT von 6250 K sowie -1 Magenta wiederholt, um einen Vergleich zur Messreihe von Scholl ziehen zu können und diese Werte miteinander abzugleichen. Das -1 Magenta führt zu einer geringeren Magenta-Sättigung im Spektrum der austretenden Strahlung.



Abbildung 36: Arri L7-C; Quelle: (Scholl 2022), S. 79

Zur Berechnung der maximalen Expositionsdauer der thermischen Netzhautgefährdung wird der Quellwinkel α benötigt, weshalb dieser für beide Entfernungen berechnet wurde (Formel 9). Der Linsendurchmesser beträgt 0,175 m⁹⁴.

$$\alpha = \frac{d}{r} = \frac{0,175}{4} = 0,04375 \text{ rad}$$

Für die thermische Netzhautgefährdung ergeben sich für die zwei Entfernungen zwei unterschiedliche Grenzwerte. Für beide Entfernungen konnte von Expositionszeiten über 10 s ausgegangen werden, weshalb folgendes (Formel 17) gilt:

⁹³ (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2022), S. 42

⁹⁴ (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2022), S. 42

$$L_{R_Grenz} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{0,04375} = 6,4 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für 4 m Entfernung}$$

$$L_{R_Grenz} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{0,1} = 2,8 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad \text{für 1 m Entfernung}$$

Die Berechnung der maximalen Expositionszeit erfolgt, wie bei der Blaulichtgefährdung, nur mit dem zuvor berechneten Grenzwert der thermischen Netzhautgefährdung über die Gleichung (Formel 12):

$$t_{max} = \frac{L_{R_Grenz}}{L_R} = \frac{6,4 \cdot 10^8}{3,19 \cdot 10^4} = 20069 \text{ s} \quad \text{für 4 m Entfernung}$$

$$t_{max} = \frac{L_{R_Grenz}}{L_R} = \frac{2,8 \cdot 10^8}{2,69 \cdot 10^4} = 5946 \text{ s} \quad \text{für 1 m Entfernung}$$

Tabelle 6: Auswertungsergebnisse ARRI L7-C

Entfernung [m]	α [mrad]	L_{R_Grenz} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]
4	43,75	$6,4 \cdot 10^8$
1	175	$2,8 \cdot 10^7$

Messung	E_v [lx]	L_B 11 mrad [$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$]	L_B 100 mrad [$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$]	L_{R_DIN} 11 mrad [$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$]	L_{R_ICNIRP} 11 mrad [$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$]
		t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]
4 m, 6250 K	3,46E+03	2,01E+03	2,40E+02	3,19E+04	1,07E+04
		387	4320	20069	59869
1 m, 6250 K	4,41E+04	2,17E+03	1,75E+03	2,69E+04	9,14E+03
		461	571	5946	17502
4 m, 6250 K -1 Magenta	3,16E+04	1,94E+03	1,48E+03	2,35E+04	7,31E+03
		514	676	22931	75276
1 m, 6250 K - 1 Magenta	2,60E+03	2,33E+03	2,39E+02	2,79E+04	8,50E+03
		429	4320	6797	21885

Festzuhalten ist, dass der ARRI L7-C nach den Messungen in RG1 eingestuft werden sollte, da die maximale Expositionsdauer t_{max} für L_B 11 mrad bei 387 s liegt. Unter keinen Umständen liegt eine thermischen Netzhautgefährdung liegt, da die maximalen Expositionszeiten deutlich über den 10 s liegen, in denen thermische Netzhautgefährdungen lediglich auftreten können. Vom Hersteller aus ist der Scheinwerfer ebenfalls in RG1 eingestuft worden, womit unter normalen Umständen keine photobiologische Gefährdung auftreten sollte.⁹⁵

⁹⁵ (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2022), S. 43

6.2.4. Auswertung: ARRI SkyPanel X

Das ARRI SkyPanel X besitzt eine Multispektrale LED-Engine bestehend aus RGB, Amber, Lime und Cyan.⁹⁶ Für die Messung wurde ein CCT von 20.000 K gewählt. Das Gerät wurde zunächst ohne Optik vermessen (Open-Face/ OF), was einem Abstrahlwinkel von 120° entspricht. Zusätzlich wurden Messung mit der HyperOptic mit einem Abstrahlwinkel von 11° durchgeführt.



Abbildung 37: ARRI SkyPanel X mit HyperOptic, Quelle: (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2023)

Da bei diesem Scheinwerfer keine klassische Linse mit einem Durchmesser vorhanden ist, wurde zunächst die Fläche der Quelle bestimmt und daraufhin der Durchmesser einer äquivalenten runden Quelle berechnet. Daraufhin wurde der Quellwinkel α bestimmt (Formel 9).

$$A = a \cdot b = 0,648 \text{ m} \cdot 0,303 \text{ m} = 0,196$$

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,196 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,50 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{d}{r} = \frac{0,5}{4} = 0,125 \text{ rad}$$

Für die thermische Netzhautgefährdung ergeben sich für die zwei Entfernungen zwei unterschiedliche Grenzwerte. Für beide Entfernungen konnte von Expositionszeiten über 10 s ausgegangen werden, weshalb folgendes (Formel 17) gilt:

$$L_{R_Grenz} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{c_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{0,125} = 2,24 \cdot 10^8 \quad \text{für 4 m Entfernung}$$

Die Berechnung der maximalen Expositionszeit erfolgt, wie bei der Blaulichtgefährdung, nur mit dem zuvor berechneten Grenzwert der thermischen Netzhautgefährdung über die Gleichung (Formel 12):

$$t_{max} = \frac{L_{R_Grenz}}{L_R} = \frac{2,24 \cdot 10^8}{1,51 \cdot 10^3} = 148344 \text{ s für 4 m Entfernung}$$

OF

Entfernung [m]	α [mrad]	L_{R_Grenz} [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
4	125	$2,24 \cdot 10^8$
1	500	$5,6 \cdot 10^7$

⁹⁶ (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2023), S. 9

Tabelle 7: Auswertungsergebnisse ARRI SkyPanel X

Messung	E_v [lx]	L_B 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_B 100 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	$L_{R,DIN}$ 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	$L_{R,ICNIRP}$ 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]
		t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]
4 m, Open-Face	7,07E+02	1,10E+02	6,44E+01	1,51E+03	2,10E+02
		9000	> 10.000	148344	1066159
1 m, Open-Face	9,12E+03	3,24E+03	9,62E+01	3,41E+04	6,39E+03
		309	> 10.000	1643	8760
4 m, HyperOptic	1,53E+04	1,53E+04	2,98E+03	3,22E+04	6,91E+03
		335	586	6963	32407
1 m, HyperOptic	5,65E+04	5,65E+04	3,56E+03	2,90E+04	7,76E+03
		281	520	1928	7213

Nach Herstellerangabe ist das SkyPanel X in RG1 klassifiziert. Zudem wird angegeben, dass das Gerät nicht ohne Diffusor oder Optik verwendet werden darf.⁹⁷ Eine Open-Face Nutzung sollte daher nicht stattfinden, vermutlich aus dem Grund, dass in dem Moment in einzelne LEDs geschaut werden kann. Wird aus kurzer Distanz in die blaue LED geschaut, könnte sich ein höheres Risiko ergeben als mit einem optischen Vorsatz, da es sich um einen schmalbandigen kurzwelligen Bereich handeln wird. Trotz allem konnte bei den Open-Face Messungen keine Grenzwertüberschreitung der RG1 festgestellt werden, da t_{max} für L_B 11 mrad bei 309 s liegt. Bei der Entfernung von 1 m sind die Ergebnisse der Open-Face Messung ähnlich wie die der HyperOptic. Anders bei der Entfernung von 4 m, dort sind die Werte der HyperOptic deutlich höher. Dies ist zu dadurch zu erklären, dass bei der Open-Face Messung lediglich einzelne LED-Arrays betrachtet werden können, während bei der HyperOptic das Licht gebündelt wird.

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass das SkyPanel X sicher bezüglich thermischer Netzhautgefährdungen ist RG0, während es bei der photochemischen Netzhautgefährdung in der RG1 korrekt eingestuft ist.

⁹⁷ (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2023), S. 16

6.2.5. Auswertung: ETC SourceFour LED Series 2 Lustr

Der ETC SourceFour LED Series 2 Lustr ist mit einer sieben farbigen multispektralen LED-Engine ausgestattet. Diese besteht aus RGB, Amber, Lime, Cyan und Indigo.⁹⁸ Für die Messungen wurde ein CCT von 6500 K gewählt, welches den höchsten einstellbaren CCT-Wert am Gerät darstellt. Es wurden sowohl Messungen ohne Optik (Open-Face) als auch mit einer 26° Optik durchgeführt.



Abbildung 38: ETC SourceFour LED Series 2; Quelle: (ETC Connect kein Datum), S. 1

Wird die Lampe Open-Face betrachtet, beträgt der Durchmesser der leuchtenden Quellfläche 88 mm. Die 26° Optik hingegen besitzt einen Linsendurchmesser von 130 mm. Die Quellwinkel sind daher wie folgt definiert (Formel 9):

$$\alpha = \frac{d}{r} = \frac{0,88}{4} = 0,022 \text{ rad}$$

Für die thermische Netzhautgefährdung ergeben sich für die zwei Entfernungen zwei unterschiedliche Grenzwerte. Für beide Entfernungen konnte von Expositionszeiten über 10 s ausgegangen werden, weshalb folgendes (Formel 17) gilt:

$$L_{R_Grenz} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{c_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{0,022} = 1,27 \cdot 10^9 \quad \text{für 4 m Entfernung OF}$$

Die Berechnung der maximalen Expositionszeit erfolgt, wie bei der Blaulichtgefährdung, nur mit dem zuvor berechneten Grenzwert der thermischen Netzhautgefährdung über die Gleichung (Formel 12):

$$t_{max} = \frac{L_{R_Grenz}}{L_R} = \frac{1,27 \cdot 10^9}{2,24 \cdot 10^4} = 55336 \text{ s} \quad \text{für 4 m Entfernung OF}$$

Entfernung [m]	α [mrad]	L_{R_Grenz} [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
4	OF: 22	OF: $1,27 \cdot 10^9$
	26°: 32,5	26°: $8,62 \cdot 10^8$
1	OF: 88	OF: $3,18 \cdot 10^8$
	26°: 130	26°: $2,15 \cdot 10^8$

⁹⁸ (ETC Connect kein Datum), S. 2

Tabelle 8: Auswertungsergebnisse ETC SourceFour LED Lustr+ 2

Messung	E_v [lx]	L_B 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_B 100 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_{R_DIN} 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_{R_ICNIRP} 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]
		t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]
4 m, Open-Face	3,36E+02	2,01E+03	4,54E+01	2,30E+04	2,44E+04
		497	>10.000	55336	23165
1 m, Open-Face	9,12E+03	5,69E+02	1,68E+02	2,64E+04	2,30E+04
		1759	6120	12048	13051
4 m, 26°	1,53E+03	3,37E+03	1,63E+02	4,54E+03	1,37E+04
		267	6120	189766	62794
1 m, 26°	2,21E+04	OVL	1,94E+03	OVL	OVL
		OVL	516	OVL	OVL

Wird der ETC SourceFour LED Series 2 Lustr ohne Optik (OF) betrachtet, so kann er in RG1 eingestuft werden. Mit einer Optik von 26° ließ sich mit dem zur Verfügung stehenden Messequipment keine Zuteilung realisieren, da die Strahldichte in 1 m Entfernung die Grenze des Spektrometers trotz Filter überschritt (OVL – Overload). Im Abstand von 4 m müsste das Gerät mit 26° Optik in RG1 eingeteilt werden, es ist jedoch davon auszugehen, dass im Abstand von 1 m eine Einstufung in RG2 hätte erfolgen müssen. Von Herstellerseiten gibt es keine Angabe zur Risikogruppenklassifizierung.

6.2.6. Auswertung: Robe Robin Spider

Im Robe Robin Spider sind als Lichtquelle insgesamt 19 RGBW LED Multichips verbaut.⁹⁹ Der native CCT beträgt 8000 K und wurde zur Messung genutzt, zudem wurde eine Messung nur mit den blauen und weißen LEDs durchgeführt, um einen Vergleich zu den Messdaten von Scholl zu erreichen. Außer der einen Messungen war keine weitere Aufnahme von Messwerten möglich, da das Messgerät trotz der ND-Filter einen Overload (OVL) angezeigt hat. Die Messungen wurden bei einem Abstrahlwinkel von 4° durchgeführt.

Der Linsendurchmesser beträgt 270 mm womit sich die angegebenen Quellwinkel, wie folgt ergeben (Formel 9):

$$\alpha = \frac{d}{r} = \frac{0,27}{4} = 0,0675 \text{ rad}$$



Abbildung 39: Robe Spider;
Quelle: (Scholl 2022), S. 88

⁹⁹ (Robe kein Datum), S.

