



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Praktische Untersuchung der Relevanz von Blau- lichtgefährdung in TV-Studios und Theatern

HAW Hamburg
Fakultät Design, Medien und Information
Studiendepartment Medientechnik
Studiengang Medientechnik

vorgelegt von: Malte Kummrow

Matrikelnummer: 2056134

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Roland Greule

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Marc Briede

22.12.2015

Inhalt

Einleitung	1
1. Wahrnehmung von Licht	2
1.1 Licht	2
1.2 Das menschliche Auge	3
1.3 Helligkeitsempfindung	5
2. Künstliche Lichtquellen	6
2.1 Lichttechnische Grundgrößen	6
2.1.1 Lichtstrom	6
2.1.2 Raumwinkel	7
2.1.3 Lichtstärke	7
2.1.4 Beleuchtungsstärke	7
2.1.5 Leuchtdichte	8
2.2 Leuchtmittel	9
2.2.1 Glühlampe	9
2.2.2 Halogenglühlampe	10
2.2.3 Leuchtstofflampe	11
2.2.4 Halogen-Metaldampf Lampe	12
2.2.5 Leuchtdioden (LED)	13
2.2.6 OLED	15
2.3 Scheinwerfer	15
2.3.1 Plankonvexlinsenscheinwerfer und Fresnelscheinwerfer	16
2.3.2 Profilscheinwerfer	17
2.3.3 Parabolspiegel-Scheinwerfer (PAR-Scheinwerfer)	18
2.3.4 Flächen- und Horizontleuchten	19
2.3.5 Moving-Lights	19
2.3.6 Washlight	20
2.3.7 Spotlights	20
2.3.8 Scanner	21

3. Gefährdung durch Lichtquellen	21
3.1 UV-Strahlung und IR-Strahlung	21
3.1.1 Photochemische Schädigung	22
3.1.2 Thermische Schädigung	22
3.2 Blendung	23
3.3 Blaulichtgefährdung	24
3.3.1 Gefährdungsbeurteilung	25
3.3.2 Messung von Bestrahlungsstärke und Strahldichte	28
3.3.3 Parameter der Blaulichtgefährdung	33
4. Eye-Tracking	38
4.1 Aufnahmesysteme	39
4.1.1 Mobile Eye-Tracking Brille	39
4.1.2 Externe Systeme	40
4.2 Software Analyse	40
5. Praxisversuche	43
5.1 Vorversuche	43
5.1.1 Theater Monolog bei 2000 lx / Theater Dialog bei 500 lx	44
5.1.2 Zuschauer mit LED Wand	48
5.1.3 TV Moderator mit Teleprompter bei 1000 lx	50
5.1.4 Fazit	51
5.2 Versuch NDR - Hamburg Journal	52
5.2.1 Aufbau	52
5.2.2 Analyse	53
5.2.3 Fazit	55
5.3 Versuch Thalia Theater	55
5.3.1 Aufbau	56
5.3.2 Analyse	57
5.3.3 Fazit	60
6. Zusammenfassende Betrachtung	61

Anhang	64
Abbildungsverzeichnis	75
Literaturverzeichnis	80
Eigenständigkeitserklärung	83

Einleitung

Aktuell wird von verschiedenen Unfallversicherungen und Messtechnikern darüber beraten, inwieweit der Blaulichtanteil optischer Strahlung von Lichtquellen eine Gefährdung von Personen hervorrufen kann und wie diese davor geschützt werden sollten. Die Blaulichtgefährdung betrifft die Netzhaut des Menschen, die bei langer, intensiver Bestrahlung fotochemisch geschädigt werden kann. In diesem Zusammenhang wurden von der VOPST (Verordnung optische Strahlung) gemäß der EU-Richtlinie 2006/25/EG Emissionsgrenzwerte für Blaulichtgefährdung festgelegt, mithilfe derer die max. Bestrahlungsdauer berechnet werden kann. Diese Grenzwerte beziehen sich dabei auf den direkten Blick in die Lichtquelle. In Bezug auf diese Problematik wurden jedoch bislang noch keine Untersuchungen durchgeführt, die zeigen, wie lange Personen in Scheinwerfer schauen.

Die folgende Arbeit untersucht die Relevanz von Blaulichtgefährdung im Speziellen in TV-Studios und Theatern, um herauszufinden, inwieweit Schauspieler oder Moderatoren von Blaulichtgefährdung betroffen sind.

Zunächst werden im theoretischen Teil der Arbeit Grundlagen der optischen Strahlung sowie die verschiedenen Leuchtmittel und Scheinwerfer aufgeführt und erläutert. Der Hauptteil beschäftigt sich mit der Gefährdung durch künstliche Lichtquellen. Dabei werden speziell die Gefährdungsbeurteilung sowie die verschiedenen Parameter der Blaulichtgefährdung untersucht.

Im praktischen Teil der Arbeit soll mithilfe einer Eye-Tracking Brille herausgefunden werden, ob und wie lange Schauspieler und Moderatoren unter realen Bedingungen in Scheinwerfer oder deren Umfeld schauen und welchen Bestrahlungsstärken die Netzhaut dadurch ausgesetzt ist. Hierzu wurden zunächst vier verschiedene Vorversuche im Lichtlabor der HAW Hamburg durchgeführt, in denen Theater- und TV-Studio Situationen simuliert wurden. Die Hauptversuche fanden im NDR Studio sowie dem Thalia Theater Gaußstraße statt. Hier wurden die Messungen mit Kristina Gruse, Nachrichtensprecherin des Hamburg Journals, und einem Schauspieler des Theaterstücks „Tschick“ durchgeführt.

1. Wahrnehmung von Licht

1.1 Licht

Licht ist ein Teil der elektromagnetischen Strahlung. Für den Menschen visuell als sichtbare Strahlung wahrnehmbar ist nur jenes Spektrum von 380 nm bis 780 nm. Die Grenzen sind hierbei allerdings fließend und von Mensch zu Mensch unterschiedlich.¹

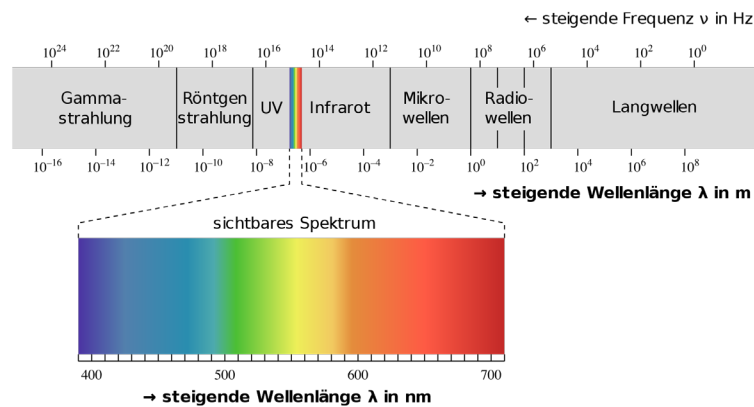


Abb. 1 Elektromagnetisches Spektrum

Dabei unterscheiden sich die Farben durch ihre jeweilige Wellenlänge; vom kurzwelligen blauen Licht über grünes und gelbes Licht mittlerer Wellenlänge bis hin zu langwelligem roten Licht.² Zum Bereich der optischen Strahlung gehören zudem noch die UV-Strahlung (ultraviolette Strahlung) ab etwa 100 nm und die IR-Strahlung (Infrarot Strahlung) bis etwa 10^6 nm, die sich jeweils an das sichtbare Spektrum anschließen.

Ultraviolette Strahlung hat eine Wellenlänge von 100 nm bis 380 nm und kann vom Menschen nicht direkt wahrgenommen werden. Lediglich die Auswirkungen der UV Strahlung, wie Bräunung oder Schädigung der Haut und Augen, können erkannt werden. Man unterscheidet zwischen drei unterschiedlichen UV-Strahlungstypen:

- **UV-C** hat eine Wellenlänge von 100 nm - 280 nm und wird durch die Lufthülle der Erde vollständig absorbiert, sodass sie nicht an der Erdoberfläche ankommt.
- **UV-B** hat eine Wellenlänge von 280 nm - 315 nm und gelangt weitestgehend auf die Erdoberfläche. Sie kann verantwortlich sein für Hauterkrankungen (Sonnenbrand) und Schäden am Auge (grauer Star), zudem regt sie den Aufbau von Vitamin D an.

1 Lübke, E.: Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung, Springer 2013, S. 2.

2 Baker, J.: 50 Schlüsselideen Quantenphysik, Springer 2015, S. 24 ff.

- **UV-A** hat eine Wellenlänge von 315 nm - 380 nm und ist sowohl für Hautallergien als auch für die Bräunung der Haut verantwortlich.³

So wie die sichtbare und die UV-Strahlung ist auch die Infrarotstrahlung für den Menschen sehr wichtig. Sie ist nicht sichtbar und wird durch das Absorbieren des Körpers in Wärme umgewandelt. Die IR-Strahlung kann ebenfalls in drei Bereiche unterteilt werden: IR-A (780 nm-1400 nm), IR-B (1400 nm-3000 nm) und IR-C (3000 nm-1 mm).⁴

1.2 Das menschliche Auge

Das visuelle Sinnesorgan des Menschen ist ein komplexes System, das sich aus vielen Bestandteilen zusammensetzt.

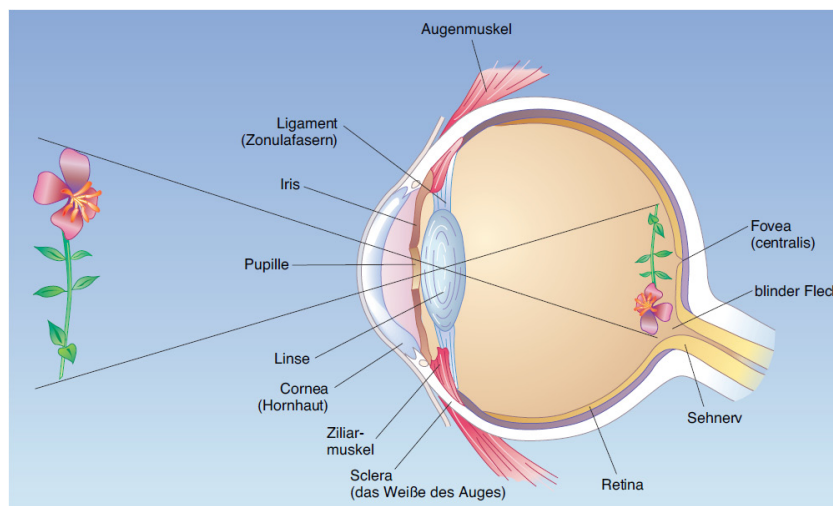


Abb. 2 Das menschliche Auge

Eine Lichtmenge fällt dabei zunächst durch die Hornhaut auf die Iris. Die Hornhaut ist, wie der Name ahnen lässt, vergleichbar mit der Haut des Menschen. Sie schützt das empfindliche Innere des Auges vor äußeren Einflüssen wie beispielsweise Schmutz, Regen, Gase oder Wind. Zudem wird das Licht in der Hornhaut durch ihre gewölbte Form sowie auch in der Linse gebrochen.

Die ringförmigen Muskeln der Iris bestimmen die Größe der Pupille. Diese Öffnung reguliert die einfallende Lichtmenge je nach Intensität der Beleuchtung. Dabei gilt es einen Ausgleich zwischen der Sensitivität, also auch bei schwacher Beleuchtung Dinge zu erkennen, und der Sehschärfe zu finden. So ist es möglich, bei hoher Lichtausbeute mit enger Pupille Objekte auch in größerer

³ <http://www.licht.de/de/trends-wissen/ueber-licht/was-ist-licht/ir-und-uv-strahlung/>

⁴ gemäß DIN 5030 Teil 2

Entfernung scharf zu sehen. Nimmt die Lichtstärke jedoch ab, so wird die Pupillenöffnung größer, sodass möglichst viel Licht auf die Netzhaut treffen kann. Hierdurch wirken Objekte unschärfer und die Tiefenschärfe wird geringer.⁵

Hinter der Iris befindet sich die Linse, welche aus mehreren transparenten Schichten aufgebaut ist. Diese kann durch Muskelkontraktion der Ziliarmuskeln in der Form verändert werden. Durch diese Formveränderung ist es möglich, nahe oder weiter entfernte Objekte auf der Retina (Netzhaut) zu fokussieren. Will man einen nahen Gegenstand scharf sehen, so wird die Linse mithilfe der Ziliarmuskeln in eine kugelartige Form gebracht. Dadurch ist die Brechkraft der Linse erhöht und der Gegenstand kann fokussiert werden. Im Gegensatz dazu entspannen sich die Ziliarmuskeln bei der Fokussierung von weiter entfernten Objekten, sodass die Linse abflacht. Diesen Prozess nennt man Akkomodation. Je älter der Mensch wird, desto mehr verringert sich der Spielraum der Linsenverformung. Zudem trübt sich die Linse leicht ein, was zur Folge hat, dass die Linse weniger blaues Licht durchlässt.⁶

Hinter der Linse befindet sich der größte Teil des Auges, der Glaskörper. Er ist mit Kammerwasser, einer klaren, gelatinösen Flüssigkeit gefüllt.