Für die thermische Netzhautgefährdung ergeben sich für die zwei Entfernungen zwei unterschiedliche Grenzwerte. Für beide Entfernungen konnte von Expositionszeiten über 10 s ausgegangen werden, weshalb folgendes (Formel 17) gilt:

$$L_{R_Grenz} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{c_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{0,0675} = 4,15 \cdot 10^8 \quad \text{für 4 m Entfernung 8000K}$$

Die Berechnung der maximalen Expositionszeit erfolgt, wie bei der Blaulichtgefährdung, nur mit dem zuvor berechneten Grenzwert der thermischen Netzhautgefährdung über die Gleichung (Formel 12):

$$t_{max} = \frac{L_{R_Grenz}}{L_R} = \frac{4,15 \cdot 10^8}{2,27 \cdot 10^5} = 1825 \text{ s} \quad \text{für 4 m Entfernung 8000 K}$$

Entfernung [m]	α [mrad]	L_{R_Grenz} [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
4	67,5	$4,15 \cdot 10^8$
1	270	$1,04 \cdot 10^8$

Tabelle 9: Auswertungsergebnisse Robe Spider

Messung	E_v [lx]	L_B 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_B 100 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_{R_DIN} 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_{R_ICNIRP} 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]
		t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]
4 m, 8000 K	5,07E+04	2,51E+04	6,90E+03	2,27E+05	6,98E+04
		40	145	1825	5940
1 m, 8000 K	7,54E+04	2,69E+04	1,18E+04	2,49E+05	7,05E+04
		37	84	417	1471
4 m, Blue-White	2,85E+04	OVL	2,09E+04	OVL	OVL
		OVL	145	OVL	OVL
		40	145	1825	5940

Als Weißlichtquelle betrachtet müsste der Robe Spider mindestens in RG2 eingeteilt werden, weil t_{max} für L_B 11 mrad bei 37 s liegt. Da der HAW Hamburg kein Messwinkelaufsatz für 1,7 mrad vorliegt, ist eine finale Einteilung in eine der Risikogruppen nicht möglich. Von Herstellerseite aus ist keine Risikogruppenklassifizierung angegeben. Scholl gibt in seiner Studie zur Vermessung und Bewertung von Bühnen-Scheinwerfern hinsichtlich der Schädigung von Auge und Haut – BoSS“ eine Risikogruppe 2 für den Robe Spider an.¹⁰⁰ Bei jener Messungen wurden jedoch nur die blauen und weißen LEDs genutzt. Dabei wurde ein Wert $L_{B_100 \text{ mrad}}$ von 2,70E+04 aufgenommen, welcher zumindest in derselben Größenordnung liegt, wie der eigens gemessene Wert von 2,09E+04. Die Risikogruppenklassifizierung von RG2 ist daher realistisch.

¹⁰⁰ (Scholl 2022), S. 88

6.2.7. Auswertung: JB-Lighting P12 Profile HP

Im JB-Lighting P12 Profile HP ist eine Weißlicht LED-Engine mit einem CCT von 6800 K verbaut.¹⁰¹ Zur Messung wurde die vorliegende Farbtemperatur genutzt sowie der engste Abstrahlwinkel von 5,7°.

Die Linse hat einen Durchmesser von 145 mm wodurch sich die angegebenen Quellwinkel über folgende Rechnung ergeben (Formel 9).

$$\alpha = \frac{d}{r} = \frac{0,145}{4} = 0,03625 \text{ rad}$$

Für die thermische Netzhautgefährdung ergeben sich für die zwei Entfernungen zwei unterschiedliche Grenzwerte. Für beide Entfernungen konnte von Expositionszeiten über 10 s ausgegangen werden, weshalb folgendes (Formel 17) gilt:

$$L_{R_Grenz} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{0,03625} = 2,00 \cdot 10^8 \quad \text{für 4 m Entfernung}$$

Die Berechnung der maximalen Expositionszeit erfolgt, wie bei der Blaulichtgefährdung, nur mit dem zuvor berechneten Grenzwert der thermischen Netzhautgefährdung über die Gleichung (Formel 12):

$$t_{max} = \frac{L_{R_Grenz}}{L_R} = \frac{4,15 \cdot 10^8}{2,27 \cdot 10^5} = 1825 \text{ s} \quad \text{für 4 m Entfernung}$$



Abbildung 40: JB-Lighting P12 Profile; Quelle: (JB-Lighting Lichtenlagentechnik GmbH 2019), S. 1

Entfernung [m]	α [mrad]	L_{R_Grenz} [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
4	36,25	$8,00 \cdot 10^8$
1	145	$2,00 \cdot 10^8$

Tabelle 10: Auswertungsergebnisse JB-Lighting P12 Profile HP

Messung	E_v [lx]	L_B 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_B 100 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_{R_DIN} 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]	L_{R_ICNIRP} 11 mrad [$Wm^{-2}sr^{-1}$]
		t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]	t_{max} [s]
4 m	4,76E+04	OVL	5,91E+03	OVL	OVL
		OVL	169	OVL	OVL
1 m	5,73E+04	OVL	OVL	OVL	OVL
		OVL	OVL	OVL	OVL

Leider war es mit dem vorhandenen messtechnischen Equipment nicht möglich aussagekräftige Messwerte des JB-Lighting P12 Profile HP aufzunehmen. Lediglich die Messung mit einem Messempfangswinkel von 100 mrad in 4 m Abstand ließ sich realisieren. Ansonsten war es trotz Filtern nicht möglich die Messwerte aufzunehmen, da das Messgerät nicht für solch hohe Strahldichten ausgelegt ist (OVL – Overload). Daher ist keine Einteilung in die Risikogruppen möglich. Nach Herstellerangaben ist der betrachtete Scheinwerfer als RG2 klassifiziert.¹⁰² Das Gerät hätte bei einem groß genügenden Abstand zwischen Quelle und Messgerät über die Regelung der kleinen Quelle mit einer Messung der gewichteten Bestrahlungsstärke E_B bewertet werden können. Aus zeitlichen und organisatorischen Gründen wurde hiervon jedoch abgesehen.

¹⁰¹ (JB-Lighting Lichtenlagentechnik GmbH 2019), S. 3

¹⁰² (JB-Lighting Lichtenlagentechnik GmbH 2019), S. 7

6.3. Messung 2 – Laser-Engine

6.3.1. Messaufbau

Bei der Vermessung des Gerätes mit der Laser-Engine, wurde mit der Regelung einer kleinen Quelle gearbeitet, weshalb die blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärke aufgenommen wurde. Das Messgerät Gigahertz-Optik X1-3 mit dem Messkopf XD-45-HB und dem Tubusaufsatz mit dem Einsatz, der einen Messwinkel von 11 mrad ermöglicht, wurde für die Messungen genutzt.

Der Scheinwerfer sowie die Messgerätehalterung wurden jeweils auf einem 1 m hohen Trusstower befestigt. Die Messgerätehalterung bestand aus einem 3D-Druck, welcher das Fixieren des Tubusaufsatzes mit dem Messkopf ermöglicht hat, sowie einem Gestell aus Profilschienen, um die Position des Messgerätes entsprechend anpassen zu können. Hinzu kam eine Plattform, welche durch Gewindeschrauben im Winkel verändert werden konnte. So wurde eine möglichst genaue Messung auch ohne Industrieroboter möglich.

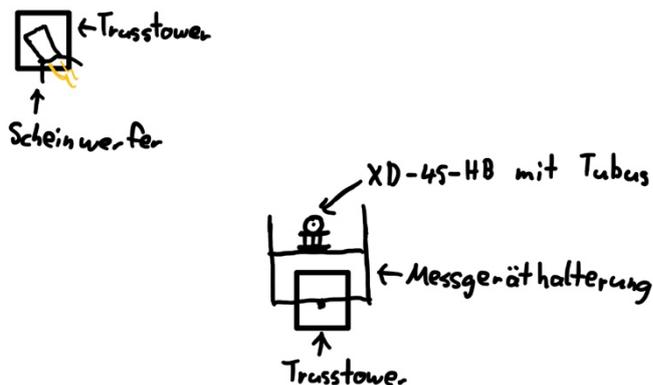


Abbildung 41: Skizze Messaufbau Laser-Engine; Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 42: Messgerätehalterung vor Ayrton Kyalami; Quelle: Fabian Oving

6.3.2. Durchführung

Zunächst wurde auch bei der zu vermessenden Laser-Engine versucht, die Strahldichte-Werte aufzunehmen. Dies war, aufgrund der hohen Strahldichte jedoch trotz Filter nicht möglich. Daher sollte eine Messung als kleine Quelle mit Hilfe des Gigahertz-Optik X1-3 mit dem Messkopf XD-45-HB sowie Tubus und Lochblende für 11 mrad durchgeführt werden. Der Abstand zwischen Messgerät und Linse des Scheinwerfers musste dementsprechend groß genug gewählt werden. Über (Formel 9) wurde der Mindestabstand berechnet.

$$\alpha = \frac{d}{r} \rightarrow r = \frac{d}{\alpha} = \frac{0,126 \text{ m}}{0,011 \text{ rad}} = 11,45 \text{ m}$$

Auch hier wurden Scheinwerfer und Messgerät in Waage positioniert und aufeinander ausgerichtet, sodass der Tubus mittig ausgerichtet zur Linse lag. Daraufhin wurden die Pan und Tilt Werte des Scheinwerfers angepasst, um den sichtbaren Hotspot auf den Tubus auszurichten. Zudem wurde der Zoom möglichst klein gezogen sowie der Fokus angepasst, damit der Brennpunkt auf Höhe des Messsensors liegt.

Daraufhin wurden die Beleuchtungsstärke E_v sowie die gewichtete Bestrahlungsstärke E_B aufgenommen. Über die Gewindeschrauben der Winkel des Tubuses samt Sensor angepasst bis die gewichtete Bestrahlungsstärke E_B einen möglichst hohen Wert angenommen hat. Zuletzt wurde die Distanz zwischen dem Sensor und der Linse des Scheinwerfers gemessen.

6.3.3. Auswertung

Bei dem Ayrton Kyalami handelt es sich um eine Weißlicht Laser-Engine, welche ein CCT von 9000 K und einen minimalen Abstrahlwinkel von 1° besitzt.¹⁰³ Die aufgenommenen Messwerte und Ergebnisse der Berechnungen des Ayrton Kyalami sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Die Messungen haben mit einer Entfernung von 17,90 m stattgefunden. Der Ayrton Kyalami hat einen Linsendurchmesser von 0,126 m, mit der Berechnung des Quellwinkels α wurde bestätigt, dass der Scheinwerfer in der Entfernung als kleine Quelle gewertet werden kann (Formel 9).

$$\alpha = \frac{d}{r} = \frac{0,126}{17,9} = 0,007 = 7 \text{ mrad}$$

Da die gewichtete Belichtungsstärke über dem Grenzwert $E_B \leq 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ für Zeiten über 100 s liegt, ist klar, dass die maximale Expositionsdauer t_{max} darunter liegt. Berechnen lässt sie sich über den Grenzwert für Bestrahlungsdauern unter 100 $E_B \leq 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ und der gemessenen gewichtete Belichtungsstärke E_B (Formel 14):

$$t_{max} = \frac{100}{E_B} = \frac{100}{6,27} = 15,95 \text{ s}$$

Tabelle 11: Messwerte Ayrton Kyalami

Messung	E_v [lx]	E_B [lx]	t_{max}
Kyalami ausgerichtet	1,28E + 4	6,27	15,95
Kyalami Worst-Case	1,93E + 2	19,20	5,21

Die Ergebnisse zeigen, dass der Ayrton Kyalami in einem Abstand von knapp 18 m immer noch in RG2 eingestuft werden muss und im ungünstigsten Fall die Grenzwertüberschreitung bereits nach einer Expositionsdauer von etwas über fünf Sekunden eintreten würde. Für geringere Abstände sinkt die maximale Expositionsdauer noch einmal. Das Gerät ist vom Hersteller in RG3 eingestuft, wobei die Messung nach DIN EN 62471 in einem Abstand von 20 cm durchgeführt wurde.¹⁰⁴ Anzumerken sei hier auch, dass der Grenzbereich deutlich gefährlicher zu sein scheint, als die Bereiche in der Mitte der Linse. So ist die zulässige Expositionsdauer gerade einmal ein Drittel der mittigen Position.



Abbildung 43: Ayrton Kyalami; Quelle: (Ayrton SAS 2024)

¹⁰³ (Ayrton SAS 2024), S. 14

¹⁰⁴ (Ayrton SAS 2024), S. 1

6.4. Leuchtdichtemessung L_v

6.4.1. Messaufbau

Die Messungen zur Überprüfung der konstanten Leuchtdichte bis zu einem bestimmten Punkt sind sehr ähnlich zum Verfahren der LED-Engines durchgeführt worden. Der Unterschied liegt darin, dass ohne Messwinkelaufsatz gemessen wurde. Es kam ein Filter zum Einsatz, um das einfallende Licht zu reduzieren, welcher einerseits den betrachteten Wellenlängenbereich auf 380 nm bis 780 nm begrenzt und andererseits per ND-Filter die Lichtmenge reduziert. Die Messungen wurden mit einem Expolite TourLED Power 4 CM+W Scheinwerfer durchgeführt.

Es wurden Messungen in 16 unterschiedlichen Abständen zwischen Messgerät sowie der Quelle durchgeführt im Bereich von 1 m bis 4,5 m.

6.4.2. Durchführung

Das Messgerät ist mit Hilfe des Industrieroboters in Waage zur optischen Quelle des Scheinwerfers ausgerichtet worden, sodass der Messpunkt mittig die Optik trifft. Ziel der Messung ist es herauszufinden, ob die Leuchtdichte erst ab dem Punkt der kleinen Quelle beginnt sich zu verringern und vorher konstant bleibt. Daher sind in dem umliegenden Bereich mehr Messungen aufgenommen worden als in weiter entfernten.

In der JETI LiVal Auswertungssoftware wurde ein Average von fünf eingestellt, diese Funktion bildet das arithmetische Mittel. Es werden somit fünf Messungen vom Gerät ausgeführt.

6.4.3. Auswertung

Der verwendete Scheinwerfer Expolite TourLED Power 4 CM+W besitzt eine Multispektrale LED-Engine aus RGBW-Dioden.¹⁰⁵ Für die Messungen wurde am Gerät eingestellt, dass die RGB LEDs einen Wert von null haben und nur die Weiße LED einen Wert von 50 besitzt. Höhere Werte haben dazu geführt, dass die Messungen trotz Filter aufgrund zu hoher Leuchtdichten nicht möglich gewesen wären.

Der Linsendurchmesser des Expolite TourLED Power 4 CM+W beträgt 42 mm. Um herauszufinden bei welchem Abstand die Grenze zur kleinen Quelle überschritten wird, wurde folgendes berechnet (Formel 9):

$$\alpha = \frac{d}{r} \rightarrow r = \frac{d}{\alpha} = \frac{0,042 \text{ m}}{0,011 \text{ rad}} = 3,82 \text{ m}$$



Abbildung 44: Expolite TourLED Power 4 CM+W; Quelle: (Expolite 2022)

¹⁰⁵ (Expolite 2022), S. 9

Die Grenze ab dem das Gerät als kleine Quelle zu betrachten ist, beträgt somit den Abstand von 3,82 m. Daher werden im Bereich von 3,5 m bis 4,5 m in Abständen von 0,1 m Messwerte aufgenommen. Vor den 3,5 m werden bis auf einen Meter in Abständen von 0,5 m Messwerte aufgenommen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 12 aufgezeigt.

Tabelle 12: Ergebnisse Leuchtdichtemessung

Entfernung [m]	α [mrad]	L_v [cd/m^2]
1,0	42,00	1,54E+05
1,5	28,00	1,20E+05
2,0	21,00	6,82E+04
2,5	16,80	4,48E+04
3,0	14,00	3,14E+04
3,5	12,00	2,31E+04
3,6	11,67	2,19E+04
3,7	11,35	2,07E+04
3,8	11,05	1,95E+04
3,9	10,77	1,85E+04
4,0	10,50	1,77E+04
4,1	10,24	1,67E+04
4,2	10,00	1,60E+04
4,3	9,77	1,51E+04
4,4	9,55	1,24E+04
4,5	9,33	1,39E+04

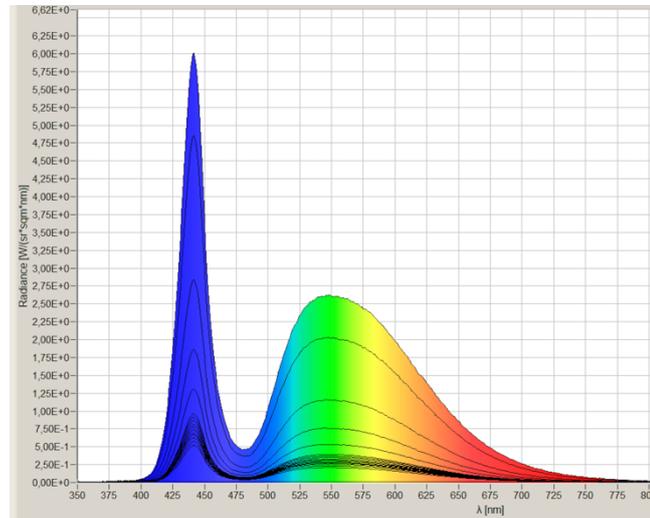


Abbildung 45: Spektren der Messungen; Quelle: eigene Darstellung

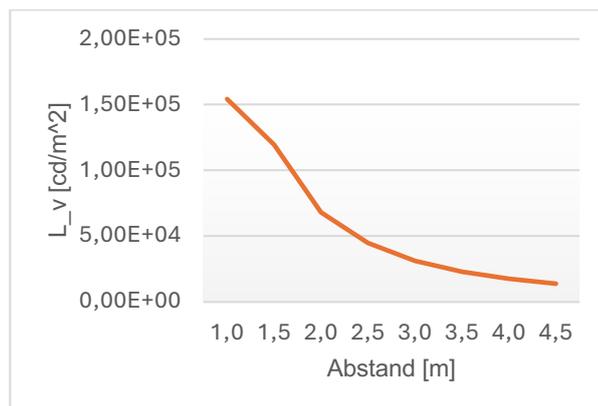


Abbildung 46: Grafische Darstellung der Messergebnisse; Quelle: eigene Darstellung

Anders als zunächst erwartet, bleibt die Leuchtdichte L_v nicht gleich bis zum Punkt an dem die Quelle lediglich einen Winkel $\alpha < 11$ mrad aufspannt, sondern nimmt bereits vorher ab. Die Ergebnisse zeigen eher eine exponentielle Abnahme der Leuchtdichte in Abhängigkeit zur Entfernung.

Bei der Entfernung von 4,4 m weicht der Messwert aus dem sonst erkennbaren Muster ab. Dies könnte daran liegen, dass der Scheinwerfer beim Verschieben zum neuen Messabstand ein wenig in der Ausrichtung verstellt wurde, wodurch eine Veränderung erklärbar wäre.

Wird die Leuchtdichte mit einem Betrachtungswinkel $\gamma = 11$ mrad bewertet, könnte die Leuchtdichte bei einer homogenen Quelle im Fall $\alpha \geq 11$ mrad gleichbleibend sein, da bis zum Punkt von $\alpha = 11$ mrad immer nur ein Teil der Quelle betrachtet wird. Erst danach wird auch Fläche außerhalb der Quelle mitbewertet, wodurch die Leuchtdichte sinkt. Diese Theorie müsste jedoch noch einmal messtechnisch bestätigt werden.

6.5. Fazit

Es ist in jedem Fall festgestellt worden, dass in keiner der Messreihen das Worst-Case-Szenario gemessen wurde, wenn die Geräte gerade aufeinander ausgerichtet wurden. Bei jedem Scheinwerfer musste das Messgerät in der Position sowie Winkel verändert werden, um den Worst-Case-Fall aufzunehmen. Dies erschwert die Messungen und den Vergleich von Messwerten zu anderen Studien ungemein, da die Messungen kaum reproduzierbar sind. Ein Grund dafür ist, dass nicht mit angegeben werden kann in welchen exakten Winkeln das Messgerät zur Quelle ausgerichtet ist. Um eine genaue Gefahrenanalyse durchzuführen, sollte jedoch darauf geachtet werden, dass geschaut wird unter welchen Bedingungen die höchsten Gefährdungswerte ausgegeben werden und wie hoch diese tatsächlich sind. Durch den Fakt, dass bereits kleine Veränderungen der einzelnen Ausrichtung zueinander große Unterschiede entstehen können, ist es zudem mehr oder weniger unmöglich eine genaue Gefahrenanalyse mit einem Messgerät in der Hand durchzuführen. Dieses kann über die Hand nicht so genau wie nötig positioniert und ruhig gehalten werden.

Es hat sich zudem herausgestellt, dass große flächige Leuchten wie das ARRI SkyPanel X eher als unproblematisch zu betrachten sind. Obwohl sie eine so große Fläche aufspannen und bis zu großen Entfernungen als große Quelle betrachtet werden müssen, da die Strahldichten nicht allzu hoch sind.

Zudem hat die Messreihe zur Leuchtdichte L_v sowie die Ergebnisse aus den Messungen zuvor gezeigt, dass die Leuchtdichte in nicht jedem Fall gleichbleibend ist bis zum Punkt, an dem der Quellwinkel $\alpha = 11$ mrad erreicht ist. Die Leuchtdichte L_v kann bereits im Vorhinein abnehmen und die bisherigen Annahmen sollten diesbezüglich genauer überprüft werden.

Zudem zeigt sich, dass die Laser-Engine wie bereits zuvor erwartet das größte Gefahrenpotenzial besitzt. Diese besitzt auch in größeren Entfernungen noch kurze Expositionsdauern, bevor es zur Grenzwertüberschreitung kommt, sodass die Quelle auch dort noch in RG2 klassifiziert werden muss. Nach Herstellerangaben in näheren Umgebungen sogar in RG3. LED-Quellen sind momentan nicht in der Lage diese Klassifizierung zu erreichen, zumindest solange sie als Weißlichtquelle genutzt werden und ein breitbandiges Spektrum erzeugen.

6.6. Kritische Würdigung der Messungen

Bei den Messungen haben sich einige Punkte herausgestellt, welche kritisch betrachtet werden müssen.

Zunächst sei gesagt, dass die Messungen nicht reproduzierbar sind. Zwar sind die Positionen des Messgerätes über den Industrieroboter wieder zu erreichen, jedoch ist die optische Bank nicht so gebaut, dass der Scheinwerfer bei einer erneuten Messung dieselbe Position finden würde. Die Entfernung sowie die Ausrichtung werden per Hand eingestellt. Somit wird es einem quasi unmöglich gemacht dieselbe Position noch einmal zu finden, da es durch kleinste Änderungen bei der Ausrichtung bereits zu großen Unterschieden in den Messwerten kommen kann.

Ein weiterer Punkt ist, dass keine Messung zur Bestimmung der Größe der scheinbaren Quelle stattgefunden hat. Dies war zeitlich nicht im Rahmen dieser Arbeit möglich, daher wurde der Linsendurchmesser zur Berechnung des aufgespannten Winkels α der Quelle genutzt. Da im Bereich der thermischen Netzhautgefährdung der Quellwinkel α mit entscheidend für die Gefährdung ist, sind die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig. Es kann dadurch zu einer Überbewertung der tatsächlichen Gefährdung kommen.

Die Funktion der JETI LiVal-Software, die es ermöglicht mehrere Messungen durchzuführen, aus denen das arithmetische Mittel gebildet wird, wurde erst zu spät bemerkt und daher nur bei der Messreihe zur Leuchtdichtemessung L_v angewendet. Diese Funktion ermöglicht es fundiertere Messergebnisse zu erhalten, da die Werte von mehreren Messungen berücksichtigt werden und nicht nur ein einzelner Wert. So lassen sich Messunsicherheiten minimieren und Schwankungen in den Messergebnissen werden eher verhindert.

Weiterhin war die Messtechnik nur für einen Teil der Messungen gut geeignet. Der JETI Specobs 1211UV ist trotz der beiden zugehörigen ND-Filtern bei einigen Messungen an seine Kapazitätsgrenze gelangt und konnte die Messung nicht erfolgreich durchführen. Zudem hat der Messwinkelaufsatz für 1,7 mrad gefehlt, um einige Scheinwerfer final einer Risikogruppe zuordnen zu können. Daher ist die Bewertung einiger Scheinwerfer nicht vollends möglich gewesen.

Auch am Gerät Gigahertz-Optik X1-3 in Kombination mit dem Messkopf XD-45-HB und dem Tubusaufsatz gibt es Kritik. Einerseits wird das Wirkungsspektrum der Blaulichtgefährdung durch einen Filter nur nachempfunden, wodurch eine gewisse Messunsicherheit entsteht. Außerdem schwankt das Messergebnis aufgrund der Anordnung der drei Blaulicht-Photodioden im Messkopf je nach radialer Lage des Messgerätes. Jeder Punkt am Messkopf sieht daher einen etwas anderen Bereich der Quelle, da die Photodioden nicht im Zentrum, sondern rund um das Zentrum angeordnet sind.¹⁰⁶

¹⁰⁶ (AUVA 2011), S. 53

7. Praxisnahe Evaluationsmethoden

Im folgenden Kapitel werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, wie es in der Praxis ermöglicht werden soll zügig eine aussagekräftige Bewertung zur Netzhautgefährdung durch optische Strahlung durchzuführen.