Anschließend trifft der einfallende Lichtstrahl auf die Netzhaut, auch Retina genannt. Hier wird das Licht in elektrische Impulse umgewandelt. Die Retina besteht aus insgesamt fünf verschiedenen Schichten: den Fotorezeptoren, den Horizontalzellen, Bipolarzellen, amakrinen Zellen und den retinalen Ganglienzellen. Die Fotorezeptoren erreicht das Licht als letzte, nachdem es die anderen vier Schichten passiert hat. Auf diese vier Schichten wird hier nicht weiter eingegangen, da diese zu komplex und für das Thema nicht weiter relevant sind. Die Rezeptorzellen Stäbchen und Zapfen bilden zusammen die Schicht der Fotorezeptoren, die für zwei unterschiedliche Arten des Sehens zuständig sind. Insgesamt gibt es etwa 120 Millionen Stäbchen und 6 Millionen Zapfen.⁷ Dennoch liefern die Zapfen die meisten Informationen. Sie ermöglichen es, bei Tageslicht sowohl scharf zu sehen und Details der Umwelt zu liefern, als auch die verschiedenen Wellenlängen des Lichts zu unterscheiden und so Farben wahrzunehmen.

Es gibt dabei drei verschiedene Typen von Zapfen, die jeweils für bestimmte Spektralbereiche des Lichtes empfindlich sind. So sind einige Zapfen für kurze Wellenlängen zuständig, andere für mittlere oder lange. Die Bereiche der verschiedenen Empfindlichkeiten überschneiden sich

5 Pinel, John P.J.: Biopsychologie, Pearson Higher Education 2012, S. 145.

6 Greule, R.: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag 2015, S. 60.

7 Pinel, John P.J.: Biopsychologie, Pearson Higher Education 2012, S. 149 f.

hierbei, sodass die Zapfentypen nicht speziell einer bestimmten Farbe oder Wellenlänge zugeordnet werden können.

In der zentralen Region der Retina befinden sich ausschließlich dicht beieinander liegende Zapfen, die das schärfste Sehen vermitteln. Dieser Punkt wird Fovea Centralis oder auch Gelber Fleck genannt und macht nur etwa 1° auf der Netzhaut aus. Aus diesem Grund sieht man zu einem Zeitpunkt nur einen sehr kleinen Bereich wirklich scharf. Dies fällt allerdings nicht weiter auf, da das Auge etwa alle 0,25 Sekunden einen anderen Punkt fixiert. Auch befinden sich in der Fovea Centralis keine kurzweilig-emfindlichen Zapfen, die überwiegend für den blauen Bereich zuständig sind.⁸

Die Stäbchen können keine verschiedenen Farben registrieren. Sie sind lediglich für die Aufnahme von unterschiedlichen Lichtintensitäten zuständig und lassen somit Helligkeiten unterscheiden. Ist die Lichtintensität beispielsweise nachts gering, werden die Zapfen nicht mehr ausreichend mit Informationen versorgt und man sieht überwiegend mit den Stäbchen. Dies hat allerdings zur Folge, dass keine Farben mehr wahrgenommen werden können und die Detailschärfe geringer wird. Stäbchen sind nur außerhalb der Fovea Centralis vorhanden, dort jedoch in großer Anzahl.

Ein besonderer Teil der Retina ist der blinde Fleck. Hier trifft der Sehnerv, der das Auge mit dem Gehirn verbindet, auf die Netzhaut. An dieser Stelle befinden sich keinerlei Sinneszellen, also weder Zapfen noch Stäbchen und der Mensch ist an dieser Stelle im wahrsten Sinne des Wortes blind. Dies fällt jedoch nicht weiter auf, da zum einen das jeweils andere Auge diesen „fehlenden“ Bereich wahrnimmt und zum anderen das Gehirn Informationen des umliegenden Sehfeldes verbindet.

Auf die weitere Verarbeitung der elektrischen Potenziale im Gehirn wird hier nicht weiter eingegangen.

1.3 Helligkeitsempfindung

Das Helligkeitsempfinden des Menschen ist nicht nur von der Intensivität, sondern auch von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Das bedeutet, dass verschiedene Wellenlängen des Spektrums bei gleicher Intensivität als unterschiedlich hell wahrgenommen werden. So ist bspw. eine viel höhere Strahlungsintensität im blauen Bereich (380 nm - 480 nm), als im grünen Bereich (500 nm - 580 nm) nötig, um den gleichen Helligkeitseindruck zu erzielen. Die max. Empfindlichkeit im Spektrum unterscheidet sich zudem noch vom photopischen (Tagessehen) und skotopischen

⁸ Greule, R.: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag 2015, S. 62 f.

Sehen (Nachtsehen). Die spektralen Empfindlichkeitskurven sind in Abb. 3 für photopisches und skotopisches Sehen dargestellt.

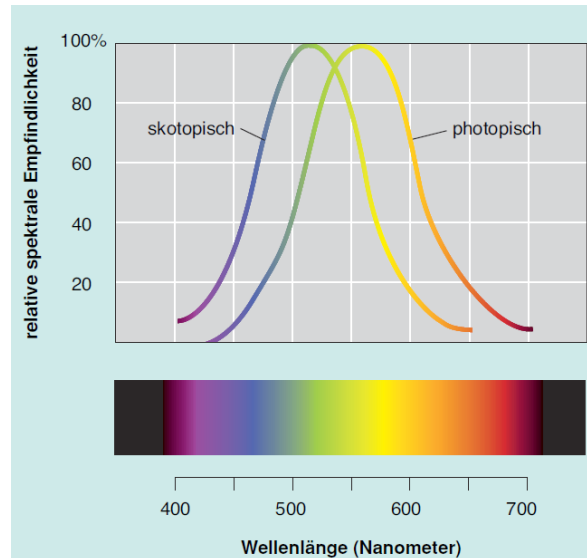


Abb. 3 Relative spektrale Empfindlichkeit

2. Künstliche Lichtquellen

2.1 Lichttechnische Grundgrößen

2.1.1 Lichtstrom

Als Leistungsgröße für eine Lichtquelle ist die physikalische Strahlungsleistung in Watt (W) nicht ausreichend. Sie muss erst mit der wellenlängenabhängigen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet werden. Der daraus resultierende Lichtstrom beschreibt die gesamte Lichtleistung, die von einer Lichtquelle in alle Richtungen abgestrahlt wird.

Formelzeichen: Φ (Phi)

Einheit: Lumen

Zeichen: lm

Der Lichtstrom beschreibt somit, wieviel Licht von einer Lampe ausgeht. Jeder Lampentyp hat dabei einen unterschiedlichen Lichtstrom. So hat beispielsweise eine Allgebrauchsglühlampe (Osram, 150 W) einen Lichtstrom von 2200 lm und eine Natriumdampf-Hochdruck-Lampe (Osram, 150 W) einen Lichtstrom von 14000 lm.⁹

⁹ www.osram.de

2.1.2 Raumwinkel

Der Raumwinkel ist das Maß für einen Lichtkegel, in den der Scheinwerfer sein Licht abstrahlt. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der vom Scheinwerfer beleuchteten Fläche A und dem Quadrat des Abstandes von Scheinwerfer und Fläche r^2 .

Formelzeichen: Ω (Omega)

Einheit: Steradian

Zeichen: sr

Gleichung: $\Omega = \frac{A}{r^2}$

A: beleuchtete Fläche (m^2)

r: Abstand Scheinwerfer beleuchtete Fläche (m)

2.1.3 Lichtstärke

Die Lichtstärke steht im Zusammenhang mit dem Lichtstrom. Allerdings gibt sie nicht die gesamte abgestrahlte Lichtmenge an, sondern nur den Teil des abgestrahlten Raumwinkels in eine bestimmte Richtung. Mit anderen Worten beschreibt die Lichtstärke das Verhältnis von Lichtstrom zum Raumwinkel.

Formelzeichen: I

Einheit: Candela

Zeichen: cd

Gleichung $I = \frac{\Phi}{\Omega}$

2.1.4 Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke gibt die auf eine Fläche auftreffende Menge Licht an. Sie beschreibt also das Verhältnis von Lichtstrom zur Fläche des auftretenden Lichts.

Formelzeichen: E

Einheit: Lux

Zeichen: lx

Gleichung $E = \frac{\Phi}{A}$

Ist der Lichteinfall relativ zur beleuchteten Person oder Fläche schräg, so wird die Beleuchtungsstärke mit dem Cosinus des relativen Winkels ε zur beleuchteten Fläche bewertet.

$$E = E_0 \cos(\varepsilon)$$

Oft ist die Beleuchtungsstärke die messbare Orientierungsgröße bei Fernseh-, Film- und Theaterproduktionen, obgleich diese keinerlei Aussage über die Helligkeit einer Person oder eines Gegenstandes machen kann. Eine klassische Beleuchtungsstärke im Gesicht der zu beleuchtenden Person einer Fernsehsendung liegt beispielsweise bei etwa 800 lx. Weitere Werte für Beleuchtungsstärken sind ca. 100.000 lx an einem sonnigen Sommertag, 500 lx für eine Arbeitsplatzbeleuchtung und ca. 0,25 lx in einer Vollmondnacht.¹⁰

2.1.5 Leuchtdichte

Die Leuchtdichte ist die Grundgröße, die das menschliche Auge wahrnimmt. Sie gibt Aufschluss über den Helligkeitseindruck, der von einem Selbstleuchter oder einer beleuchteten Fläche ausgeht. Die Leuchtdichte bezeichnet das Verhältnis der Lichtstärke zur leuchtenden bzw. beleuchteten Fläche.

Formelzeichen:	L
Einheit:	Candela pro m ²
Zeichen:	cd/m ²
Gleichung:	$L = \frac{I}{\Omega}$

Einige Beispiele für verschiedene Leuchtdichten sind:¹¹

Unterste Grenze für Hellempfindung	1e-9	cd/m ²
Beleuchtete Straße	0,5-2	cd/m ²
Arbeitsplatz im Büro	10-100	cd/m ²
Bildschirme	20-200	cd/m ²
Leuchtstofflampe	4.000-17.000	cd/m ²
Glühlampe matt	20.000-50.000	cd/m ²
Sonne	600.000-1.600.000	cd/m ²

¹⁰ Greule, R.: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag 2015, S. 40.

¹¹ Reader „Lichttechnische Grundlagen“, Aqua Signal 2001, S.15.

2.2 Leuchtmittel

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Leuchtmitteln, die sich u.a. in Wirkungsweise, Spektrum, Leuchtdichte und Haltbarkeit unterscheiden.

So haben einige einen höheren Blauanteil als andere und somit in der Regel auch ein diskontinuierliches Spektrum, was eine Auswirkung auf die Farbwiedergabe zur Folge hat.

2.2.1 Glühlampe

Die Glühlampe oder auch Allgebrauchsglühlampe, wie wir sie heute kennen, wurde 1875 von Edison erfunden. Im Inneren des Glaskolbens wird ein dünner Draht von Strom durchflossen, der heute meist aus Wolfram besteht, da dieses Metall sehr beständig ist und auch bei hohen Temperaturen nicht schmilzt. Der stromdurchflossene Leiter heizt sich solange auf, bis er glüht und Temperaturen von 2.300 °C bis 2.900 °C (2.573 K - 3273 K) entstehen.¹² Dabei wird zum großen Teil Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) und nur zu etwa 5% der Leistung sichtbares Licht emittiert. Die Glühlampe gehört zur Gruppe der Temperaturstrahler. Das heißt, das abgestrahlte Spektrum steht wie bei einem schwarzen Körper, auch plankscher Strahler genannt, in direkter Verbindung zur emittierten Temperatur.

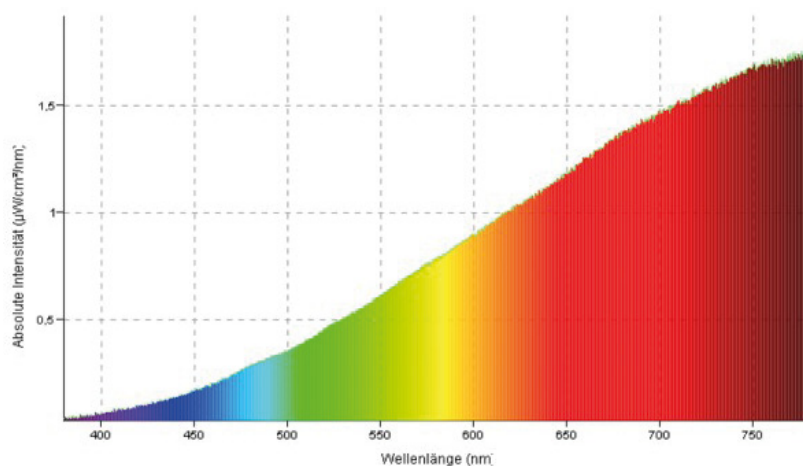


Abb. 4 Spektrum Glühlampe

¹² Moderne Lichtquellen, Strahlenschutzkommission 2010, S. 11.