7.1. Welche Scheinwerfer müssen detailliert betrachtet werden?

Entscheidend für eine Grenzwertüberschreitung ist, dass die Scheinwerfer in Blickrichtung der Menschen liegen. Wenn dies nicht der Fall ist, kann auch keine Grenzwertüberschreitung stattfinden. Bei Beleuchtung von vorne besteht daher ein höheres Risiko im Vergleich zur Beleuchtung von der Seite, hinten oder oben. Sobald Akteure für eine längere Zeit in eine Richtung schauen oder die Quellen oftmals im Blickfeld haben, kann es zu Grenzwertüberschreitungen kommen. Liegen die Scheinwerfer nicht im Blickfeld, müssen diese nicht im Detail evaluiert werden.¹⁰⁷

Klassische Halogenscheinwerfer sind in Bezug auf Netzhautschädigungen als ungefährlich zu betrachten. Anders hingegen Entladungslampen, sowie LED- und Laser-Engines, diese sind alle in der Lager Grenzwerte zu überschreiten. Im Regelfall sind hierbei gerade Spot- oder Beam-Quellen kritisch zu betrachten. Flächenleuchten hingegen sind unter normalen Umständen als nicht so gefährlich einzustufen.¹⁰⁸

7.2. Vereinfachte Beurteilungsmethode für Weißlichtquellen

Aus dem Grund, dass Strahldichtemessungen kompliziert und aufwendig sind und zudem teure Messgeräte benötigen, wurde ein vereinfachter Beurteilungsansatz zur photochemischen Netzhautschädigung von Bauer entwickelt und veröffentlicht. Dieser basiert auf einer einfachen Messung der Beleuchtungsstärke E_v mit einem Luxmeter sowie der Kenntnis der Farbtemperatur und dem aufgespannten Winkel der Quelle. Mit Hilfe der Daten soll sich auf einfache Weise die maximale Expositionsdauer berechnen lassen. Die Formel lautet:

$$t_{max} = (K_{B,v} \cdot E_v)^{-1} \begin{cases} 100 \text{ J m}^{-2} & \text{für } \alpha < 11 \text{ mrad} \\ 7,85 \text{ kJ m}^{-2} & \text{für } 11 \text{ mrad} \leq \alpha < \gamma = 100 \text{ mrad} \\ 785 \text{ kJ m}^{-2} & \text{für } \alpha \geq \gamma = 100 \text{ mrad} \end{cases} \quad (30)$$

Der Faktor $K_{B,v}$ beschreibt das Verhältnis zwischen den Blaulichtgewichteten Werten sowie den photometrischen Werten, es gilt:

$$K_{B,v} = \frac{E_B}{E_v} = \frac{L_B}{L_v} \quad (31)$$

Dieser Faktor ist abhängig von der Farbtemperatur. Auf der Gleichung basierend führt ein höherer $K_{B,v}$ Wert bei gleichbleibendem E_v zu einem höheren E_B und somit zu einer kürzeren maximalen Expositionsdauer t_{max} .¹⁰⁹

¹⁰⁷ (AUVA 2011), S. 86 f

¹⁰⁸ (AUVA 2011), S. 103 f

¹⁰⁹ (Bauer, Beurteilung der Blaulichtgefährdung durch Weißlichtquellen 2023), S. 2 f

Eine kleine Übersicht der einzelnen $K_{B,v}$ Werte zu einzelnen Farbtemperaturen ist in Tabelle 13 zu finden. Noch mehr Farbtemperaturen sowie die entsprechenden $K_{B,v}$ Werte sind in Tabelle 20 (Anhang 10.2) dargestellt. Die Formel ist nur in der Lage maximale Expositionsdauern t_{max} für einen Empfangswinkel von $\gamma = 11$ mrad und 100 mrad zu berechnen, der Empfangswinkel von $\gamma = 1,7$ mrad wird nicht berücksichtigt.

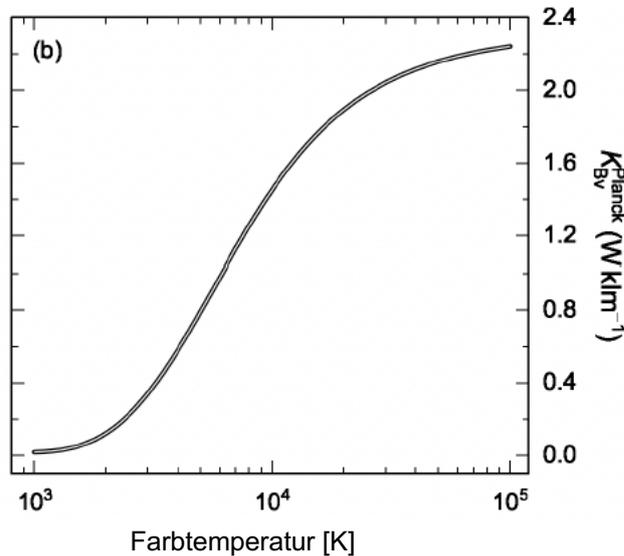


Abbildung 47: Abhängigkeit des Faktors $K_{B,v}$ von der Farbtemperatur; Quelle: (Bauer 2022), S. 24

Tabelle 13: Übersicht $K_{B,v}$ Werte für einzelne Farbtemperaturen; Quelle: (Bauer, Beurteilung der Blaulichtgefährdung durch Weißlichtquellen 2023), S. 3

CCT	$K_{B,v}$	CCT	$K_{B,v}$	CCT	$K_{B,v}$
2 400	0,20	3 800	0,53	5 400	0,87
2 500	0,23	3 900	0,56	5 600	0,91
2 600	0,25	4 000	0,58	5 800	0,94
2 700	0,27	4 100	0,60	6 000	0,98
2 800	0,29	4 200	0,62	6 200	1,01
2 900	0,32	4 300	0,65	6 400	1,04
3 000	0,34	4 400	0,67	6 600	1,07
3 100	0,37	4 500	0,69	6 800	1,10
3 200	0,39	4 600	0,71	7 000	1,13
3 300	0,41	4 700	0,73	7 200	1,16
3 400	0,44	4 800	0,75	7 400	1,18
3 500	0,46	4 900	0,77	7 600	1,21
3 600	0,49	5 000	0,79	7 800	1,23
3 700	0,51	5 200	0,83	8 000	1,26

Nach Angabe von Bauer ist die Beurteilung zur Gefahr der photochemischen Netzhautgefährdung somit sowohl durch Strahldichte-, Bestrahlungsstärke- und Beleuchtungsstärkemessung möglich. Dabei sollen die einzelnen Beurteilungsverfahren spezifische, jedoch vergleichbare messtechnische und rechnerische Unsicherheiten haben.¹¹⁰

Ein Ziel dieser Bachelorarbeit ist es auch, die Formel von Bauer zu überprüfen und eine Einschätzung zu geben inwieweit diese für die Praxis geeignet ist. Daher wurden einige Berechnungen mit der Formel zu vorhandenen Messwerten durchgeführt, die nun folgen.

7.2.1. Ergebnis-Vergleich mit Messwerten von Scholl

In dem Abschlussbericht von Scholl zum Vorhaben „Vermessung und Bewertung von Bühnen – Scheinwerfern hinsichtlich der Schädigung von Auge und Haut – BoSS“ aus dem Jahr 2022 sind sehr viele Messwerte für unterschiedliche Scheinwerfer enthalten. Diese wurden genutzt, um einen Vergleich zu schaffen zwischen den maximalen Expositionsdauern t_{max} , die auf den direkt gemessenen L_B Werten bei einem Messwinkel $\gamma = 11$ mrad basieren und den maximalen Expositionsdauern, welche mit Hilfe der zuvor vorgestellten Formel 30 berechnet wurden. Alle genutzt Messwerte, sind aus den Messungen mit 4 m Abstand entnommen worden.

¹¹⁰ (Bauer, Beurteilung der Blaulichtgefährdung durch Weißlichtquellen 2023), S. 4

Es wurden unterschiedliche Methoden zur Berechnung der maximalen Expositionszeit t_{max} genutzt, um einen möglichst breiten Vergleich aufzustellen. Zum einen wurde der Faktor $K_{B,v}$ über das Verhältnis von E_B zu E_v bestimmt (Formel 31), zum anderen über die Farbtemperatur der Quelle, sofern diese mit angegeben wurde oder über die Herstellerinformationen herausgefunden werden konnte. Zudem wurden sowohl Berechnungen mit dem Quellwinkel α durchgeführt, welcher sowohl über den Linsendurchmesser bestimmt wurde als auch mit den entsprechenden Quellwinkeln der scheinbaren Quellen der jeweiligen Geräte (Formel 9). Alle Daten zur Auswertung sind in Tabelle 14 einzusehen.

Es ist festzustellen, dass die Formel durchaus hilft, eine grobe Richtung zur Abschätzung der maximale Expositionsdauer zu geben. Bei einigen Beispielen passen die berechneten Werte sehr gut zu den gemessenen, wie zum Beispiel beim SGM P5 oder aber auch beim Elation Smarty Hybrid. Bei diesem wird eine maximale Expositionsdauer t_{max} von 0,42 s vorhergesagt und auch gemessen. Es gibt aber auch Geräte bei denen die Berechnung weit neben den gemessenen Zeiten lagen, als Beispiele seien hier der ETC Source Four LED LUSTR+2 sowie der Martin Mac Viper – Profile genannt, bei dem eine maximale Expositionszeit t_{max} von 5,64 s gemessen wurde, die Berechnungen hingegen 16,24 s ergeben haben.

Eine genauere Einschätzung ist nicht möglich, da die Unterschiede der bestimmten maximalen Expositionszeit aus den L_B -Werten sowie die über die Formel berechnete Zeit sich zu sehr voneinander unterscheiden. Im Allgemeinen findet über die Berechnungen mit dem Linsendurchmesser eher eine Unterbewertung der tatsächlichen Gefahr statt, während der Durchmesser der scheinbaren Quelle zu einer Überbewertung führt. Des Weiteren führen die Berechnungen mit der Farbtemperatur zu einer niedrigeren maximalen Expositionszeit t_{max} im Vergleich zu Berechnungen mit dem Verhältnis aus E_B zu E_v . In den $K_{B,v}$ -Werten, die abhängig vom CCT sind, ist vermutlich ein Sicherheitsfaktor eingebaut, wodurch dies zu erklären wäre.

7.2.2. Ergebnis-Vergleich mit eigenen Messwerten

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Beleuchtungsstärke E_v Messwerte wurden mit der Formel 30 von Bauer ausgewertet bezüglich der maximalen Expositionsdauer t_{max} . Mit den Zeiten soll ein Vergleich mit den aus der JETI LiVal Software stammenden Zeiten stattfinden.

Die gesamte Auswertung ist in Tabelle 16 einzusehen. Zudem sind die maximalen Expositionenzeiten noch einmal in Tabelle 15 zusammengefasst. Auffällig am Ergebnis ist, dass die maximalen Expositionenzeiten in einer Entfernung von 4 m deutlich dichter beieinander liegen als in der Entfernung von einem Meter. Nach der Auswertung über die Formel von Bauer sind die Quellen in fast allen Fällen in einem Abstand von einem Meter deutlich sicherer als bei einer Entfernung von 4 m. Die direkten Messergebnisse zeigen jedoch nicht in jedem Fall denselben Trend an, beim ARRI SkyPanel X Open-Face beispielsweise wurde eine deutlich höhere Gefährdung im Abstand von einem Meter festgestellt. Dies könnte daran liegen, dass hier nur ein kleiner Bereich eines LED-Chips betrachtet wurde und sich mit einer blauen LED im Messbereich deutlich höhere Werte ergeben. Dies wird über die Formel nicht berücksichtigt, da von einem CCT von 20.000 K ausgegangen wird und nicht einer blauen LED, wodurch $K_{B,v}$ deutlich größer sein müsste. Ähnliches gilt für den Randbereich der Messung des Ayrton Kyalami, hier liegt die Farbtemperatur nicht mehr bei 9.000 K, weshalb $K_{B,v}$ ebenfalls größer angenommen werden müsste für eine sinnvolle Bewertung.

Einzig beim ARRI L7-C liegen, sowie dem ARRI SkyPanel X mit Hyperoptic liegen die Zeiten einigermaßen dicht beieinander.

Tabelle 15: Zusammenfassung Vergleich maximale Expositionenzeiten zwischen Messergebnissen und Berechnungen, eigens aufgenommene Messwerte

Gerät	tmax Messungen	tmax Berechnung
Arri L7-C 1m	461	541
Arri L7-C 4m	387	431
Arri L7-C 1m -1M	514	756
Arri L7-C 4m -1M	429	573
Arri SkypanelX OF 1m	309	10248
Arri SkypanelX OF 4m	9000	8267
Arri SkypanelX Hyperoptic 1m	281	1653
Arri SkypanelX Hyperoptic 4m	335	382
ETC S4 LED Lustr+2 OF 1m	1759	622
ETC S4 LED Lustr+2 OF 4m	497	1056
ETC S4 LED Lustr+2 26° 1m	OVL	561
ETC S4 LED Lustr+2 26° 4m	267	507
JB Lighting P12 Profile 1m	OVL	262
JB Lighting P12 Profile 4m	OVL	20
Robe Spider 1m	37	778
Robe Spider 4m	40	72
Ayrton Kyalami Gerade	15,95	2
Ayrton Kyalami Worst-Case	5,21	150

Für eine bessere Datenlage wurde daher noch ein Vergleich mit einigen Messwerten aus dem Abschlussbericht von Scholl zum Vorhaben „Vermessung und Bewertung von Bühnen – Scheinwerfern hinsichtlich der Schädigung von Auge und Haut – BoSS“ durchgeführt, bei dem ebenfalls unterschiedliche Abstände betrachtet wurden. Die Auswertung wird in Tabelle 18 aufgezeigt. Außerdem ist in Tabelle 17 erneut eine Zusammenfassung der maximalen Expositionszeiten gegeben. Auch hier findet eine starke Unterbewertung der tatsächlichen Gefährdung in einer Entfernung von einem Meter statt, wie bei den vier ausgewählten Scheinwerfern zu sehen ist. Im Abstand von 4 m ist zumindest eine grobe Einschätzung anhand der Formel möglich. In dieser Auswertung wurde zusätzlich eine Entfernung von 8 m berücksichtigt, hierbei findet erneut eher eine Unterbewertung der Gefahr statt, wobei diese nicht so groß ausfällt wie in der Entfernung von einem Meter, dies ist in allen vier Fällen so.

Der Effekt, dass die Formel von Bauer die Gefährdung im Vergleich zu den gemessenen maximalen Expositionszeiten teils deutlich unterbewertet, kann lediglich über die Faktorberechnung erklärt werden. In Fall 3. ($\alpha \geq \gamma = 11 \text{ mrad}$) besitzt der Quellwinkel α eine entscheidende Rolle ($785 \text{ kJ m}^{-2} \alpha^2$). Der Quellwinkel α ändert sich je nach Entfernung, wodurch sich ebenfalls der Faktor stark verändert.

Die neu entwickelte Formel sollte nach den vorherig gesammelten Erkenntnissen nur sehr vorsichtig oder gar nicht genutzt werden. Diese besitzt aktuell zu viele Unklarheiten, wodurch die berechneten Zeiten stark von den gemessenen abweichen. Bevor diese Formel tatsächlich zum Einsatz genutzt wird, sollten noch weitere Überprüfungen dieser stattfinden.

Tabelle 17: Zusammenfassung Vergleich maximale Expositionszeiten zwischen Messergebnissen und Berechnungen, Scholl

Gerät	tmax Messungen	tmax Berechnung
Arri L7-C 1m	388,50	771,59
Arri L7-C 4m	364,40	555,16
Arri L7-C 8m	n.m.	n.m.
JB Lighting P18 1m	16,00	20,06
JB Lighting P18 4m	11,98	16,70
JB Lighting P18 8m	14,32	15,70
JB Lighting P12 Wash 1m	27,47	126,83
JB Lighting P12 Wash 4m	26,25	79,74
JB Lighting P12 Wash 8m	33,90	74,43
Martin Mac Viper - Profile 1m	5,71	24,58
Martin Mac Viper - Profile 4m	5,64	1,38
Martin Mac Viper - Profile 8m	9,67	15,01
GLP X4 Impression 1m	42,18	169,75
GLP X4 Impression 4m	23,38	16,94
GLP X4 Impression 8m	39,48	102,29

Tabelle 18: Berechnungen zur Formel von Bauer mit Messwerten von Scholl, Abhängigkeit der Entfernung; die Messwerte von Scholl im blauen Bereich, die Berechnungen im grünen

Formeln		$\alpha = \frac{d}{r}$		$t_{max} = \frac{H_B}{L_B} = \frac{10^6}{L_B}$		$t_{max} = (K_{B,v} \cdot E_v)^{-1} \begin{cases} 100 J m^{-2} \\ 7,85 kJ m^{-2} \\ 785 kJ m^{-2} \alpha^2 \end{cases}$		$Faktor Fall 3 = 785 \frac{kJ}{m^2} \cdot \alpha^2$	
Gerät	Ev [klux]	Ev [lux]	Linsendurch α [rad]	CCT [K]	L_B 11mrad Messung	tmax Messungen	K _(B,v)	Faktor	tmax Berechnung
Arri L7-C 1m	30,91	3,09E+04	0,175	0,175	6250	2,57E+03	1,008	24041	771,59
Arri L7-C 4m	2,685	2,69E+03	0,175	0,04375	6250	2,51E+03	1,008	1503	555,16
Arri L7-C 8m	n.m.	n.m.	0,175	0,021875	6250	n.m.	1,008	376	n.m.
JB Lighting P18 1m	943,5	9,44E+05	0,165	0,165	7000	6,25E+04	1,129	21372	20,06
JB Lighting P18 4m	70,85	7,09E+04	0,165	0,04125	7000	6,89E+04	1,129	1336	16,70
JB Lighting P18 8m	18,84	1,88E+04	0,165	0,020625	7000	6,98E+04	1,129	334	15,70
JB Lighting P12 Wash 1m	118,3	1,18E+05	0,145	0,145	6000	3,64E+04	1,1	16505	126,83
JB Lighting P12 Wash 4m	11,76	1,18E+04	0,145	0,03625	6000	3,61E+04	1,1	1032	79,74
JB Lighting P12 Wash 8m	3,15	3,15E+03	0,145	0,018125	6000	2,95E+04	1,1	258	12,44
Martin Mac Viper - Profile 1m	641,9	6,42E+05	0,14	0,14	6000	1,75E+05	0,975	15386	24,58
Martin Mac Viper - Profile 4m	714,3	7,14E+05	0,14	0,035	6000	1,23E+05	0,975	962	1,38
Martin Mac Viper - Profile 8m	16,43	1,64E+04	0,14	0,0175	6000	1,03E+05	0,975	240	15,01
GLP X4 Impression 1m	160,9	1,61E+05	0,225	0,225	10000	2,37E+04	1,455	39741	169,75
GLP X4 Impression 4m	100,8	1,01E+05	0,225	0,05625	10000	2,72E+04	1,455	2484	16,94
GLP X4 Impression 8m	4,172	4,17E+03	0,225	0,028125	10000	2,53E+04	1,455	621	102,29

7.3. Kegeldiagramm

Am wohl hilfreichsten ist das so genannte Kegeldiagramm, wobei es sich hier um ein abstandsabhängiges Expositionszeit-Diagramm handelt. Eine detaillierte Gefahrenanalyse, die vom Hersteller zur Verfügung gestellt wird, kann enorm helfen bei der Gefährdungsbeurteilung und komplizierte Messungen verhindern.

Im Datenblatt sollten im besten Fall alle Informationen zur potenziellen Gefahr gegenüber optischer Strahlung mit bereitgestellt werden.¹¹¹

Lux	8620	2202	973	554	
Durchmesser [m]	2,5	5,0	7,5	10,0	
Aktinisches UV	-----> 8 h				max. Expositions- dauer
UVA	36 min -----> 3,5 h -----> 8 h				
Blaulicht	1,5 min -----> 22 min -----> 3 h				“Starrzeit”

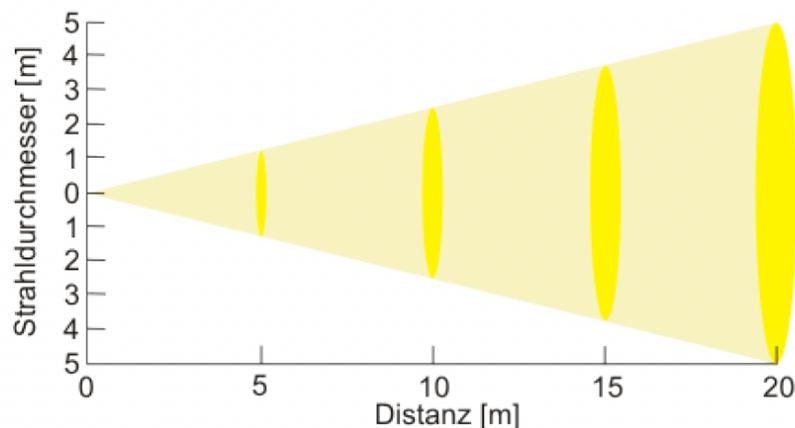


Abbildung 48: Datenblatt eines Scheinwerfers mit Kegeldiagramm-Darstellung; Quelle: (AUVA 2011), S. 101

Durch die Kenntnis der maximalen Expositionszeiten zu den jeweiligen Abständen kann leicht überprüft werden, inwieweit es in der Praxis zu einer Grenzwertüberschreitung kommen könnte. Es muss jedoch auch hierbei darauf geachtet werden, dass für unterschiedliche Expositionszeiten unterschiedliche Empfangswinkel γ gelten. Es lässt sich jedoch auch so bereits eine erste grobe Gefährdungsanalyse durchführen.¹¹²

Das vorliegende Kegeldiagramm ist jedoch nicht geeignet, um eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen, da hierbei angenommen wird, dass die Gefährdung von Beginn an mit der Entfernung abnimmt. Dies ist nicht der Fall, sondern die Gefährdung bleibt bis zu einem gewissen Punkt gleich, der je nach Größe leuchtenden Fläche unterschiedlich ist. Erst danach beginnt die maximale Expositionsdauer t_{max} mit zunehmender Entfernung zu sinken. Im Kegeldiagramm kann dies jedoch auch berücksichtigt und angegeben werden. Wird dies getan, ist eine sinnvolle Gefährdungsbeurteilung möglich.

Das Datenblatt sollte dann sinnvollerweise auch mit der thermischen Gefährdung ergänzt werden, um auch hierfür eine einfache Gefährdungsbeurteilung durchführen zu können.

¹¹¹ (AUVA 2011), S. 100

¹¹² (AUVA 2011), S. 101 f

7.4. Regelungen kleine Quellen

Werden kleine Quellen mit einem Quellwinkel $\alpha < 11$ mrad betrachtet, ist die Gefährdungsanalyse zur Blaulichtgefährdung deutlich einfacher durchzuführen, da mit der Bestrahlungsstärke gearbeitet werden kann. Dies erleichtert die Messungen ungemein, da Messungen zur Strahldichte deutlich komplizierter und aufwendiger sind.

Es gibt eine Faustregel, um schnell abschätzen zu können, ob es sich um eine kleine oder große Quelle handelt. Verdeckt der Fingernagel des kleinen Fingers bei ausgestrecktem Arm die Lichtquelle, so handelt es sich um eine kleine Quelle, ansonsten um eine große. Hierbei liegt der Vorteil auch darin, dass die tatsächlich strahlende Fläche des Scheinwerfers berücksichtigt wird und nicht die vielleicht deutlich größere Linse.¹¹³ Dieses abschätzen des Quellwinkels sollte gerade bei sehr hellen Quellen nur mit Schutzbrille durchgeführt werden, um auf der sicheren Seite zu sein, dass keine Expositionsgrenzwertüberschreitung stattfindet.

Über die alternative Methode, welche in Abschnitt 5.2.3. beschrieben wird, lässt sich die Gefährdung und die Strahldichte L_B über die Bestrahlungsstärke E_B bestimmen. Somit kann zügig eine Beurteilung durchgeführt werden, jedoch wird auch hierfür ein Messgerät benötigt, welches in der Lage ist, die spektral gewichtete Bestrahlungsstärke E_B auszugeben.

Es gibt jedoch auch eine Variante bei der lediglich die Beleuchtungsstärke E_v gemessen werden muss, was mit jedem handelsüblichen Luxmeter möglich ist, welche jedoch nur für Weißlichtquellen gelten. Die DIN IEC/TR 62778 kann zur Hilfe gezogen werden, diese ist im Abschnitt 4.4. zusammengefasst. Mit Hilfe dieser ist mit Kenntnis der Beleuchtungsstärke E_v und der Farbtemperatur sofort eine Unterscheidung möglich, ob ein Gerät in RG1 oder RG2 eingeordnet werden muss im Abstand der Messung. Damit entscheidet sich auch, ob das Gerät weiter untersucht werden sollte oder nicht, da in RG1 im Normalfall keine Grenzwertüberschreitung stattfindet. In RG2 kann hingegen deutlich eher eine Überschreitung stattfinden. Wichtig hierbei ist, dass in der zu betrachtenden Entfernung in der Leistungsverteilungskurve des Scheinwerfers der höchste Beleuchtungsstärkewert E_v aufgenommen wird. Ansonsten kann es zur Unterbewertung der tatsächlichen Gefährdung kommen.

Die zwei anzuwendenden Methoden haben ihre Vor- und Nachteile. Die alternative Methode ist in der Lage auch andere Quellen als Weißlichtquellen zu bewerten, dafür ist die Messung jedoch auch etwas aufwendiger bzw. es wird anderes Messequipment benötigt als bei einer Beleuchtungsstärkenmessung. Die einfachste Variante zur Beurteilung bietet die Norm DIN IEC/TR 62778, um eine Einteilung in eine Risikogruppe durchzuführen. Wenn ein Gerät in RG2 eingeteilt wird, sollte jedoch in jedem Fall eine weitere Analyse durchgeführt werden, um herauszufinden wie lang die maximale Expositionsdauer ist, da die Unterschiede in RG2 von 100 s bis 0,25 s sehr groß sein können.

¹¹³ (VBG 2020), S. 21

7.5. Handliche Messgeräte

Es gibt mittlerweile einige Messgeräte, welche für den mobilen Gebrauch bestimmt sind und die Möglichkeit besitzen bei Messungen die Blaulichtgefährdung zu beurteilen. Als Beispiele seien hier das Handspektrometer von UPRtek MK350S Premium sowie das GL SPECTIS 5.0 TOUCH von GLOptic genannt. Auch das Gigahertz-Optik X1-3 gilt als Handmessgerät, wobei auf die Problematiken dieses Messgerätes bereits im Vorhinein eingegangen wurde.