„Ein heißer Festkörper emittiert ein Strahlungsspektrum, das eng mit seiner Oberflächentemperatur korreliert [...] Je höher die Oberflächentemperatur eines Festkörpers ist, desto mehr Strahlung gibt dieser pro Zeiteinheit ab und desto kurzwelliger ist der spektrale Schwerpunkt der Strahlung (Wien'scher Verschiebungssatz). Die emittierte sichtbare Strahlung (Licht) verändert sich also mit steigender Oberflächentemperatur von Rot über Gelb bis hin zu Blau-Weiß.“¹³

Das Strahlungsspektrum einer Glühlampe ist, wie auch bei der Sonne, kontinuierlich. Da die Oberflächentemperatur jedoch geringer als bei der Sonne (5713 K)¹⁴ ist, liegt die Farbtemperatur eher im rötlichen Bereich. Das Licht wirkt dadurch „wärmer“ als das weiße Sonnenlicht und wird vom Menschen als angenehm und beruhigend wahrgenommen. Das Spektrum ist im Vergleich in den langwelligeren Bereich bishin zur Infrarotstrahlung verschoben, in der das Intensitätsmaximum liegt. Daher ist der Wirkungsgrad einer Glühlampe sehr gering. Nur etwa 5% der elektrischen Leistung wird als sichtbares Licht emittiert, während der Großteil in Wärmestrahlung und Wärmeleitung umgewandelt wird.

2.2.2 Halogenglühlampe

Die Halogenlampe hat eine ähnliche Funktionsweise wie die Glühlampe. Eine Glühwendel aus Wolfram wird stromdurchflossen zum Glühen gebracht. Zusätzlich befindet sich im Glaskolben, der aus beständigem Quarz- oder Hartglas besteht, ein Halogen. Dieses sorgt durch eine chemische Reaktion mit dem verdampften Wolfram dafür, dass die Glühwendel weniger stark beansprucht wird und somit länger bestehen bleibt. Es können einerseits höhere Temperaturen erreicht werden und die Bauform lässt sich deutlich verkleinern, wodurch der Einsatzbereich erweitert wird. Die Temperatur wird zudem erhöht, indem die Infrarotstrahlung von der Beschichtung der

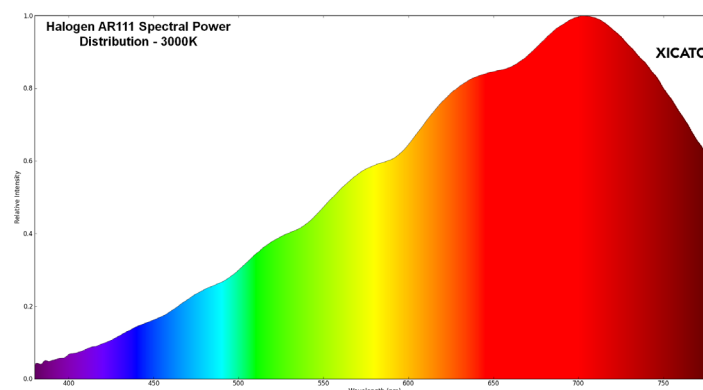


Abb. 5 Spektrum Halogenlampe

13 Greule, R.: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag 2015, S. 107.

14 Unsöld, A.: Physik der Sternatmosphären: Mit besonderer Berücksichtigung der Sonne, Springer 2013, S. 37.

Kolbeninnenfläche zur Glühwendel zurückreflektiert wird. Durch die gesteigerte Temperatur wird im Vergleich zur Glühlampe auch eine höhere Farbtemperatur von etwa 3000 K - 3200 K erreicht, was zur Folge hat, dass das abgestrahlte Licht weniger „warm“ wirkt und das Intensitätsmaximum des Spektrums ein Stück weit mehr zum kurzwelligen Bereich verschoben ist. Außerdem wird die Effizienz und Helligkeit der Halogenglühbirne durch die höheren Temperaturen gesteigert. Von der elektrischen Leistung werden etwa 12,7% als sichtbare Strahlung emittiert und damit doppelt so viel wie bei der Glühlampe. Dennoch wird ebenfalls der größte Teil als Wärmestrahlung abgegeben, was einen weiterhin geringen Wirkungsgrad zur Folge hat.¹⁵

2.2.3 Leuchtstofflampe

Die Leuchtstofflampe gehört zu den Niederdruckentladungslampen. Sie besteht aus einem länglichen Glasrohr, dessen Inneres mit einem Gasgemisch gefüllt ist. Am jeweiligen Ende befindet sich eine Elektrode in Form einer kleinen Glühwendel. Diese heizen das Gasgemisch zunächst vor. Zur Inbetriebnahme der Leuchtstofflampe ist eine Zündspannung des sogenannten Starters erforderlich, mithilfe dessen das Gasgemisch ionisiert und damit elektrisch leitend wird. Dabei entsteht ein Plasma. Dieses strahlt optische Strahlung aus, sobald die Quecksilberatome, die von den freien Elektronen angeregt werden, wieder auf ein niedrigeres Energieniveau zurückfallen. Nur ein kleiner Teil der optischen Strahlung liegt hierbei im sichtbaren Bereich, zum Großteil wird UV-Strahlung emittiert.¹⁶ Die Innenseite der Glasröhre ist mit einem Leuchtstoff beschichtet, der sichtbare Strahlung ausstrahlt, sobald er mit UV-Strahlung in Kontakt gerät. Der restliche Teil an UV-Strahlung wird vom Glas der Röhre absorbiert, sodass nur ein geringer Anteil von der Leuchtstofflampe ausgestrahlt wird.

Die Farbe des Lichtes wird durch den Leuchtstoff oder das Mischverhältnis verschiedener Leuchtstoffe bestimmt. Um weißes Licht zu generieren müssen mindestens drei Leuchtstoffe gemischt werden (3-Banden-Prinzip). Durch additive Farbmischung werden spektrale Anteile im blauen, grünen und roten Bereich gemischt. Dadurch ergibt sich eine Überlagerung von kontinuierlichen spektralen Anteilen mit deutlichen Intensitätsmaxima. Weitere Verfeinerungen der Farbe und der Farbwiedergabe lassen sich durch 4-Banden- oder 5-Banden-Systeme erzielen. Durch verschiedene Mischverhältnisse können so warmweiße (bis 3.300 K), neutralweiße (3.300 K-5.300 K) oder tageslichtweiße (über 5300 K) Leuchtstofflampen angeboten werden.¹⁷

¹⁵ Moderne Lichtquellen, Strahlenschutzkommission 2010, S. 13.

¹⁶ Ris, H.R.: Beleuchtungstechnik für Praktiker, VDE 2013, S. 95 ff.

¹⁷ Moderne Lichtquellen, Strahlenschutzkommission 2010, S. 16.

Der Wirkungsgrad einer Leuchtstofflampe ist um ein Vielfaches höher als bei einer Glühlampe. Es tritt kaum Wärmestrahlung (IR) auf und ein Großteil der elektrische Energie kann in sichtbare Strahlung umgewandelt werden.

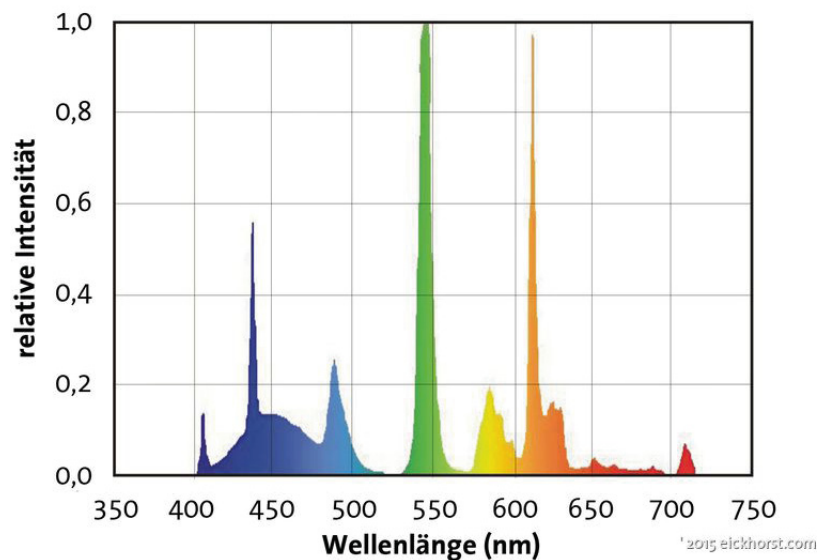


Abb. 6 Spektrum Leuchtstofflampe

2.2.4 Halogen-Metaldampf Lampe

Die Halogen-Metaldampf Lampe gehört zu den Hochdruckentladungslampen. Im Gegensatz zur Leuchtstofflampe liegen die beiden Elektroden des Entladungsgefäßes (auch Brenner genannt) zwischen denen ein Lichtbogen entsteht, nur wenige Millimeter voneinander entfernt. Im Inneren des Brenners befindet sich je nach Lampentyp und Farbtemperatur ein Gasgemisch aus Quecksilber, Natrium, Halogenen, Thallium, Indium und oft auch Seltenen Erden. Für den Zündvorgang ist ein Zündgerät nötig, das eine hohe Spannung von mehreren Kilovolt (bis zu 35 kV)¹⁸ erzeugt, um das Gasgemisch zu ionisieren und elektrisch leitendes Plasma zu erzeugen. Zwischen den beiden Elektroden kann sich nun ein Lichtbogen aufbauen und Licht emittieren. Die Nutzs spannung einer Halogen-Metaldampf Lampe (auch HCL) liegt danach je nach Typ im Bereich von unter 230 V. Ohne Begrenzung würde die Stromstärke stetig steigen und zur Zerstörung der Lampe führen. Um dies zu verhindern, gibt es Vorschaltgeräte, die den Strom begrenzen. Dabei gibt es entweder Drosselvorschaltgeräte, die aus einer Kupferspule mit Eisenkern bestehen, oder elektronische Vorschaltgeräte.

¹⁸ <http://www.osram.de/media/resource/hires/317281/technical-data-sheet-hmi-1200-wdxx-gb.pdf>

Die Halogen-Metaldampf Lampe hat ein quasi-kontinuierliches Spektrum mit einzelnen Spektrallinien. Es ergibt sich eine sehr gute Farbwiedergabe von bis zu $R_a = 96$.¹⁹ Die Farbtemperatur hängt von der Zusammensetzung und dem Verhältnis des Gasgemisches ab und wird von warmweiß 2700 K bis zu tageslichtweiß über 6000 K angeboten.²⁰ Weiterhin gehören die Hochdruckmetaldampflampen neben den LEDs zu den effizientesten Leuchtmitteln mit einer hohen Lichtausbeute von bis zu 95 lm/W (zum Vergleich: eine konventionelle Glühlampe liegt bei ca. 10 lm/W).

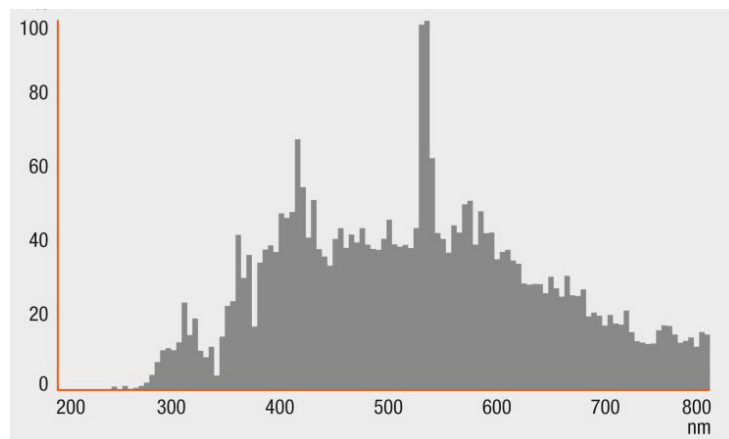


Abb. 7 Spektrum HMI Lampe

Neben der Halogen-Metaldampf Lampe gibt es noch die Quecksilberdampf Lampe und die Natriumdampf Lampe. Im Film-, Fernseh- und Theaterbereich hat OSRAM die HMI-Lampe eingeführt, die eine besonders hohe Farbwiedergabe hat und speziell in Moving Heads und Tageslichtscheinwerfern eingesetzt wird (z.B. HMI 1200 W/DXS).