Das UPRtek MK350S Premium basiert auf der DIN IEC 62778 Norm. Es ist ein Sensor verbaut, der den Spektralbereich von 380 nm bis 780 nm abdeckt. Das Messgerät bietet die Möglichkeit die gewichtete Bestrahlungsstärke E_B zu messen, sowie die Möglichkeit zur Einteilung in die Risikogruppen.¹¹⁴

Anders hingegen das GL SPECTIS 5.0 TOUCH, welches nach der Norm DIN EN 62471 arbeitet. Das Gerät von GLOptic verwendet einen Sensor, der in der Lage ist im Bereich von 200 nm bis 1050 nm Daten aufzunehmen. Auch dieses Gerät bietet die Funktion einer sofortigen Risikogruppeneinteilung.¹¹⁵

Die Geräte bieten auf der einen Seite eine schnelle und mobile Möglichkeit mit einer Gefährdungsbeurteilung durchzuführen, aber sie bergen auch eine gewisse Gefahr. Wichtig bei der Benutzung solcher Geräte ist es, dass den nutzenden Menschen klar ist, dass die Geräte lediglich dafür geeignet sind kleine Quellen zu bewerten. Zudem kann es schwierig sein, die Messgeräte exakt genug auszurichten, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Per Hand kann dies zu Problemen führen, da bereits durch kleine Ausrichtungsveränderungen deutlich andere Werte hervorgerufen werden können. Sind diese Faktoren nicht bekannt, kann es schnell zu einer falschen Einschätzung bezüglich der Blaulichtgefährdung kommen.



Abbildung 49: UPRtek MK350S; Quelle: (United Power Research Technology Corporation kein Datum)



Abbildung 50: GL SPECTIS 5.0; Quelle: (GL OPTIC POLSKA Sp. z o.o. 2023)

¹¹⁴ (United Power Research Technology Corporation 2021)

¹¹⁵ (GL OPTIC POLSKA Sp. z o.o. 2023)

7.6. Aufklärungsarbeit

Wie auch in anderen Bereichen ist es immer hilfreich Menschen, die mit den Geräten arbeiten und in der Branche beschäftigt sind über Gefahren aufzuklären und für diese zu sensibilisieren. Dies führt zu einem sicheren Umgang und einem besseren Verständnis gegenüber den Gefahren und wie diesen entgegengewirkt werden.

Die Thematik der photochemischen und thermischen Netzhautgefährdung wird innerhalb der Branche viel diskutiert, wobei auch in der Allgemeinbevölkerung seit vielen Jahren über nachteilige Wirkungen durch die Bestrahlung von Licht geredet wird. Hierbei werden häufig Themen durcheinandergebracht und Dinge nicht korrekt dargestellt. Der Begriff „Blaulichtgefährdung“ wird häufig hinsichtlich der Darstellung des Risikos für die Netzhaut und dem Einfluss auf das allgemeine Wohlbefinden ungenau verwendet. Dieser sollte nur dann genutzt werden, wenn es tatsächlich um das photochemische Risiko geht.¹¹⁶

Damit möglichst viele Menschen aus der Branche vernünftig über die Gefahren informiert sind, macht es Sinn Aufklärungsarbeit in diesem Bereich zu leisten. Dies kann im Rahmen von veröffentlichten Berichten, Workshops oder Vorträgen erreicht werden. Ein Beispiel für solche Aufklärungsarbeit hat auf der Prolight + Sound 2024 stattgefunden. Dort gab es einen Informationsstand, das sogenannte „LightLab“, an dem täglich Vorträge zur Gefährdung durch optische Strahlung in deutscher und englischer Sprache stattgefunden haben, welche von dem Lichtlabor der HAW Hamburg ausgearbeitet wurden. Die Resonanz auf die Vorträge hat gezeigt, dass die Thematik hochaktuell ist. Viele Besuchende haben geäußert, dass sie Probleme haben die Gefährdung tatsächlich abschätzen zu können und glücklich über die Informationen waren.



Abbildung 51: LightLab auf der Prolight + Sound 2024; Quelle: eigene Darstellung

¹¹⁶ (CIE 2019)

8. Schutzmaßnahmen

In diesem Kapitel der Arbeit geht es um mögliche Schutzmaßnahmen vor der photochemischen und thermischen Netzhautgefährdung. Generell sollten Schutzmaßnahmen nach dem TOP-Prinzip angewandt werden, was bedeutet, die Schutzmaßnahmen nach der folgenden Reihenfolge umzusetzen:

1. Technische Schutzmaßnahmen
2. Organisatorische Schutzmaßnahmen
3. Persönliche Schutzausrüstung (PSA)¹¹⁷

Auf einige der Schutzmaßnahmen wird im Folgenden eingegangen.

8.1. Technische Schutzmaßnahmen

Durch technische Schutzmaßnahmen sollen Schutzmaßnahmen an der Quelle dazu führen, dass eine Reduzierung der Exposition bei den Beschäftigten eintritt.¹¹⁸ So könnten Scheinwerfer beispielsweise gedimmt oder der Öffnungswinkel vergrößert werden, was jeweils zur Reduktion der Netzhautgefährdungen führt, solange dies für den entsprechenden Anwendungszweck möglich ist.¹¹⁹ Auch die sinnvolle Anordnung von Scheinwerfern führt zu einem geringeren Risiko. So können Scheinwerfer, die über 6° auseinanderliegen als zwei Quellen betrachtet werden. Innerhalb der 6° summieren sich die einzelnen Emissionen auf und müssen gemeinsam betrachtet werden.¹²⁰

8.2. Organisatorische Schutzmaßnahmen

Bei organisatorischen Schutzmaßnahmen handelt es sich um raum- oder zeitorganisatorische Maßnahmen, welche dazu beitragen eine Verminderung der Exposition von inkohärenter Strahlung zu erwirken. Dazu gehört beispielsweise die Unterweisung von Bühnenpersonal sowie das Anbringen von Kennzeichnungen und Warnsignalen.¹²¹

Menschen, die am Arbeitsplatz inkohärenter optischer Strahlung ausgesetzt sind, sollten ihres Blickverhaltens unterwiesen werden. Sie sollten niemals direkt in einen Scheinwerfer schauen beziehungsweise stark blendende Scheinwerfer versuchen aus ihrem Sichtfeld zu halten, um eine Abbildung auf der Netzhaut zu verhindern. Das Einleuchten der Scheinwerfer sollte über den Schatten durchgeführt werden, um Blicke in die Quelle ebenfalls zu vermeiden.¹²²

¹¹⁷ (AUVA 2011), S. 107

¹¹⁸ (Weiskopf 2018), S. 61

¹¹⁹ (AUVA 2011), S. 108

¹²⁰ (AUVA 2011), S. 87

¹²¹ (Weiskopf 2018), S. 61 f

¹²² (AUVA 2011), S. 108

8.3. Persönliche Schutzmaßnahmen

Wenn die technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen nicht ausreichen, um die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu gewährleisten, sind geeignete individuelle Maßnahmen, wie zum Beispiel persönliche Schutzausrüstung (PSA) anzuwenden. Die PSA muss individuell nach den Arbeitsbedingungen auf die Beschäftigten ausgewählt werden und auf die Wirksamkeit geprüft worden sein.¹²³

Es gibt sowohl Schutzbrillen als auch Kontaktlinsen, welche in der Lage sind Blaulicht herauszufiltern, die damit für Technik-Personal und darstellende Menschen geeignet sind.¹²⁴

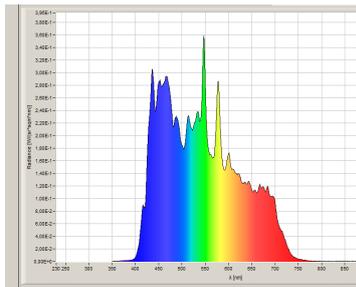


Abbildung 52: Spektrum einer Entladungslampe; Quelle: Fabian Oving

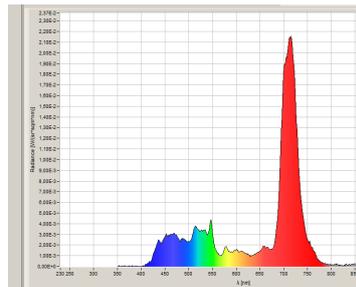


Abbildung 53: Spektrum einer Entladungslampe mit Filterung durch ein Tiffen-Grauglas; Quelle: Fabian Oving

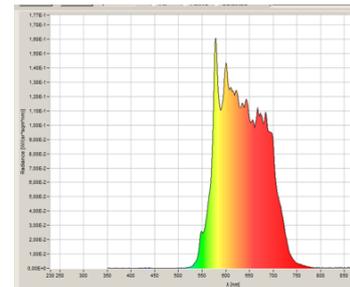


Abbildung 54: Spektrum einer Entladungslampe mit Filterung durch eine blaulichtfilternde Brille; Quelle: Fabian Oving



Abbildung 55: Tiffen-Grauglas; Quelle: Fabian Oving



Abbildung 56: Blaulichtfilternde Brille (Terminator); Quelle: Fabian Oving

In den Abbildungen 52 bis 54 ist aufgezeigt inwieweit ein Tiffen-Grauglas oder eine blaulichtfilternde Schutzbrille das Auge schützen können. Ausgegangen von dem Spektrum einer Entladungslampe filtert das Grauglas einen großen Teil der Strahlung im Bereich von 400 nm bis ca. 675 nm heraus. Es wird zwar noch Strahlung in diesem Bereich hindurchgelassen, jedoch nur noch in deutlich geringeren Mengen. Bei der Schutzbrille mit orangenen Gläsern hingegen wird der komplette Bereich von 350 nm bis ungefähr zu 525 nm abgeschnitten und so gut wie gar keine optische Strahlung hindurchgelassen. Somit sind beide Schutzvarianten geeignet, um das Risiko einer photochemischen und thermischen Netzhautgefährdung zu verringern, da die Strahlung aus den entscheidenden Wellenlängenbereichen herausgefiltert wird.

¹²³ (Weiskopf 2018), S. 62

¹²⁴ (AUVA 2011), S. 109

Wichtig hierbei ist zu erwähnen, dass nicht unbedingt jede Brille mit orangefarbenen Gläsern hilft, nur weil sie orange ist. Beim Kauf sollte auf die Herstellerangaben geachtet werden, ob es sich wirklich um eine blaulichtfilternde Brille handelt, welche im entsprechenden Wellenlängenbereich die Strahlung herausfiltert.

Schutzbrillen können gerade für Menschen, die häufig dicht an Geräten arbeiten sinnvoll sein, um das Risiko vor Netzhautgefährdungen zu verringern, da die Gefährdung nah am Gerät am höchsten ist. Sowohl für Servicepersonal bei Wartungen als auch für Beleuchtungspersonal beim Einrichten der Geräte handelt es sich somit um eine geeignete Variante zum Schutz. Es gibt geeignete blaulichtfilternde Brillen kostengünstig zu kaufen, wodurch keine hohe Investition zum Schutz des Personals nötig ist.

9. Fazit & Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es herauszufinden, welche praxisnahen Methoden es aktuell zur Einschätzung der photochemischen und thermischen Netzhautgefährdung gibt, die eine Gefährdungsbeurteilung erleichtern und inwieweit diese tatsächlich dazu geeignet sind. Dazu wurden zunächst die entsprechenden Grundlagen aufgezeigt, sowie ein Überblick über die aktuellen Normen der optischen nicht-kohärenten Strahlung gegeben. In den Messungen wurden einige Scheinwerfer mit LED-Engines in Bezug auf die photochemische und thermische Netzhautgefährdung untersucht. Weiterhin wurde eine Laser-Engine bezüglich der Blaulichtgefährdung betrachtet. In der letzten Messreihe wurde die Abhängigkeit zwischen der Leuchtdichte L_v sowie der Entfernung untersucht.

Die zugrundeliegende Fragestellung, inwieweit es aktuell geeignete Möglichkeiten gibt, um praxisnah eine Gefährdungsanalyse für die photochemische und thermische Netzhautgefährdung durchzuführen, konnte beantwortet werden. Es gibt einige Ansätze, die sinnvoll erscheinen, wie beispielsweise die DIN EN 62778. Einige Ideen sind jedoch mit Vorsicht zu betrachten, wie das Kegeldiagramm, welches nur in einer bestimmten Form sinnhaft ist. Zudem sind auch Methoden, die nach aktuellem Stand eher nicht für eine Beurteilung sinnvoll erscheinen betrachtet worden, wie die Formel von Bauer zur Beurteilung der Blaulichtgefährdung durch Weißlichtquellen. Alle diese vereinfachten Bewertungsmethoden beziehen sich lediglich auf die Blaulichtgefährdung. Für die thermische Netzhautgefährdung hingegen gibt es bisher keine nennenswerten Vereinfachungen zur Gefährdungsanalyse. Handmessgeräte, die es zur Messung der Blaulichtgefährdung gibt, sind nach aktuellem Stand nicht gut dafür geeignet, da eine Ausrichtung per Hand nicht in der nötigen Genauigkeit machbar ist. Für kleine Quellen ist eine erste Abschätzung über die DIN EN 62778 aktuell am sinnvollsten, wobei auch große Quellen als sicher betrachtet werden können, solange sie die Grenzwerte der Beleuchtungsstärke E_v für die entsprechende Farbtemperatur nicht überschreiten.