2.2.5 Leuchtdioden (LED)

Die Licht emittierenden Dioden (LED) sind elektronische Halbleiter-Bauelemente. Der eigentliche Chip der LED besteht aus zwei verschieden dotierten Halbleiterkristallschichten, die aufeinander aufgedampft werden. Erst durch die Dotierung der Halbleiter mit Materialien der chemischen Hauptgruppe III (Erdmetalle) und der Hauptgruppe V (Stickstoff-Phosphor) werden diese elektrisch leitend. Die untere Halbleiterschicht ist n-dotiert, d.h. sie besitzt einen Elektronenüberschuss und ist mit der Kathode verbunden. Die darüberliegende p-dotierte Schicht hingegen weist einen Elektronenmangel auf und ist mit der Anode verbunden. Wird nun eine geringe Spannung in Durchlassrichtung zwischen Anode und Kathode angelegt, fließt ein Strom und die Elektronen wandern von der n-dotierten Schicht in die p-dotierte Schicht über. Diesen Vorgang nennt man Rekombination. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von Licht (Photonen) emittiert. Die

19 <http://www.osram.de/media/resource/HIRES/491272/7520930/powerball-hci-de.pdf>

20 Ris, H.R.: Beleuchtungstechnik für Praktiker, VDE 2013, S. 119.

Strahlung ist dabei nahezu monochromatisch, d.h. nur schmale Bereiche des Spektrums werden abgestrahlt. Das hat zur Folge, dass nur einzelne Wellenlängenbereiche, also einfarbig, dargestellt werden können. Lange Zeit konnten daher nur beispielsweise rote oder grüne LEDs hergestellt werden. Erst ab 1995 war es technisch möglich, auch blaue LEDs herzustellen und den Einsatzbereich somit maßgeblich zu erweitern.²¹

Um weißes Licht durch LEDs zu erzeugen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Zum einen kann man durch additive Farbmischung rote, grüne und blaue (RGB) so zusammenbringen, dass weißes Licht erscheint. Dabei müssen die verschiedenfarbigen LEDs allerdings sehr dicht beieinander liegen, um ein möglichst homogenes Erscheinungsbild zu erzeugen. Oft werden hierbei die verschiedenen LED Chips in einem Bauteil kombiniert.
- Eine andere und heutzutage gebräuchlichere Methode ist die Kombination mit Leuchtstoffen. So wird eine blaue oder UV-LED mit photolumineszierendem Farbstoff zusammengefügt, der das kurzwellige Licht in langwelliges Licht umwandelt. Oftmals wird heute eine blaue LED mit einer breitbandigen gelben Phosphorschicht kombiniert. Je nach Wahl und Dosierung des Leuchtstoffes können so auch verschiedene Farbtemperaturen erreicht werden. Dies lässt sich speziell im Spektrum der LED wiedererkennen. Zum einen lässt sich ein schmalbandiges Maximum im blauen Wellenlängenbereich (400 nm-500 nm) erkennen, das je nach Farbtemperatur unterschiedlich ausgeprägt ist, und zum anderen ein breitbandiges Maximum, das vom grünen bis zum roten Wellenlängenbereich reicht (500 nm-680 nm).

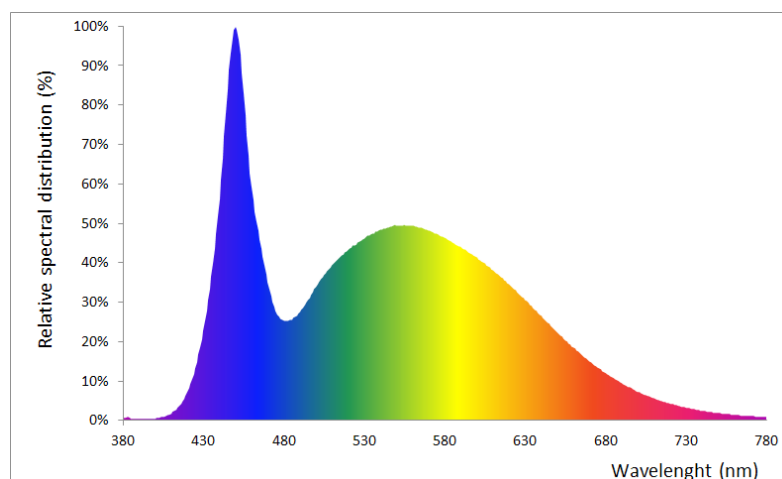


Abb. 8 Spektrum kaltweiße LED bei 6500 K

Der Grund für den immens steigenden Einsatz von LEDs ist durch Farbwiedergabeeigenschaften, Effizienz, Größe und lange Lebensdauer zu erklären. Die Farbwiedergabe liegt bei heutigen

²¹ Moderne Lichtquellen, Strahlenschutzkommission 2010, S. 21.

weißen LEDs bereits bei bis zu $R_a = 95$ und liegt damit qualitativ im sehr guten Bereich.²² Zudem sind LEDs sehr sparsam im Energieverbrauch und erreichen heute eine Lichtausbeute von bis zu 130 lm/W (und sogar über 200 lm/W bei einer speziellen rein grünen High-Q-LED).²³

Durch ihre kleine Größe von 3-5 mm im Durchmesser sind sie vielseitig einsetzbar. Nicht nur gebündelt als einzelne Leuchte oder Effektleuchte, sondern auch als einzelne Pixel einer großen Videowand finden LEDs ihre Verwendung.

2.2.6 OLED

Als neueste Weiterentwicklung der LEDs gelten die OLEDs (organische lichtemittierende Dioden). Sie sind selbstleuchtende Displays. Zwischen der Anode und der Kathode liegen verschiedene organische Halbleiterschichten. Hierbei gibt es zwei verschiedene Vorgehensweisen: es gibt entweder mehrere Schichten, die aus kleinen Molekülen („small molecules“) bestehen, oder nur zwei verschiedene Schichten, die aus langkettigen Polymeren bestehen. Wird eine geringe Spannung an die Elektroden gelegt, injiziert die Kathode Elektronen in die organischen Schichten. Gleichzeitig werden auch positive Ladungen, auch „Löcher“ genannt, in die organische Schicht injiziert. Die Kathode besteht dabei meist aus einer mit Indium-Zinn-Oxid (ITO) beschichteten Glasverbindung, die transparent ist, und die Anode aus Metallen wie Kalzium oder Barium.²⁴ Um die Leitfähigkeit der organischen Schichten zu erhöhen, werden diese wie auch bei der LED verschieden dotiert. Treffen freie Elektronen und Löcher in der Rekombinationsschicht aufeinander, gehen sie eine Bindung ein. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von Photonen, also Licht abgegeben. Die emittierte Lichtfarbe und Farbtemperatur hängen dabei vom organischen Material ab. Diese können durch ein Übereinanderlegen der Schichten additiv gemischt werden. So wird weißes Licht auch hier aus einer roten, einer grünen und einer blauen Emissionsschicht erzeugt, um ein möglichst kontinuierliches Spektrum zu erhalten.

2.3 Scheinwerfer

Unter den Scheinwerfern gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Typen mit unterschiedlichen Funktionen und Einsatzbereichen, wie Film-, Fernseh-, Theater- oder sonstigen Eventproduktionen. Überall dort, wo Personen oder Objekte besonders hervorgehoben oder bestimmte

22 <http://www.ledlight.osram-os.com/2011/04/high-color-rendering-index-cri-led-lights/>

23 http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemitteilungen/_fachpresse/2014/osram-erreicht-rekordwerte-bei-gruenen-led/index.jsp

24 Reader „Einführung in die OLED-Technologie, OSRAM, 2012, S. 2.

Stimmungen durch klar definiertes oder farbiges Licht erzeugt werden sollen, werden sie benötigt. Alle haben jedoch durch Leuchtmittel (Halogenleuchte, Leuchtstofflampe, Gasentladungslampe, LED), Gehäuse, Reflektor/Spiegel und optische Linsensysteme, durch die das Licht gebündelt oder gestreut wird, einen weitgehend ähnlichen Aufbau.

Spezielle Scheinwerfer wie „Moving Heads“ haben zudem noch mechanische Systeme, mit denen es möglich ist, die Richtung des Scheinwerfers sowie Farbwechsel oder andere Filter mithilfe eines Lichtstellpultes zu steuern.

2.3.1 Plankonvexlinsenscheinwerfer und Fresnelscheinwerfer

Der Plankonvexlinsenscheinwerfer (PC-Scheinwerfer) wird zur Flächenausleuchtung mit starkem Licht im Theaterbereich eingesetzt. Das Gehäuse wird mit einer plankonvexen Linse abgeschlossen, durch die möglichst parallele Lichtstrahlen entstehen. Das Leuchtmittel ist dabei auf einem verstellbaren Schlitten angebracht, hinter dem sich ein Spiegel befindet, der das nach hinten abgestrahlte Licht nach vorne reflektieren soll. Wird der Schlitten im Scheinwerfer weiter nach hinten verschoben und somit weiter von der Linse entfernt, wird der Abstrahlwinkel des Lichtes kleiner und zentrierter. Diese Einstellung wird auch Spotstellung genannt. Bewegt man den Schlitten jedoch weiter zur Linse hin, ist der Abstrahlwinkel größer und das Licht wird mehr gestreut. Diese Einstellung wird Floodstellung genannt.



Abb. 9 PC-Scheinwerfer



Abb. 10 Stufenlinsenscheinwerfer

Der Stufenlinsenscheinwerfer, auch Fresnelscheinwerfer genannt, wird häufig im Film- und Fernsehbereich verwendet. Er ist ähnlich aufgebaut wie der Plankonvexlinsenscheinwerfer, besitzt allerdings statt der Plankonvexlinse eine Stufenlinse. Würde man den PC-Scheinwerfer in großen Ausführungen bauen, müsste auch die Plankonvexlinse immer größer und „dickbäuchiger“ werden. Da dies sehr viel Material und Gewicht kosten würde und somit sehr teuer wäre, wird die Stufenlinse mit konzentrischen Ringen eingesetzt. Wie auch bei der PC-Linse ist die Innenseite

der Stufenlinse strukturiert, um das Licht zu streuen und so Abbildungen der Glühwendel oder der verschiedenen Stufen zu vermeiden. Im Gegensatz zum Plankonvexscheinwerfer hat der Lichtstrahl des Fresnelscheinwerfers eine geringere Randzeichnung und läuft weich aus.

Die Leistungsgrößen dieser Scheinwerfer reichen von 500 W bis zu 20 kW. Je nach gewünschter Farbtemperatur werden Halogenleuchtampen oder HMI-Lampen als Leuchtmittel verwendet. So gibt es Tageslicht-(5600 K) oder Kunstlichtfresnelscheinwerfer (3200 K).²⁵ Inzwischen gibt es auch Fresnelscheinwerfer mit LED-Technik (z.B. ARRI L7-C), mit denen es möglich ist, die Farbtemperatur von 2700 K-10000 K sowie Sättigung und Farbwert zu verändern.

Mithilfe von Torblenden kann der Lichtstrahl nur zum Teil begrenzt werden, da Fresnelscheinwerfer einen hohen Streulichtanteil besitzen.

2.3.2 Profilscheinwerfer

Der Profilscheinwerfer schafft eine scharfe, kreisförmige Abbildung mit einer klar definierten Kante, da so gut wie kein Streulicht vorhanden ist. Mit diesem Scheinwerfer ist es möglich, gezielt Objekte oder Personen im Profil auszuleuchten. Mithilfe von sog. Blendenschiebern lässt sich der Lichtkegel an allen Seiten exakt begrenzen. Zusätzlich kann der Lichtkreisdurchmesser oft



Abb. 11 Profilscheinwerfer ETC Source Four

durch eine Irisblende verändert werden. Die Fokussierung des abgebildeten Lichtkreises erfolgt über die Verschiebung der Sammellinse. Für bestimmte Effekte können vor die Linse zudem Gobos eingeschoben werden. In diese Scheiben aus Glas oder Stahl können verschiedenste Muster, Logos oder Schriftzüge hineingeschnitten werden, die so auf eine Fläche projiziert werden können. Eine häufig verwendete Form des Ellipsenspiegelscheinwerfers ist der *ETC- Source Four*.

Eine andere Form des Profilscheinwerfers, der Zoom-Profilscheinwerfer, besitzt zwei verschiebbare Linsen, mit denen Lichtkreisdurchmesser und Fokussierung einstellbar sind.

Häufig im Bühnen- und Theaterbereich kommt der Verfolgerscheinwerfer zum Einsatz. Dieser Profilscheinwerfer hat Griffe und ist meist auf einem Stativ aufgesetzt. Wie der Name ahnen lässt, werden mit ihm sich bewegende Personen einzeln auf der Bühne mit dem schmalen Lichtstrahl

25 Ackermann, N.: Lichttechnik: Systeme der Bühnen- und Studiobeleuchtung, Oldenbourg 2006, S. 103 ff.

„verfolgt“, ohne dabei den Rest der Bühne zu beleuchten. Um auch über weite Distanzen eine hohe Leuchtdichte auf der Bühne zu erzielen, werden hier Baugrößen bis zu 4000 W verwendet.²⁶ Diese gebündelte Intensität des Lichtes kann für das Auge der beleuchteten Person auf Dauer gefährlich werden (vgl. 3.3.3 Messergebnisse verschiedener Scheinwerfer).

2.3.3 Parabolspiegel-Scheinwerfer (PAR-Scheinwerfer)

Der PAR-Scheinwerfer zeichnet sich durch seine einfache und robuste Konstruktion aus, was ihn zu einem häufig eingesetzten Scheinwerfer im Bühnenbereich macht. Da bei diesem Scheinwerfer keine Linse vorhanden ist, kann ein Großteil an Gewicht eingespart werden. Statt der Optik besitzt der PAR-Scheinwerfer lediglich einen großflächigen Kugelspiegel als Reflektor, der den Lichtstrahl bündelt. Daher wird das optische Verhalten allein durch das Leuchtmittel bestimmt. Dies ist meist eine 230-V-Hochvoltglühlampe, die mit Frontglas in einem Blechtubus eingebaut ist. Der Blechtubus kann entweder eine längliche Bauform haben, um den Lichtstrahl zu begrenzen



Abb. 12 PAR 64-Scheinwerfer

und einen kleineren Streuwinkel zu erzeugen (Spot), oder aber eine kürzere Bauform, um den gesamten Abstrahlwinkel des Leuchtmittels zu nutzen. Am vorderen Teil des Gehäuses gibt es Einschübe für Frostfolien oder Farbfilterfolien. Zumeist werden in PAR-Scheinwerfern verschiedene Pressglaslampen (bspw. CP60/CP61/CP62) verwendet, die sich durch ihren Abstrahlwinkel unterscheiden. Es gibt allerdings auch Bauformen, bei denen Halogen-Metallampf-Höchstdrucklampen mit Leistungsgrößen bis zu 12 kW verbaut sind.