Strahldichtemessungen sind sehr kompliziert, zudem wird teures Messequipment benötigt, weshalb diese Methode nicht als praxisnah gilt. Zudem sind direkte Messungen im Bühnen- und Studiobereich kaum reproduzierbar, weshalb die Messungen schwierig zu kontrollieren sind und mögliche Fehler bei dieser schwer zu identifizieren sind. Bei Einschätzung der thermischen Gefährdung sollte zudem angegeben werden, ob die Gewichtungsfunktion $R(\lambda)$ nach der DIN EN 62471 oder der ICNIRP verwendet wurde, da durch diese große Unterschiede in der Bewertung entstehen können.

Es ist klargeworden, dass die Leuchtdichte L_v nur bedingt unabhängig von der Entfernung bis zum Grenzpunkt der kleinen Quelle ist. Wird die Quelle mit offenem FOV betrachtet, besitzt die Leuchtdichte eher eine exponentielle Abnahme. Ansonsten besteht die Theorie, dass die Leuchtdichte so lange konstant bleibt bis der Betrachtungswinkel γ größer als der Quellwinkel α ist.

Die Laser-Engines erreichen Leuchtdichten, die über klassische Leuchtmittel sowie LEDs nicht erreichbar sind. Daher gilt bei diesen Geräten besondere Vorsicht. Bei der richtigen Verwendung können Laser-Engines jedoch eine ähnliche Gefährdung vorweisen, wie die anderer Leuchtmittel.

Für eine Gefährdungsbeurteilung müssen lediglich Scheinwerfer betrachtet werden, die im Blickfeld liegen, da nur von diesen eine tatsächliche Gefahr ausgeht. Werden die Geräte so positioniert, dass sie mit mehr als 6° auseinanderhängen, können sie als einzelne Quellen betrachtet werden. Ansonsten summiert sich die Gefährdung auf, da die Quellen gemeinsam auf der Netzhaut dargestellt werden. Spotquellen sind im Regelfall gefährlicher einzuschätzen als Flächenleuchten.

Mit Hilfe von Schutzbrillen ist es gerade Menschen möglich sich zu schützen, die täglich mit den Geräten arbeiten und sich in kurzen unüblichen Distanzen zum Gerät aufhalten.

Im Verlauf der Arbeit sind einige Punkte aufgekommen, die nicht endgültig abgearbeitet werden konnten und daher noch weitere Untersuchungen interessant wären. Insgesamt herrscht aktuell viel Bewegung in der Thematik, weshalb Annahmen sich ändern können.

Die Arbeit hat die Frage aufgeworfen, inwieweit die gleichbleibende Leuchtdichte L_v abhängig vom Betrachtungswinkel γ sowie der Quellgröße α ist. Hierzu wären weitere Messungen mit unterschiedlichen Betrachtungswinkeln γ und Quellen interessant. So könnte bestätigt oder widerlegt werden, dass die Leuchtdichte L_v bis $\gamma \geq \alpha$ konstant bleibt.

Zudem wurden einige Probleme der Formel von Bauer zur vereinfachten Bewertungsmethode für Weißlichtquellen aufgezeigt. Es wäre spannend, ob es möglich wäre diese so anzupassen, dass sie tatsächlich für eine grobe Gefährdungseinschätzung geeignet wäre, um die Analyse zu erleichtern.

Nach aktuellem Stand gibt es keine vereinfachte oder praxisnahe Bewertungsmöglichkeit der thermischen Netzhautgefährdung. Für diesen Bereich müssten zunächst Ansätze entwickelt werden, wie eine vereinfachte Methode möglich wird.

10. Anhang

10.1. Spektrale Werte der Gewichtungsfunktionen

Tabelle 19: Spektrale Gewichtungsfunktion für Netzhautschädigungen; Quelle: (Weiskopf 2018), S. 13

Wellenlänge nm	Blaulicht- Gewichtungsfunktion $B(\lambda)$ nach DIN 62471	Thermische- Gewichtungsfunktion $R(\lambda)$ nach DIN 62471	Thermische- Gewichtungsfunktion $R(\lambda)$ nach ICNIRP Guidelines 2013
300-380	0,01		
380	0,01	0,1	0,01
385	0,013	0,13	0,0125
390	0,025	0,25	0,025
395	0,05	0,5	0,05
400	0,10	1,0	0,10
405	0,20	2,0	0,20
410	0,40	4,0	0,40
415	0,80	8,0	0,80
420	0,90	9,0	0,90
425	0,95	9,5	0,95
430	0,98	9,8	0,98
435	1,00	10,0	1,0
440	1,00	10,0	1,0
445	0,97	9,7	1,0
450	0,94	9,4	1,0
455	0,90	9,0	1,0
460	0,80	8,0	1,0
465	0,70	7,0	1,0
470	0,62	6,2	1,0
475	0,55	5,5	1,0
480	0,45	4,5	1,0
485	0,40	4,0	1,0
490	0,22	2,2	1,0
495	0,16	1,6	1,0
500	0,10	1,0	1,0
>500-600	$10^{0,02(450-\lambda/nm)}$	1,0	1,0
>600-700	0,001	1,0	1,0
>700-1050		$10^{0,02(700-\lambda/nm)}$	$10^{0,02(700-\lambda/nm)}/500$
>1050-1150		0,2	0,2
>1150-1200		$0,2 \cdot 10^{0,02(1150-\lambda/nm)}$	$0,2 \cdot 10^{0,02(1150-\lambda/nm)}$
>1200-1400		0,02	0,02

10.2. $K_{B,v}$ Werte in Abhängigkeit der Farbtemperatur

Tabelle 20: $K_{B,v}$ Werte zu den jeweiligen Farbtemperaturen T in K; Quelle: (Bauer, Blue-Light Hazard Risk Assessment of Incoherent High-Power Spotlights 2022), S. 25

T	$K_{B,v}^{\text{Planck}}$	T	$K_{B,v}^{\text{Planck}}$	T	$K_{B,v}^{\text{Planck}}$	T	$K_{B,v}^{\text{Planck}}$
2000	0.123	3600	0.485	5400	0.869	8600	1.324
2100	0.142	3700	0.508	5600	0.906	8800	1.344
2200	0.161	3800	0.532	5800	0.941	9000	1.364
2300	0.182	3900	0.555	6000	0.975	9200	1.384
2400	0.203	4000	0.578	6200	1.008	9400	1.402
2500	0.226	4100	0.601	6400	1.040	9600	1.420
2600	0.248	4200	0.623	6600	1.071	9800	1.438
2700	0.271	4300	0.645	6800	1.100	10 000	1.455
2800	0.294	4400	0.667	7000	1.129	10 250	1.475
2900	0.318	4500	0.689	7200	1.157	10 500	1.494
3000	0.342	4600	0.710	7400	1.183	10 750	1.513
3100	0.366	4700	0.731	7600	1.209	11 000	1.531
3200	0.390	4800	0.752	7800	1.233	11 250	1.548
3300	0.413	4900	0.772	8000	1.257	11 500	1.565
3400	0.437	5000	0.792	8200	1.280	11 750	1.581
3500	0.461	5200	0.831	8400	1.302	12 000	1.596

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektrum optische Strahlung; Quelle: (Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsgestaltung Nordrhein-Westfalen kein Datum)	2
Abbildung 2: Anatomie des menschlichen Auges; Quelle: (Kuratorium Gutes Sehen e.V. kein Datum)	2
Abbildung 3: Aufbau der Netzhaut; Quelle: (BVmed - Bundesverband Medizintechnologie e.V. kein Datum)	3
Abbildung 4: Tag- und Nachtsehen; Quelle: (hofstein GmbH kein Datum)	4
Abbildung 5: Übersicht photometrische Größen; Quelle: (Prediger Lichtberater kein Datum)	7
Abbildung 6: Quellwinke α ; Quelle: (Udocičić 2013), S. 29	8
Abbildung 7: Quell- und Empfangswinkel γ ; Quelle: (Udocičić 2013), S. 31	9
Abbildung 8: Spektrum eines Halogenleuchtmittels; Quelle: Fabian Oving	10
Abbildung 9: Spektrum einer Entladungslampe; Quelle: Fabian Oving	11
Abbildung 10: Spektrum einer Weißlicht LED-Engine; Quelle: Fabian Oving	13
Abbildung 11: Spektrum einer Multispektralen LED-Engine; Quelle: Fabian Oving	14
Abbildung 12: Spektrum einer Weißlicht Laser-Engine; Quelle: Fabian Oving	15
Abbildung 13: Optische Strahlung im Auge; Quelle: (Udocičić 2013), S. 25	16
Abbildung 14: Spektrale Wirksamkeit zur photochemischen Netzhautgefährdung nach DIN 62471; Quelle: (Janßen 2016), S. 33	22
Abbildung 15: Spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautgefährdung nach DIN 62471; Quelle: (Janßen 2016), S. 33	24
Abbildung 16: Vergleich der Gewichtungsfunktionen der thermischen Netzhautgefährdung; Quelle: (Weiskopf 2018), S. 12	25
Abbildung 17: Zeichen für "Warnung vor optischer Strahlung" für RG 2 und 3 Geräte; Quelle: (VBG 2020), S. 8	26
Abbildung 18: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 in Abhängigkeit von Farbtemperatur und Leuchtdichte; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 14	29
Abbildung 19: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 in Abhängigkeit von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 15	29
Abbildung 20: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 mit Sicherheitsfaktor und Nennwertpunkten in Abhängigkeiten von Leuchtdichte und Farbtemperatur; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 27	30
Abbildung 21: Unterscheidung zwischen RG1 und RG2 mit Sicherheitsfaktor und Nennwertpunkten in Abhängigkeiten von Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 28	30
Abbildung 22: Messprinzip Messung der spektralen Bestrahlungsstärke; Quelle: (Udocičić 2013), S. 58	32
Abbildung 23: Effekt des "Verschmierens" der Abbildung einer Quelle; Quelle: (Udocičić 2013), S. 59	34
Abbildung 24: Unterschiedliche Empfangswinkel für unterschiedliche Expositionsdauern, weiß/ grau = Blickfläche, hellblau = LED; Quelle: (Udocičić 2013), S. 60	34
Abbildung 25: Messprinzip der Strahldichtemessung nach der Standardmethode; Quelle: (Udocičić 2013), S. 62	35
Abbildung 26: Schematische Darstellung des alternativen Strahldichte-Messverfahren; Quelle: (Udocičić 2013), S. 63	37
Abbildung 27: Heatmap der Leuchtdichte; Quelle: (Scholl 2022), S. 60	39
Abbildung 28: Scheinbare Quellengröße beim Schwellenwert von 50%; Quelle: (Scholl 2022), S. 60	39
Abbildung 29: BLH-bewertete Strahldichteverteilung eines Scheinwerfers mit Fresnel-Linse. Links: Zoom-Einstellung "Flood"; Rechts: Zoom-Einstellung "Spot"; Quelle: (Christoph Schierz 2019), S. 52	39
Abbildung 30: JETI Specobs 1211UV mit 100mrad Aufsatz; Quelle: (JETI 2021), S. 1	41
Abbildung 31: JETI LiVal Auswertungssoftware; Quelle: eigene Darstellung	41
Abbildung 32: Gigahertz-Optik X1-3 mit XD-45-HB Messkopf und Tubusaufsatz; Quelle: (Gigahertz Optik GmbH kein Datum)	42
Abbildung 33: Horst 900 mit horstPanel; Quelle: (fruitcore robotics GmbH 2022)	42
Abbildung 34: Messaufbau LED-Engines, Quelle: eigene Darstellung	43
Abbildung 35: Messaufbau Skizze LED-Engines; Quelle: eigene Darstellung	43
Abbildung 36: Arri L7-C; Quelle: (Scholl 2022), S. 79	44
Abbildung 37: ARRI SkyPanel X mit HyperOptic, Quelle: (Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. 2023)	46
Abbildung 38: ETC SourceFour LED Series 2; Quelle: (ETC Connect kein Datum), S. 1	48
Abbildung 39: Robe Spiider; Quelle: (Scholl 2022), S. 88	49
Abbildung 40: JB-Lighting P12 Profile; Quelle: (JB-Lighting Lichtanlagentechnik GmbH 2019), S. 1	51
Abbildung 41: Skizze Messaufbau Laser-Engine; Quelle: eigene Darstellung	52