Generell unterscheiden sich PAR-Scheinwerfer durch ihre verschiedenen Größen und die Bauform des jeweiligen Leuchtmittels. So gibt es beispielsweise PAR 16, PAR 20, PAR 30, PAR36, PAR 46, PAR 56 und PAR 64. Die Namensgebung entspricht dabei dem Leuchtmitteldurchmesser in 1/10 Zoll (also für PAR 64: 64 Zoll / 10 = 6,4 Zoll = 162 mm). Je nach Größe haben diese Scheinwerfer Leistungen von 150 W - 1000 W.

Eine weitere Bauform des Parabolspiegelscheinwerfers wird mit Niedervoltlampen betrieben (12 V/24 V). Diese Form zeichnet sich durch einen hohen Bündelungsgrad, eine höhere Farbtemperatur und sehr brillantes Licht aus. Die daraus resultierende hohe Leuchtdichte bestimmt den Einsatz als Verfolgerscheinwerfer (als einzelner Scheinwerfer) oder aber als Blinder im

²⁶ Greule, R.: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag 2015, S. 122.

Showbereich, um das Publikum zu beleuchten. Hierbei werden mehrere dieser Scheinwerfer als 4er-, 8er- oder auch 25er-Bars nebeneinander angebracht.

2.3.4 Flächen- und Horizontleuchten

Die Flächenleuchten werden, wie der Name schon sagt, zur gleichmäßigen Ausleuchtung von großen Flächen, Arbeitsplätzen und als Allgemeinbeleuchtung verwendet. Ihr Aufbau ist ebenfalls sehr einfach. Als Leuchtmittel dient eine stabförmige Halogen-Glühlampe. Das nach hinten abgestrahlte Licht wird von einem Rinnenspiegel gesammelt und nach vorne reflektiert. Dieser



Abb. 13 Flächenleuchte

Rinnenspiegel hat einen symmetrischen Aufbau und reflektiert das Licht dementsprechend symmetrisch. Ein zusätzliches Linsensystem wird nicht benötigt.

Die Horizontleuchten haben im Gegensatz dazu einen asymmetrischen Rinnenspiegel, der das Licht asymmetrisch abstrahlt. Dadurch können die Horizontleuchten nah an Wände, Bühnenhintergründe und Böden platziert werden und diese dennoch gleichmäßig ausleuchten.

Oftmals bestehen Flächen- und Horizontleuchten aus mehreren Kammern, die einzeln zu- und abgeschaltet werden können, um die Lichtdichte zu regulieren oder durch verschiedene Farbfilter additive Farbmischungen zu erzielen.

2.3.5 Moving-Lights



Abb. 14 Moving Light MAC 2000

Generell versteht man unter Moving-Lights automatisierte Scheinwerfer, die steuerbare Funktionen haben, wie Bewegung, Farbe, Gobos, Blendenöffnung oder Helligkeit. Diese werden i.d.R. mittels des DMX-512 Protokolls über Lichtstellpulte gesteuert. Der Einsatz dieser Scheinwerfer nimmt ständig zu und ist bereits der Standard für Effektlicht im Bühnen-, Theater- und Fernsehbereich. Bei den meisten älteren Modellen der Moving-Lights werden Halogen-Metall dampf-Höchst drucklampen mit Leistungen von 250 W bis 4000 W als Leuchtmittel verwendet.²⁷ Die neueren Modelle sind heute

27 Greule, R.: Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag 2015, S. 128.

allerdings immer mehr mit LEDs ausgestattet, da diese immer höhere Leuchtdichten aufweisen und weitere Vorteile mit sich bringen (vgl. 2.2.5 Leuchtdioden). Zudem können sie auch einen elektronischen Shutter im Scheinwerfer ersetzen, da die LEDs ihre Helligkeit schlagartig verändern können. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen Washlights und Spotlights.

2.3.6 Washlights

Washlights sind in ihrer konventionellen Bauform mit Halogen-Metall dampflampen den Fresnelscheinwerfern gleichzusetzen. Auch sie besitzen eine Fresnellinse. Der eher unscharfe Lichtstrahl mit weich auslaufender Kante hat einen relativ großen Streuwinkel und eignet sich dafür größere Flächen auszuleuchten. Zur beweglichen Steuerung um zwei Achsen kommen bei diesem Scheinwerfer Farbwechsler, mechanischer Shutter und Irisblende hinzu. Gobos werden bei Washlights nicht verwendet, da ihr Streuwinkel zu groß ist und der Lichtstrahl keine scharfe Abbildung erzeugt.



Abb. 15 Wash Light LED

In der Variante mit LEDs können Washlights deutlich kleiner und kompakter gebaut werden. Hier werden mechanischer Farbwechsler, Shutter, Irisblende sowie Fresnellinse nicht benötigt. Lediglich die verschiedenen RGBW-LEDs (rote, grüne, blaue und weiße LEDs) sind auf dem beweglichen Kopf des Scheinwerfers vorhanden, die einzeln ansteuerbar sind. So ist es möglich, Farben additiv zu mischen sowie den Streuwinkel und Helligkeit zu verändern.

2.3.7 Spotlights

Spotlights sind analog dazu mit den Profilscheinwerfern zu vergleichen. Sie besitzen eine Sammellinse, um einen relativ engen, scharfen Lichtstrahl mit klarer, scharfer Kante zu erzeugen. Zusätzlich zum mechanischen Farbwechsler und Shutter sind die Spotlights oft mit Zoom- und Fokussierungseinstellungen ausgestattet, wodurch der Lichtstrahl in Größe und Schärfe verändert werden kann. Zudem gibt es im Inneren des Scheinwerfers ein oder mehrere Goboräder. Mit ihnen können wahlweise Symbole und Logos projiziert oder die Form des Lichtstrahls verändert werden (z.B. viele kleine Strahlen).

Der Einsatz von LEDs bei Spotlights ist bisher nicht sehr verbreitet.

2.3.8 Scanner

Scanner sind eine besondere Form der Moving Lights. Bei ihnen wird nicht der komplette Scheinwerferkopf bewegt (Moving Heads), sondern lediglich ein kleiner Ablenkspiegel, der vor dem Scheinwerfer angebracht ist. Mithilfe dieses steuerbaren Spiegels können deutlich schnellere Bewegungen erzielt werden als mit Moving Heads. Scanner werden ausschließlich als Spotlight-Variante im Bühnenbereich verwendet.



Abb. 16 Moving Light - Scanner

3. Gefährdung durch Lichtquellen

Künstliche optische Strahlung kann für den Menschen gefährlich sein und bei übermäßiger Bestrahlung Schädigungen hervorrufen. Dabei können sowohl photochemische Schädigungen im Auge auftreten, als auch thermische Schädigungen auf der Haut und im Auge. Diese Gefährdungen können durch UV-Strahlung, sichtbares Licht (vor allem im kurzwelligen blauen Bereich) und Infrarotstrahlung hervorgerufen werden.

3.1 UV-Strahlung und IR-Strahlung

Ultraviolette-Strahlung ist von menschlichen Organen nicht wahrnehmbar und hat generell nur eine geringe Eindringtiefe in das menschliche Gewebe. Dieses kann nur oberflächlich geschädigt werden, innere Organe werden nicht betroffen. Die Eindringtiefe ist dabei sowohl beim Auge als auch bei der Haut wellenlängenabhängig. Während UV-C (100 nm-280 nm) und UV-B (280 nm-315 nm) Strahlung weitestgehend von der Hornhaut und der Oberhaut absorbiert werden, dringt die UV-A (315 nm-380 nm) Strahlung bis zur dritten Hautschicht der Lederhaut ein, die Nerven und Muskelfasern enthält. Im Auge gelangt UV-C Strahlung bis zur Horn- und Bindehaut, UV-B und UV-A Strahlung bis in die Augenlinse.

3.1.1 Photochemische Schädigung

Bei der photochemischen Schädigung verändern chemische Reaktionen mit Photonen des Lichtes das menschliche Gewebe. Vor allem wird photochemische Schädigung von UV-Strahlung verursacht. Aktinisches UV beinhaltet den Wellenlängenbereich von 100 nm-400 nm mit einer Gefährdungskurve ($S(\lambda)$) und gibt Aufschluss über max. Bestrahlungsdauer H_{eff} und Bestrahlungsstärke E_{eff} . Durch aktinisches UV können Zellen der Horn- und Bindehaut des Auges akut geschädigt und entzündet werden. Die Photo-Keratitis und Photo-Konjunktivitis oder auch „verblitzte Augen“ heilen in der Regel nach ein bis drei Tagen wieder ab, können jedoch sehr schmerzhaft sein.²⁸ Kommt es allerdings zu sehr schweren Schäden an Horn- und Bindehaut, können sich Narben bilden, die dauerhafte Schäden hinterlassen.

Speziell durch UV-A Strahlung kann die Augenlinse mit der Folge des Katarakts (Grauer Star) irreversibel eingetrübt werden. Weltweit ist dies der häufigste Grund der Erblindung, der lediglich mit einer Operationen begegnet werden kann. Das Risiko hierbei erhöht sich mit zunehmendem Alter.²⁹

Auch die Haut kann durch UV-Strahlung photochemisch geschädigt werden. Während die kurzwellige UV-C Strahlung eher ungefährlich ist, kann die UV-B und UV-A Strahlung tiefer in die Haut eindringen und dabei die DNA schädigen. Wird diese bei der Zellteilung verbreitet, kann dies im schlimmsten Fall zu Hautkrebs führen. Hierzu sind zumeist allerdings hohe Expositionszeiten und hohe Dosen (J/m^2) vorausgesetzt. Bei weniger hohen Dosen und Expositionszeiten kann es dennoch zu akuten Hautschädigungen kommen, die während der Bestrahlung oder kurze Zeit danach eintreten. Auch bei einem Sonnenbrand werden - neben dem Schmerzempfinden und Rötung der Haut - DNA und Hautzellen geschädigt und können bei hoher Beschädigung absterben. Weitere Folgen sind bei hoher Belastung Blasenbildung auf der Haut sowie Fieber und Übelkeit.³⁰

3.1.2 Thermische Schädigung

Auch bei thermischer Strahlung, die vornehmlich durch IR-Strahlung emittiert wird, können Haut und Augen geschädigt werden. Bei ausreichend hoher IR-Strahlung wird das menschliche Gewebe erhitzt und kann dabei geschädigt werden. Auf der Haut kann dies je nach Abstand und Intensität der Strahlung zu leichten bis schweren Verbrennungen führen.

28 Reader „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen - Scheinwerfer, VGB 2015, S. 19.

29 Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S. 31 ff.

30 Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S. 27 ff.

Im Auge gelangt auch die IR-Strahlung abhängig von ihrer Wellenlänge unterschiedlich tief ins Gewebe. Dabei gelangt IR-C (3000 nm - 1 mm) lediglich bis zur Horn- und Bindehaut, was bei hoher Einstrahlung zur Verbrennung führen kann. IR-B Strahlung (1400 nm - 3000 nm) gelangt bis zur Linse des Auges und kann diese bei chronischer Strahlung ähnlich der UV-A Strahlung eintrüben und zum Grauen Star führen.³¹ IR-A Strahlung (780 nm - 1400 nm) gelangt ähnlich der sichtbaren optischen Strahlung bis auf die Netzhaut und kann diese irreversibel verbrennen. Betrifft dies den schärfsten Punkt des Sehens, die Makula, kann dies zu einem verschwommenen Blick oder schwarzen Punkten im Sichtfeld führen. Oft kommt es zu mehr oder weniger gravierenden Netzhautverbrennungen, wenn Betrachter bei einer Sonnenfinsternis zu lange ungeschützt in die Sonne schauen. Bei herkömmlicher Bühnenbeleuchtung mit Scheinwerfern kann eine thermische Netzhautschädigung jedoch ausgeschlossen werden.

Bei künstlichen Lichtquellen geht die UV-Strahlung vor allem von Hochdruckentladungslampen (HMI) und in geringem Maße von Halogenleuchtstofflampen aus. In den meisten Scheinwerfern gibt es deshalb ein UV-Schutzglas, das die ultraviolette Strahlung filtert und nur in geringem Maße durchlässt.

3.2 Blendung

Eine Blendung kann durch hohe Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken von Scheinwerfern hervorgerufen werden, wenn übermäßig viele Photonen auf die Photorezeptoren der Netzhaut treffen und diese gesättigt sind. Weiterhin hängt das Ausmaß der Blendung von der Höhe der Lichtquelle und deren Winkel zum Betrachter ab. Eine Blendung führt dazu, dass die Sehfunktion und Wahrnehmungsgeschwindigkeit kurzzeitig herabgesetzt wird. Das menschliche Auge ist jedoch in der Lage sich in Sekundenschnelle selbst zu schützen und den Helligkeitseindruck durch Adaption der Photorezeptoren zu verringern.³² Das Auge reagiert mit Lidschluss oder -verengung sowie Verengung der Pupille. Neben der kurzzeitigen Herabsetzung der Sehfunktion können nach der Blendung auch schwarze Punkte im Sichtfeld auftauchen, die jedoch nach kurzer Zeit wieder verschwinden. Langfristig geht von der Blendung an sich keine Gefährdung des Auges aus, jedoch kann sie zugleich Indiz und Schutz vor Blaulichtgefährdung sein, da man aufgrund der Blendung nicht für längere Zeit direkt in den Scheinwerfer schaut.

31 Reader „Künstlich optische Strahlung“, Dr. Wehrle, LUBW 2010, S. 11.

32 Reader „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen - Scheinwerfer“, VGB 2015, S. 13.

3.3 Blaulichtgefährdung

Die Blaulichtgefährdung oder auch *blue light hazard* ist diejenige Gefährdung, die durch die Strahlung im sichtbaren Bereich verursacht werden kann. Auch hier ist die Stärke der Schädigung wellenlängenabhängig und tritt überwiegend im spektralen Bereich von 400 nm-500 nm, also im violetten bis blauen Bereich auf. Die Strahlung wird im Auge durch Hornhaut und Linse kaum geschwächt und trifft direkt auf die Netzhaut. Das Energieniveau der Photonen, die auf die Rezeptoren der Netzhaut treffen, ist dabei umgekehrt proportional zur Wellenlänge und somit ist der Blaulichtanteil energiereicher als beispielsweise der Rotlichtanteil.³³ Die Photonen der kurzwelligen Strahlung gehen mit den Photorezeptoren eine photochemische Reaktion ein und können diese bei hoher Belastung irreversibel schädigen. Wenn Licht auf die Rezeptoren der Netzhaut trifft, werden die Stäbchenpigmente für kurze Zeit gebleicht. Das blaue Licht bleicht das Stäbchenpigment Rhodopsin verhältnismäßig langsam. Dabei entstehen Zwischenprodukte, die wiederum blaues Licht absorbieren und gebleicht werden. Der dabei entstehende Zirkel sorgt für eine Art Todessignal, das an die Gene der Rezeptoren gesendet wird. Im Vergleich dazu bleicht beispielsweise grünes Licht das Rhodopsin deutlich schneller, das somit schneller regenerieren kann.³⁴

„Die Symptome (z.B. Blinde Flecke oder Skotom) treten zeitverzögert auf, meist 12 bis 48 Stunden nach der Bestrahlung. Die Netzhautschädigung und die damit einhergehende Verminderung der Sehkraft können dauerhaft sein.“³⁵

Die Schädigung kann jedoch erst bei langer und intensiver Bestrahlung des Auges auftreten. Die größte Gefahr geht dabei vor allem vom direkten Blick in den Scheinwerfer aus. Entscheidend für die Gefährdungsbeurteilung ist allerdings nicht nur der einzelne Blick in die Lichtquelle, sondern die Summe aller Blicke und Lichtmengen über einen Arbeitstag. Bei der Blaulichtgefährdung ist dieser Referenzwert für Dauerbestrahlung 10.000 s (ca. 2 h 47 min).

Die Gefährdungsstärke ist von den folgenden Parametern abhängig:

- Größe der Lichtquelle
- Typ der Lichtquelle
- Lichtfarbe und Farbtemperatur

33 Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S. 31.

34 <http://www.retina.ch/files/retina-journal/html/2004/rsj2004-01-d-2.htm>, 2004

35 Reader „Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen - Scheinwerfer“, VGB 2015, S. 21.

- Beleuchtungsstärke
- Öffnungswinkel des Scheinwerfers
- Abstand zum Scheinwerfer
- Expositionszeit
- Blickrichtung
- Pupillengröße

3.3.1 Gefährdungsbeurteilung

Expositionsgrenzwerte für UV- und Blaulichtgefährdung sind im Juli 2010 in der Verordnung für optische Strahlung (VOPST) in Österreich festgelegt worden. Dabei berief man sich auf die Grundlagen der EU-Richtlinie 2006/25/EG und der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Die VOPST besagt, dass die festgelegten Expositionsgrenzwerte nicht überschritten werden sollten, da ansonsten von einer Gefährdung ausgegangen werden kann. Ebenso sollten Arbeitgeber bei möglicher Grenzwertüberschreitung künstliche Lichtquellen auf ihre Gefahr hin untersuchen und beurteilen. Weiterhin sind Arbeitnehmer auf mögliche Gefährdung hinzuweisen und im Zweifelsfall zu unterrichten.

Bei der Beurteilung wird zwischen kleinen und großen Lichtquellen unterschieden, da kleine Lichtquellen eine dementsprechend kleine punktuelle Abbildung auf der Netzhaut erzeugen. Diese kann sich eher in die Netzhaut „einbrennen“ als die flächige Abbildung einer großen Lichtquelle. Aus diesem Grund ist der Grenzwert der Bestrahlungsstärke einer kleinen Lichtquelle deutlich geringer als der einer großen Lichtquelle. Eine kleine Lichtquelle wird definiert, wenn $d > D/0,011$ rad ist, eine große Lichtquelle dementsprechend bei $d < D/0,011$ rad. In diesem Zusammenhang ist d der Abstand zwischen Auge und Lichtquelle und D der Scheinwerferdurchmesser.

Folgende Expositionsgrenzwerte sind in der VOPST festgelegt worden:³⁶

	Expositionszeit $t < 10.000$ s	Expositionszeit $t > 10.000$ s
Grenzwert für Strahldichte L_B (große Lichtquelle > 11 mrad)	$\frac{10^6}{t} \frac{W}{m^2 * sr}$	$100 \frac{W}{m^2 * sr}$
Grenzwert für Bestrahlungsstärke E_B (kleine Lichtquelle < 11 mrad)	$\frac{100}{t} \frac{W}{m^2}$	$0,01 \frac{W}{m^2}$

³⁶ <http://www.arbeitsinspektion.gv.at/nr/rdonlyres/0fe4ceb1-6ffc-4ba4-9634-f97a7a51dfff/0/vopst.pdf>

Zur Berechnung der max. Strahldichte L_B bzw. der Bestrahlungsstärke E_B wird die optische Strahlung im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 700 nm mit der Gefährdungskurve ($B(\lambda)$) gewichtet, die ihr Wirkungsspektrum im Wellenlängenbereich von ca. 400 nm-500 nm hat.

So gilt für die Strahldichte L_B für große Lichtquellen:

$$L_B = \int_{300\text{nm}}^{700\text{nm}} L(\lambda) * B(\lambda) d\lambda = \frac{10^6}{t} \frac{W}{m^2 * sr} (t \leq 10000 s)$$

Analog dazu gilt für die Bestrahlungsstärke E_B für kleine Lichtquellen:

$$E_B = \int_{300\text{nm}}^{700\text{nm}} E(\lambda) * B(\lambda) d\lambda = \frac{100}{t} \frac{W}{m^2} (t \leq 10000 s)$$

Werden entsprechende Strahldichten bzw. Bestrahlungsstärken nicht erreicht, ist die Expositionsdauer unbegrenzt.

Die max. Expositionsdauer kann daraus folgend für gemessene Strahldichte bzw. Bestrahlungsstärke berechnet werden:

Für große Lichtquellen gilt:

$$t_{\max} = \frac{10^6}{L_B}$$

Für kleine Lichtquellen gilt entsprechend:

$$t_{\max} = \frac{100}{E_B}$$

Beispielrechnung

Ein 1 kW Fresnelscheinwerfer besitzt einen Linsendurchmesser von 17,5 cm und hat einen Abstand von 7 m zur beleuchteten Person. Die Expositionszeit beträgt 1000 s.

$$\alpha = \frac{0,175 m}{7 m} = 0,025 > 0,011 \text{ rad} : \text{große Lichtquelle}$$

$$L_B = \frac{10^6}{1000s} = 1000 \frac{W}{m^2 * sr}$$

Der max. Grenzwert der Strahldichte des Scheinwerfers würde hier also bei $1000 \frac{W}{m^2 * sr}$ liegen bei einer Expositionszeit von 1000 s (16 m 40 s).

In der DIN Norm EN 62471 werden Lichtquellen ihrer fotobiologischen Gefährdung nach in vier verschiedene Risikogruppen unterschieden. Demnach müssen Hersteller ihre Lichtquellen spezifizieren und entsprechend den Risikogruppen zuordnen. So müssen Lichtquellen der Risikogruppe 2 und 3 zusätzlich mit einem Warnhinweis gekennzeichnet werden, während Lichtquellen der Risikogruppe 0 und 1 nicht speziell gekennzeichnet werden müssen.

Risikogruppe	Beschreibung
Freie Gruppe Risikogruppe 0	Die Lichtquelle stellt keine fotobiologische Gefährdung dar. Die Emissionswerte liegen unter dem Grenzwert für die Bestrahlung.
Geringes Risiko Risikogruppe 1	Die Lichtquelle stellt bei bestimmungsgemäßer Benutzung keine Gefährdung dar. Die Emissionswerte überschreiten nur bei sehr langen Bestrahlungsdauern, die im Normalfall nicht vorkommen, den Grenzwert für die Bestrahlung.
Mittleres Risiko Risikogruppe 2	Die Lichtquelle stellt dann eine Gefahr dar, wenn natürliche Abwendreaktionen (zum Beispiel Wegschauen oder Lidschluss bei hellem Licht oder bei thermischen Unbehagen) überwunden werden.
Hohes Risiko Risikogruppe 3	Die Lichtquelle stellt sogar für flüchtige oder kurzzeitige Bestrahlung eine Gefährdung dar.

Zur allgemeinen Orientierung hinsichtlich der Gefährdung durch optische Strahlung hat die HAW Hamburg ein Diagramm nach PLASA modifiziert, auf dem max. Expositionszeiten, je nach Abstand zur Lichtquelle und Beleuchtungsstärke, abzulesen sind. Dieses Diagramm zeigt allerdings nur grobe Anschauungswerte für kleine Lichtquellen und gilt nicht für alle Lichtquellentypen gleichermaßen.

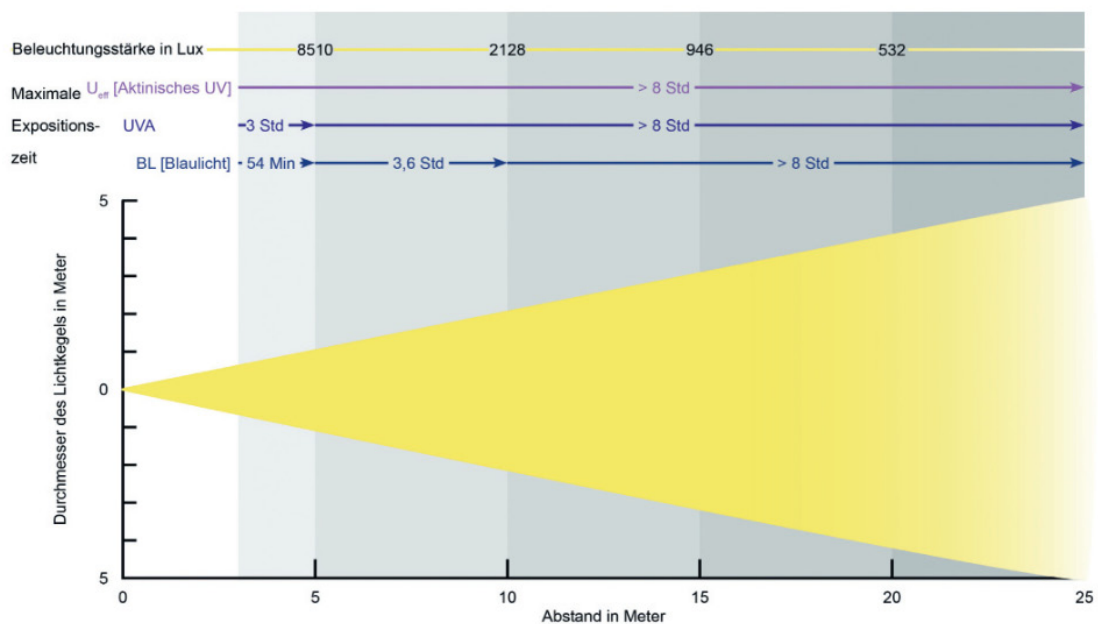


Abb. 17 Diagramm fotobiologische Gefährdung für kleine Lichtquellen

3.3.2 Messung von Bestrahlungsstärke und Strahldichte

Um die blaulichtrelevante Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte zu messen, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten. Zum einen kann ein integrierendes Radiometer verwendet werden, bei dessen Messung direkt der relevante Wellenlängenbereich berücksichtigt, bewertet und aufintegriert wird. Der gemessene Wert (Bestrahlungsstärke oder Strahldichte) kann direkt mit Grenzwerten verglichen werden. Zum anderen gibt es spektrale Messgeräte, die zunächst die spektrale Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte über das komplette Spektrum der Lichtquelle messen. Diese muss rechnerisch mit dem Wirkungsspektrum $B(\lambda)$ für Blaulichtgefahr bewertet und integriert werden, um die effektive Bestrahlungsstärke E_B zu erhalten.