Abbildung 42: Messgerätehalterung vor Ayrton Kyalami; Quelle: Fabian Oving	52
Abbildung 43: Ayrton Kyalami; Quelle: (Ayrton SAS 2024)	53
Abbildung 44: Expolite TourLED Power 4 CM+W; Quelle: (Expolite 2022)	54
Abbildung 45: Spektren der Messungen; Quelle: eigene Darstellung	55
Abbildung 46: Grafische Darstellung der Messergebnisse; Quelle: eigene Darstellung	55
Abbildung 47: Abhängigkeit des Faktors KB, v von der Farbtemperatur; Quelle: (Bauer 2022), S. 24	59
Abbildung 48: Datenblatt eines Scheinwerfers mit Kegeldiagramm-Darstellung; Quelle: (AUVA 2011), S. 101	66
Abbildung 49: UPRtek MK350S; Quelle: (United Power Research Technology Coporation kein Datum)	68
Abbildung 50: GL SPECTIS 5.0; Quelle: (GL OPTIC POLSKA Sp. z o.o. 2023)	68
Abbildung 51: LightLab auf der Prolight + Sound 2024; Quelle: eigene Darstellung	69
Abbildung 52: Spektrum einer Entladungslampe; Quelle: Fabian Oving	71
Abbildung 53: Spektrum einer Entladungslampe mit Filterung durch ein Tiffen-Grauglas; Quelle: Fabian Oving	71
Abbildung 54: Spektrum einer Entladungslampe mit Filterung durch eine blaulichtfilternde Brille, Quelle: Fabian Oving	71
Abbildung 55: Tiffen-Grauglas; Quelle: Fabian Oving	71
Abbildung 56: Blaulichtfilternde Brille (Terminator); Quelle: Fabian Oving	71

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Risikogruppen gemäß DIN EN 62471; Quelle: (Udocičić 2013), S. 54</i>	27
<i>Tabelle 2: Einteilung in Risikogruppen nach DIN EN 62471; Quelle: (Scholl 2022), S. 68</i>	28
<i>Tabelle 3: Leuchtdichtewerte, die eine Risikogruppe nicht größer als RG1 ergeben; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 27</i>	30
<i>Tabelle 4: Beleuchtungsstärkewerte, die eine Risikogruppe nicht größer als RG1 ergeben; Quelle: (DIN e.V. 2014), S. 28</i>	30
<i>Tabelle 5: Empfangswinkel zur Messung der Strahldichte bei der Beurteilung von Netzhautgefährdungen; Quelle: (Udocičić 2013), S. 61</i>	35
<i>Tabelle 6: Auswertungsergebnisse ARRI L7-C</i>	45
<i>Tabelle 7: Auswertungsergebnisse ARRI SkyPanel X</i>	47
<i>Tabelle 8: Auswertungsergebnisse ETC SourceFour LED Lustr+ 2</i>	49
<i>Tabelle 9: Auswertungsergebnisse Robe Spider</i>	50
<i>Tabelle 10: Auswertungsergebnisse JB-Lighting P12 Profile HP</i>	51
<i>Tabelle 11: Messwerte Ayrton Kyalami</i>	53
<i>Tabelle 12: Ergebnisse Leuchtdichtemessung</i>	55
<i>Tabelle 13: Übersicht KB, ν Werte für einzelne Farbtemperaturen; Quelle: (Bauer, Beurteilung der Blaulichtgefährdung durch Weißlichtquellen 2023), S. 3</i>	59
<i>Tabelle 14: Berechnung zur Formel von Bauer mit Messwerten von Scholl</i>	61
<i>Tabelle 15: Zusammenfassung Vergleich maximale Expositionszeiten zwischen Messergebnissen und Berechnungen, eigens aufgenommene Messwerte</i>	62
<i>Tabelle 16: Berechnungen zur Formel von Bauer mit den eigens aufgenommenen Messwerten; eigens aufgenommene Messwerte im roten Bereich, die Berechnungen im grünen</i>	63
<i>Tabelle 17: Zusammenfassung Vergleich maximale Expositionszeiten zwischen Messergebnissen und Berechnungen, Scholl</i>	64
<i>Tabelle 18: Berechnungen zur Formel von Bauer mit Messwerten von Scholl, Abhängigkeit der Entfernung; die Messwerte von Scholl im blauen Bereich, die Berechnungen im grünen</i>	65
<i>Tabelle 19: Spektrale Gewichtungsfunktion für Netzhautschädigungen; Quelle: (Weiskopf 2018), S. 13</i>	75
<i>Tabelle 20: KB, ν Werte zu den jeweiligen Farbtemperaturen T in K; Quelle: (Bauer, Blue-Light Hazard Risk Assessment of Incoherent High-Power Spotlights 2022), S. 25</i>	76

Literaturverzeichnis

- Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. „ARRI.“ 20. 09 2023.
<https://www.arri.com/resource/blob/341262/e55242c6535912778f7f39d38f490c90/arri-skypanel-x-data-sheet-en-data.pdf> (Zugriff am 20. 05 2024).
- Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. „ARRI.“ 10 2022.
<https://www.arri.com/resource/blob/31172/2d3bbe6eec36665c8f190c0ad8657ce3/15-31899-0-arri-l-series-l7-user-manual-de-data.pdf> (Zugriff am 19. 05 2024).
- Arnold & Richter Cine Technik GmbH & Co. „ARRI.“ 11 2023.
<https://www.arri.com/resource/blob/353688/25f148550b3c5ca3eb24199e6b4f9f61/15-0049708-arri-skypanel-x-operating-manual-de-data.pdf> (Zugriff am 2024. 05 22).
- AUVA. *Optische Strahlung: Gefährdung durch sichtbares Licht und Infrarotstrahlung*. Merkblatt, Wien: AUVA, 2011.
- Ayrton SAS. „Ayrton.“ 03 2024. <https://www.ayrton.eu/wp-content/uploads/2024/03/Kyalami-User-InformationUser-Information.pdf> (Zugriff am 19. 05 2024).
- Ayrton. 03 2024. <https://www.ayrton.eu/wp-content/uploads/2024/03/Kyalami-2.png> (Zugriff am 23. 05 2024).
- Bauer, Stefan. *Beurteilung der Blaulichtgefährdung durch Weißlichtquellen*. baa: Bericht kompakt, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2023.
- Bauer, Stefan. *Blue-Light Hazard Risk Assessment of Incoherent High-Power Spotlights*. baa: Report, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2022.
- BVmed - Bundesverband Medizintechnologie e.V. *BV-Med*. kein Datum.
https://www.bvmed.de/wbt/thumb/kap3_it3.png (Zugriff am 27. 03 2024).
- Christoph Schierz, Rainer Nolte. *Auf dem Weg zu einer vereinfachten Messung der Blaulichtgefährdung durch Bühnenleuchten*. baa: Symposium, Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2019.
- CIE. „CIE Positionspapier zur Gefährdung durch Blaulicht.“ Positionspapier, Wien, 2019.
- DIN e.V. *Anwendung von IEC 62471 zur Beurteilung der Blaulichtgefahr von Lichtquellen und Leuchten*. Berlin: DIN e.V., 2014.
- DIN EN IEC 62471*. VDE, 2004.
- DIN EN IEC 62471-7 (VDE 0837-471-7): 2024-04 Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen Teil 7: Lichtquellen und Leuchten, die hauptsächlich sichtbare Strahlung aussenden*. Berlin: VDE, 2024.
- ETC Connect. „ETC Connect.“ kein Datum.
<https://www.etconnect.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=10737483869> (Zugriff am 23. 05 2024).
- Expolite. *manualslib*. 2022. <https://www.manualslib.de/manual/897342/Expolite-Tourled-Power-4-Mk-1ii.html#manual> (Zugriff am 23. 05 2024).
- fruitcore robotics GmbH. „assets ctfassets.“ 09. 02 2022.
https://assets.ctfassets.net/oxcgt088e20/6p1JF0Dy4bN4sRzFSy1xAK/1e631f89fbe06edc51abf7e106d61339/MA_HORST900-Robotersystem_V3-1_DE_220209.pdf (Zugriff am 09. 05 2024).
- Görlich, Dr. Steffan. „JETI Technische Instrumente GmbH.“ 2018.
<https://www.jeti.com/files/content/support/downloads/papers/davos%20licht2018.pdf> (Zugriff am 08. 05 2024).
- Gigahertz Optik GmbH. *Gigahertz-Optik*. kein Datum. <https://www.gigahertz-optik.com/de/produkt/x1-3/getpdf/> (Zugriff am 19. 04 2024).

- Gigahertz-Optik. kein Datum. <https://www.gigahertz-optik.com/de-de/produkt/xd-45-hb-2/getpdf/> (Zugriff am 19. 04 2024).
- GL OPTIC POLSKA Sp. z o.o. „GLOptic.“ 01 2023. <https://gloptic.com/wp-content/uploads/2023/01/EN-Tech-Datasheet-GL-SPECTIS-5.0-Touch.pdf> (Zugriff am 23. 05 2022).
- Greule, Roland. *Licht und Beleuchtung im Medienbereich*. München: Hanser, 2021.
- hofstein GmbH. *lampe.de*. kein Datum. <https://www.lampe.de/media/cms/magazine/P062/V-Lambda-Kurve-768x462.jpg> (Zugriff am 06. 04 2024).
- Janßen, Marco. *Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung*. baua: Forschungsbericht, Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2016.
- JB-Lighting Lichtanlagentechnik GmbH. „JB-Lighting.“ 01. 07 2019. https://www.jb-lighting.de/download/Handbuch/P12_Handbuch.pdf (Zugriff am 22. 05 2024).
- JETI. „JETI.“ 2021. <https://www.jeti.com/files/content/support/downloads/technical%20notes/TN26%20Optical%20Hazard%20Measurements%20with%20JETI%20specbos%201211UV.pdf> (Zugriff am 13. 05 2024).
- JETI Technische Instrumente GmbH. 2024. https://www.jeti.com/files/content/products/spectroradiometer/Operating_Instructions_JETI_LiVal.pdf (Zugriff am 18. 04 2024).
- Spectroradiometer specobs 1211: Short Instructions*. 06 2021. <https://www.jeti.com/files/content/support/downloads/specbos%201211UV-2.pdf> (Zugriff am 17. 04 2024).
- Kuratorium Gutes Sehen e.V. *Kuratorium Gutes Sehen e.V.* kein Datum. https://www.sehen.de/fileadmin/_processed_/9/3/csm_das-auge-aufbau-augapfel_1c25b11c9d.jpg (Zugriff am 27. 03 2024).
- Lübbe, Eva. *Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung*. Leipzig: Springer, 2013.
- Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsgestaltung Nordrhein-Westfalen. *LIA*. kein Datum. https://www.lia.nrw.de/_meta/Bilder_LIA/Themengebiete/Gesundheitsrisiken/Physikalische_Einwirkungen/Optische_Strahlung/Grafik_optische-Strahlung_Web72dpi_gross.png (Zugriff am 27. 03 2024).
- Mueller, Jens. *Handbuch der Lichttechnik*. Köln: PPVMEDIEN, 2014.
- Pepler, Wjatscheslaw. *Messung und Bewertung für die Allgemeinbevölkerung relevanter optischer Strahlenquellen*. Ressortforschungsbericht, Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz, 2019.
- Prediger Lichtberater. *prediger.de*. kein Datum. <https://prediger.de/media/wysiwyg/Schaubild-Lichtjournal.jpg> (Zugriff am 06. 04 2024).
- Reidenbach, Hans-Dieter. *Gutachten zur biologischen Wirksamkeit gepulster inkohärenter optischer Strahlung*. baua: Gutachten, Neuenkirchen-Seelscheid: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2018.
- Ris, Hans Rudolf. *Beleuchtungstechnik für Praktiker*. Berlin: VDE, 2008.
- Robe. „Robe.“ kein Datum. https://www.robelight.de/res/downloads/user_manuals/User_manual_Robin_Spiider.pdf (Zugriff am 22. 05 2024).
- Scholl, Robert. *Vermessung und Bewertung von Bühnen-Scheinwerfern hinsichtlich der Schädigung von Auge und Haut - BoSS*. Abschlussbericht, Bonn: Hochschule Bonn-Rhein Sieg, 2022.

- Udocičić, L. *Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED)*. baua: Forschungsbericht, Dortmund/Berlin/Dresden: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2013.
- United Power Research Technology Coporation. *UPRtek*. kein Datum.
<https://uprtek.eu.com/handheld-spectrometers/mk350s-premium/> (Zugriff am 27. 05 2024).
- United Power Research Technology Corporation. „UPRtek.“ 02 2021.
https://uprtek.eu.com/wp-content/uploads/2021/02/MK350S_PremiumDM_EN.pdf
(Zugriff am 25. 05 2024).
- VBG. *Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen – Scheinwerfer*. Fachinformation, Hamburg: VBG, 2020.
- Weber, Marko. *Optische Strahlung: UV- und Blaulichtgefährdung von Theater- und Bühnenbeleuchtung*. Report, Wien: AUVA, 2015.
- Weiskopf, Daniela. *Leitfaden "Inkohärente sichtbare und infrarote Strahlung von künstlichen Quellen"*. Leitfaden, Köln: AKNIR, 2018.
- Witting, Walter. *Licht. Sehen. Gestalten*. Basel: Birkhäuser, 2014.
- Y. König, C. Huchzermeyer, H. Drexler. *Blaulichtgefährdung der Augen durch Lichtemittierende Dioden (LED)?* Zeitschrift, Stuttgart: Gentner, 2020.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

Untersuchung praxisnaher Bewertungsmöglichkeiten zur Gefahr photochemischer und thermischer Netzhautschädigungen im Bühnen- und Studiobereich

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Datum

Unterschrift