- Der Vorteil von integrierenden Messgeräten ist der geringe Preis, die recht einfache Handhabung des Gerätes und ein geringer Zeitaufwand. Es sind keine besonderen Kenntnisse nötig, um eine Messung durchzuführen. Da diese Geräte jedoch mit internen Filtern arbeiten, die das Wirkungsspektrum $B(\lambda)$ für Blaulichtgefährdung nur näherungsweise berücksichtigen, können bei diesen Messungen Messungenauigkeiten von bis zu 300% auftreten.³⁷
- Die teureren spektralen Messgeräte hingegen haben eine deutlich geringere Messungenauigkeit (max. 20%) und erzielen ein genaueres Ergebnis, da bei spektraler Messung das exakte Wirkungsspektrum $B(\lambda)$ rechnerisch berücksichtigt wird. Die Messung ist jedoch sehr aufwendig und setzt eine gewisse Kenntnis des Geräts und des Messvorgangs voraus. Da die Ergebnisse zudem zunächst noch berechnet und ausgewertet werden müssen, ist ein größerer Zeitaufwand notwendig.

Berechnung der maximalen Expositionszeit t_{\max}

Zunächst wird bestimmt, ob es sich um eine kleine oder große Lichtquelle handelt.

$$\text{Quellgröße } \alpha = \frac{\text{Scheinwerfer Durchmesser [m]}}{\text{Abstand zur Lichtquelle [m]}}$$

a) kleine Lichtquelle für $\alpha < 0,011$ rad

Ist die gemessene Bestrahlungsstärke kleiner als 1 W/m^2 , so ist die Lichtquelle als nicht gefährdend einzustufen und die maximale Expositionszeit liegt bei über 10.000 s.

Für gemessene Bestrahlungsstärke größer als 1 W/m^2 , gilt:

³⁷ Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S. 47.

$$t_{\max} [\text{s}] = \frac{100 [J m^{-2}]}{E_B [W m^{-2}]}$$

b) große Lichtquelle für $\alpha > 0,011$ rad

Um die Strahldichte L_B für große Lichtquellen zu berechnen, muss zunächst die Quellgröße α [rad] in den Raumwinkel Ω [sr] umgerechnet werden.

$$\Omega [\text{sr}] = \frac{\alpha^2 \cdot \pi}{4}$$

$$L_B \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] = \frac{E_B [W / m^2]}{\Omega [sr]}$$

So ergibt sich für die max. Expositionszeit t_{\max} :

$$t_{\max} [\text{s}] = \frac{10^6 [J m^{-2} sr^{-1}]}{L_B [W m^{-2} sr^{-1}]}$$

Messergebnisse verschiedener Scheinwerfer

Die Allgemeine Unfallversicherungsanstalt AUVA hat in Kooperation mit den Seibersdorf Laboratories Österreich eine Vielzahl an Scheinwerfern auf UV- und Blaulichtgefährdung hin untersucht, durchgemessen und bewertet. In vier verschiedenen Theatern und Opernhäusern wurden vornehmlich Theaterscheinwerfer untersucht.

Dabei wurden beide möglichen Messmethoden mit spektralem und integralem Messgerät durchgeführt. Die Messunterschiede zwischen den verschiedenen Messgeräten beliefen sich auf 5-43 %.³⁸

Bei den verschiedenen Messungen wurden die Scheinwerfer dem jeweiligen Leuchtmittel nach in drei verschiedene Gruppen unterteilt:

- Halogen-Scheinwerfer
- LED-Scheinwerfer
- HMI-Scheinwerfer

³⁸ Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S. 58.

Halogen-Scheinwerfer

Unter den Halogen-Scheinwerfern wurden insgesamt drei verschiedene Scheinwerfer in verschiedenen Abständen gemessen. Dabei wurde ein Stufenlinsen-Scheinwerfer in 15 m Entfernung, ein Verfolger-Scheinwerfer in 25,2 m Entfernung sowie ein Spot-Scheinwerfer in 14,9 m Entfernung untersucht. Die Öffnungswinkel der Scheinwerfer wurden dabei auf den „worst-case“-Fall mit kleinstem Öffnungswinkel eingestellt.

Scheinwerfer	Messdis- tanz [m]	Öff- nungs- winkel θ	Quellgröße α [mrad]	Messwert L_B für $\gamma = 110$ mrad [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Grenzwert für Dauer - Expo. ($\gamma = 110$ mrad) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Maximale Ex- positions- dauer t_{max} [h:min]
Halogen Verfolger-SW Selecon Pacific 1200 W	25,2	5,5°	7,9	36	100	>2:46
Halogen-Stufenlinsen-SW - ARRI 5 kW	15,0	kleinst- möglich	20,0	57	100	>2:46
Pani Halogen-spot 1000 W	14,9	-	20,1	78	100	>2:46

Quelle: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015

Die Messungen der Scheinwerfer haben gezeigt, dass die drei verschiedenen Halogenscheinwerfer in den angegebenen Abständen zu keiner Zeit als gefährdend einzustufen sind. Selbst bei einer Dauerexposition von über 2 Std. 46 Min. besteht keine Blaulichtgefährdung für den Betrachter.

Halogenscheinwerfer haben eine eher warmweiße Lichtfarbe, d.h. das Maximum des emittierten Spektrums liegt im roten bis IR-Bereich (ca. 600 nm - 800 nm). Der Blaulichtanteil ist dementsprechend gering. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass im Normalfall bei ausreichendem Abstand von Halogenscheinwerfern keine Gefährdung ausgeht.

LED-Scheinwerfer

Unter den LED-Scheinwerfern wurden lediglich zwei unterschiedliche Scheinwerfer untersucht und gemessen. Zum einen wurde der PAR-Wash Scheinwerfer *Chauvet COLORado 2* im Abstand von 5 m durchgemessen und zum anderen das Weißlicht LED Array *MiniNova2.2 1K dimm 800 W, 6500 K* in einer Entfernung von 15 m.

Der PAR-Wash Scheinwerfer besteht aus mehreren LEDs verschiedener Lichtfarben RGBW (rot, grün, blau, weiß). Bei der Messung waren alle LEDs gleichermaßen in Benutzung. Die Messoptik wurde allerdings primär auf blaue und weiße LEDs ausgerichtet. Je nach Abstrahlwinkel erreicht

der Scheinwerfer unterschiedliche Beleuchtungsstärken von 5190 lx bei 7,7° und 620 lx bei 35° bei einem Abstand von 5 m.³⁹ Welcher Abstrahlwinkel für die Messung der AUVA verwendet wurde, ist nicht bekannt.

Das Weißlicht Array besteht aus mehreren kaltweißen LEDs bei einer Farbtemperatur von 6500 K.

Scheinwerfer	Messdistanz [m]	Quellgröße α [mrad]	Messwert L_B für $\gamma = 110$ mrad [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Grenzwert für Dauer - Expo. ($\gamma = 110$ mrad) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Messwert L_B für $\gamma = 11$ mrad [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Grenzwert für $t = 100$ s ($\gamma = 11$ mrad) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Maximale Expositionsdauer t_{max} [h:min:s]
Chauvet COLORado 2 200 W	5	37	234	100	4877	10000	0:03:20
Weißlicht LEDArray MiniNova2.2 1K-dimm, 800 W, 6500 K	15,0	19,3	78	100	-	-	>2:46

Quelle: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015

Die Messungen haben ergeben, dass der PAR-Wash Scheinwerfer den Grenzwert für Blaulichtgefährdung nach 200 s (3 min 20 s) über einen Tag von 8 Std. überschreitet. Dies gilt allerdings für den direkten Blick in den Scheinwerfer bei voller Leistung im Abstand von 5 m. Ob es tatsächlich zur Gefährdung kommt, hängt von weiteren Parametern ab (vgl. 3.3.4 Parameter der Blaulichtgefährdung).

Das Weißlicht LED-Array hat in Entfernung von 15 m den Blaulicht-Grenzwert nicht überschritten, was vermutlich am großen Abstand festzumachen ist. In geringerem Abstand könnte auch dieser Scheinwerfer den Grenzwert potenziell überschreiten.

LED Scheinwerfer mit blauen und kaltweißen LEDs sollten deshalb auf Blaulichtgefährdung hin evaluiert und ggf. durchgemessen werden, da eine Grenzwertüberschreitung nicht auszuschließen ist. Dies gilt nicht für LED Scheinwerfer mit Diffusor, da die Leuchtdichte dadurch erheblich gesenkt wird und somit Blaulichtgefährdung eher ausgeschlossen werden kann.⁴⁰

39 <http://www.chauvetlighting.com/colorado-2-zoomtour>

40 Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S.70.

HMI- Scheinwerfer

Die Scheinwerfer mit HMI-Leuchtmittel beinhalten potenziell die höchste Blaulichtgefahr, da sie eine kaltweiße Lichtfarbe mit Maximum im blauen Bereich des Spektrums (400 nm - 600 nm) bei gleichzeitig hoher Intensivität besitzen. Aus diesem Grund wurden von der AUVA und den Seibersdorf Laboratories Österreich insgesamt 14 verschiedene Scheinwerfer untersucht und durchgemessen. Dabei hatten die Scheinwerfer verschiedene Messabstände von 5,8 m bis zu 37 m. Die unterschiedlichen Scheinwerfer-Typen wie Profilscheinwerfer (z.B. *Source Four Zoom*), Verfolger-Scheinwerfer (z.B. *AGO 2500 HMI 4°*), Stufenlinsen-Scheinwerfer (z.B. *ARRI daylight 2,5 kW*) oder Wash Moving-Heads (*Vari Wash 1500 W*) hatten dabei auch hier den „worst-case“ mit kleinstmöglichem Öffnungswinkel.

Scheinwerfer	Messdistanz [m]	Öffnungswinkel θ	Quellgröße α [mrad]	Messwert L_B für $\gamma = 110$ mrad [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Grenzwert für Dauer-Expo. ($\gamma = 110$ mrad) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Messwert L_B für $\gamma = 11$ mrad [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Grenzwert für $t = 100$ s ($\gamma = 11$ mrad) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]	Maximale Expositionsdauer t_{max} [h:min:s]
Wash 1500 W Vari	14,9	13°	16,8	1627	100	144983	10000	0:00:07
Verfolger AGO 2500 HMI 4° (2,5 kW)	19,0	4°	12,1	1574	100	68207	10000	0:00:14
ARRI daylight compact 4 kW	14,9	-	20,1	942	100	50666	10000	0:00:19
Verfolger PANI HMV 1200	25,2	kleinstmöglich	7,9	315	100	37225	10000	00:00:27
Profil-SW Source Four Zoom 15°-30° 575 W	14,9	15°	12,1	-	100	34165	10000	0:00:29
Verfolger ARRI 2,5 kW HMI	37,0	kleinstmöglich	5,4	191	100	19099	10000	0:00:52
Stufenlinsen SW ARRI daylight compact 2500 7° Spot	7,6	7°	39,9	1647	100	18314	10000	0:00:54
Vari Lite VL1000 HMI 575 W	5,8	kleinstmöglich	22,4	417	100	10512	10000	0:01:35

Stufenlinsen SW ARRI day- light 2,5 kW	6,0	-	26,7	365	100	6188	10000	0:02:41
Ampton HMI Washlight 575 W	11,5	kleinst- möglich	15,7	122	100	3999	10000	0:04:10
Stufenlinsen SW ARRI HMI 4000	13,4	kleinst- möglich	24,6	170	100	2656	10000	0:06:16
Panasonic PTD 12000U	23,0	-	1,1	84,3	100	-	10000	>2:46:40
Verfolger Juliat 2500 HMI (2,5 kW)	15,5	kleinst- möglich	4,5	58	100	-	10000	>2:46:40
Innofour 575 W HMI (ohne Filter)	12,0	kleinst- möglich	14,2	47,8	100	-	10000	>2:46:40

Quelle: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015

Die Messung hat ergeben, dass 11 der untersuchten Scheinwerfer den Grenzwert für Blaulichtgefährdung überschreiten. Selbst bei Abständen von bis zu 37 m sind die Grenzwerte vor allem von Verfolger-Scheinwerfern nach Zeiten von unter einer Minute erreicht. Dies zeigt, dass HMI-Scheinwerfer tatsächlich den Grenzwert für Blaulichtgefährdung am schnellsten erreichen und damit von diesen die höchste Gefährdung ausgeht. Auch hier hängt die tatsächliche Gefährdung jedoch von weiteren Parametern ab. Die angegebenen max. Expositionszeiten beziehen sich hier auf den direkten Blick in den Scheinwerfer und kleinstem Öffnungswinkel bei voller Leistung und somit höchster Bestrahlungsstärke bzw. Leuchtdichte.

Demnach sollten HMI-Scheinwerfer, die zur Beleuchtung von Personen ausgerichtet und in deren Blickachse sind, stets evaluiert und im Zweifelsfall durchgemessen werden, sodass ggf. entsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden können.

3.3.3 Parameter der Blaulichtgefährdung

Wie zuvor erwähnt, wird die tatsächliche max. Expositionszeit für Blaulichtgefährdung noch von weiteren Parametern beeinflusst. Die in den Tabellen der AUVA angegebenen Werte zeigen lediglich den „worst-case“-Fall. Dort wurden die Punkte „Typ der Lichtquelle“ und somit auch „Lichtfarbe und Farbtemperatur“ in Halogen, LED und HMI unterschieden.

Dimmen des Scheinwerfers

In den Tabellen der AUVA wurden die Scheinwerfer jeweils bei voller Leistung, also max. Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte gemessen. Dies entspricht in den meisten Fällen nicht der Realität. Zumeist sind Scheinwerfer gedimmt, wodurch sich die Bestrahlungsstärke bzw. Strahldichte linear verringert. In diesem Zusammenhang würde die max. Expositionszeit für Blaulichtgefährdung steigen.

Öffnungswinkel

Der Öffnungswinkel eines Scheinwerfers hat direkten Einfluss auf die Bestrahlungsstärke E_B und Strahldichte L_B . Mit steigendem Öffnungswinkel verringert sich die Strahldichte um den Verringerungsfaktor V_θ . Dieser wird wie folgt berechnet:

$$\text{Verringerungsfaktor } V_\theta = \frac{\left(\tan \frac{\theta_{\text{groß}}}{2}\right)^2}{\left(\tan \frac{\theta_{\text{klein}}}{2}\right)^2}$$

Wird so beispielsweise der Öffnungswinkel des HMI-Profilescheinwerfers *Source Four* von 15° auf 30° verdoppelt, wird der Grenzwert für Blaulichtgefährdung nicht mehr erreicht (zuvor wurde dieser nach 29 s erreicht).⁴¹

Abstand

Mit zunehmendem Abstand zur Lichtquelle nimmt die Bestrahlungsstärke ab. Für (nahezu) punktförmige Lichtquellen gilt hier das quadratische Abstandsgesetz. Die Bestrahlungsstärke E_B verringert sich quadratisch zum Abstand r .

$$\frac{E_{B1}}{E_{B2}} = \frac{(r_2)^2}{(r_1)^2}$$

Ist die Lichtquelle ausgedehnt und nicht punktförmig, gilt das lineare Abstandsgesetz. Die Bestrahlungsstärke E_B verringert sich hier linear zum Abstand r .

$$\frac{E_{B1}}{E_{B2}} = \frac{r_2}{r_1}$$

41 Weber, M.: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015, S. 82.

Blickrichtung

Die angegebenen Grenzwerte für Blaulichtgefährdung der AUVA beziehen sich auf den direkten Blick in den Scheinwerfer. Dies betrifft den Bereich der Netzhaut, der für das schärfste Sehen verantwortlich ist (Makula). In der Praxis wird jedoch viel mehr der umliegende Bereich der Netzhaut bestrahlt, der für das periphere Sehen zuständig ist (vgl. 5. Praxisversuche). Dies betrifft alle Fixationen der Bereiche um den Scheinwerfer unter einem bestimmten Winkel. Daher ist es wichtig, auch den peripheren Bereich zu beachten. Die Bestrahlungsstärke E_{Φ} unter einem bestimmten Winkel Φ lässt sich mithilfe der Bestrahlungsstärke E_0 bei direktem Blick in den Scheinwerfer berechnen:

$$E_{\Phi} = E_0 \cdot \cos(\Phi)$$

Φ	10°	20°	30°	45°	60°
$\cos(\Phi)$	0,985	0,940	0,866	0,707	0,500

Der Winkel Φ bezieht sich dabei auf den relativen Winkel zwischen Blickachse des Betrachters und Strahlungsachse des Scheinwerfers (vgl. Abb. 18). Je größer der relative Winkel ist, also je größer der Abstand zwischen Blickrichtung und Scheinwerfer, desto kleiner ist die Bestrahlungsstärke E_{Φ} , wodurch die max. Expositionszeit steigt.

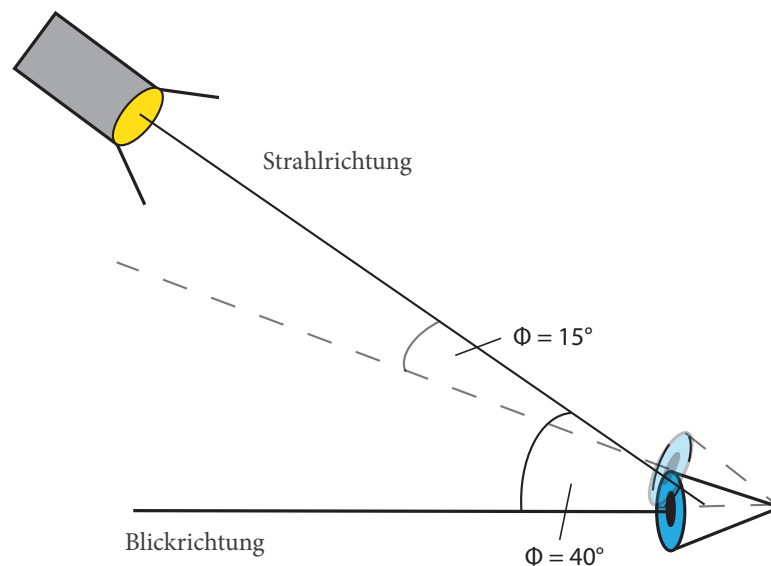


Abb. 18 Relativer Winkel zwischen Strahlrichtung und Blickrichtung

Pupillengröße

Auch der Pupillendurchmesser beeinflusst die eintreffende Strahlungsleistung auf die Netzhaut. Je nach Leuchtdichte sorgt der Adaptionsprozess des Menschen dafür, dass die Pupillengröße an die Lichtverhältnisse angepasst wird. So kann der Durchmesser der Pupillenöffnung zwischen 2 mm und 8 mm liegen.⁴² Wird man etwa durch helles Scheinwerferlicht geblendet, verringert sich der Pupillendurchmesser auf das Minimum. Für die Messungen der AUVA wurde ein Pupillendurchmesser von 3 mm angenommen. Bei einem Durchmesser von 2 mm würde sich ein Faktor von 2,25 für die max. Expositionszeit t_{\max} für Blaulichtgefährdung ergeben.

Augenbewegungen

Minimale Augenbewegungen und Sakkaden (Blicksprünge) sorgen dafür, dass der Augapfel nur für kurze Zeit komplett still steht, d.h. einzelne Fixationen i.d.R. nicht länger als 400 ms dauern (vgl. 4. Eye-Tracking, sowie 5. Praxisversuche).⁴³ Das bedeutet, dass immer andere Areale der Netzhaut vom Scheinwerferlicht bestrahlt werden. Selbst wenn man die Blendwirkung eines Scheinwerfers unterdrücken könnte und für mehrere Sekunden direkt hineinschauen würde, so würde man instinktiv nahe umliegende Punkte fixieren und somit das Mittelungssichtfeld γ erweitern. Dabei würde die abgebildete Lichtquelle auf der Netzhaut „verschmieren“ und sich auf einen größeren Bereich ausweiten. Wird die Lichtquelle jedoch mehrfach für einen kurzen Zeitraum fixiert (bspw. einzelne Fixation in die Scheinwerfermitte), so würde die Lichtquelle mehrfach im selben Bereich der Netzhaut abgebildet werden.

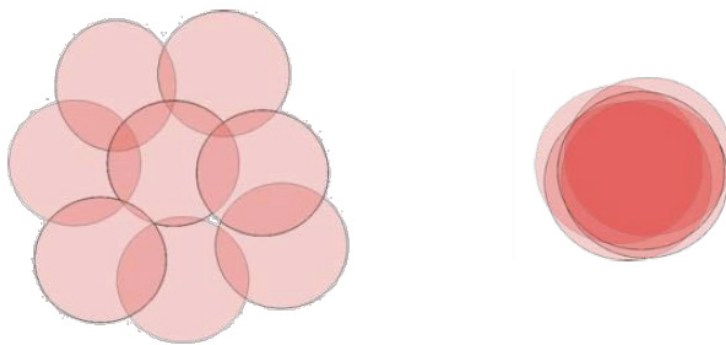


Abb. 19 links: Abbildung auf der Netzhaut verschmiert bei längerer Betrachtung ; rechts: bei mehrfacher, kürzerer Betrachtung wird das selbe Areal bestrahlt

42 <http://www.spektrum.de/lexikon/optik/pupille/2698>

43 http://www.uni-bielefeld.de/lili/personen/gnottbusch/doc/Schriftspracherwerb_10.pdf

So wurden in der DIN Norm EN 62471 folgende Messempfangswinkel γ (Mittelungssichtfeld) zur Messung von Blaulichtgefährdung festgelegt:

Blaulichtgefahr Lichtquelle	Bestrahlungsdauer t [s]	Messempfangswinkel γ [rad]
kleine Quelle, E_b	> 10000	0,1
	100 - 10000	$0,0011 \cdot \sqrt{t}$
	< 100	0,011
große Quelle, L_b	> 10000	0,1
	100 - 10000	$0,0011 \cdot \sqrt{t}$
	< 100	0,011
	0,25 - 10	$0,011 \cdot \sqrt{(t/10)}$

Quelle: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015

4. Eye-Tracking

Das Eye-Tracking-System wurde entwickelt, um das visuelle Verhalten des Menschen in verschiedensten Bereichen zu untersuchen und zu analysieren. So wird diese Methode der Blickrichtungserkennung in Gebieten der Medizin, Psychologie, Neurowissenschaften, Informatik und der Marktforschung mehr und mehr eingesetzt, um Aufschluss darüber zu bekommen, wohin der Mensch seine visuelle Aufmerksamkeit und damit die allgemeine Aufmerksamkeit richtet. Vor allem für die Verbesserung der Usability von Websites, Software, Computern oder Maschinen ist das Eye-Tracking-System ein wichtiger Standard geworden.

Das heutige Eye-Tracking-System basiert auf der Kameratechnik mit Infrarotstrahlung. Dabei werden jeweils die Pupillenbewegungen der Augen relativ zum Nullpunkt (Kalibrierungspunkt) aufgenommen, gemessen und mithilfe von Software im Livebild dargestellt.

Generell lassen sich die Augenbewegungen des Menschen, die für das Eye-Tracking von Bedeutung sind, in Sakkaden und Fixationen unterteilen.

- Sakkaden werden die kurzen, schnellen Bewegungen des Augapfels genannt. Sie helfen dabei, die Fovea Centralis, den zentralen Bereich des schärfsten Sehens, zum gewünschten Sehziel zu steuern und dienen zusätzlich der Orientierung. Sakkaden sind ruckartige Blicksprünge, in denen keine Informationen aufgenommen werden. Diese werden sowohl bewusst als auch unbewusst ausgelöst und gehören zu den schnellsten Bewegungen des Menschen. Eine Sakkade dauert typischerweise 30 ms-100 ms bei Winkeln von 4° - 60° (ohne Kopfbewegung).⁴⁴
- Die Ruhephase des Auges, in der Inhalte vom Auge aufgenommen werden können, heißen Fixationen. Dabei steht der Augapfel nicht komplett still, sondern führt minimale Bewegungen (Drifts) aus, um das Sehfeld zu vergrößern und das Gehirn immer mit neuen Informationen zu versorgen. Außerdem wird so dafür gesorgt, dass nicht dauerhaft die gleichen Rezeptoren der Netzhaut belastet werden und der Sehbereich nicht verschwimmt. Bei der Fixation sind beide Augen nicht genau auf den selben Ort gerichtet, sondern leicht versetzt. Die volle Schärfe des Sehens und damit die Aufmerksamkeit kann das Auge nur im Bereich der Fovea Centralis erzielen. Ereignisse oder Objekte, die außerhalb dieses Bereiches auf der Netzhaut abgebildet werden, können dennoch wahrgenommen werden. Diese Informationsaufnahme wird als peripheres Sehen bezeichnet und ermöglicht lediglich die grobe, unscharfe Wahrnehmung der Umgebung. Wird die Aufmerksamkeit durch Bewegung oder Helligkeitsunterschiede im peripheren Bereich gelenkt, tritt instinktiv eine sakkadische Augenbewegung auf und das Ereignis wird fixiert.

44 Galley, N.: Physiologische Grundlagen, Meßmethoden und Indikatorfunktionen, 2001, S. 237ff.

Fixationen und Sakkaden bilden die Hauptparameter des Eye-Tracking-Systems. Daraus abzuleiten sind die Anzahl von Fixationen, Fixationsdauer und Sakkadenlängen, mit denen z.B. sog. Blickpfade gebildet werden können.

Die Fixationsdauer kann Aufschluss über die Tiefe der Verarbeitung geben. So ist die Wahrscheinlichkeit der bewussten Wahrnehmung, Verarbeitung und Speicherung von Informationen bei längerer Fixationsdauer höher. Es gibt zwei Phasen der kognitiven Verarbeitung:

- In der 1. Phase, der ambienten Phase, werden Umwelt und umgebende Objekte lokalisiert. Dabei werden Bewegungen, Farben und Helligkeitseindrücke registriert. Die Phase dient vornehmlich der Orientierung.
- In der 2. Phase, der attentiven Phase, werden gezielt einzelne Objekte wahrgenommen, das Bewusstsein und die Aufmerksamkeit sind auf bestimmte Ziele gerichtet. Diese Fixationen sind vom Menschen initiiert und haben eine dementsprechend längere Dauer.

4.1 Aufnahmesysteme

Für die Aufnahme und Untersuchung der Augenbewegung haben sich zwei verschiedene Eye-Tracking-Systeme etabliert.

4.1.1 Mobile Eye-Tracking Brille

Die mobilen Eye-Tracking-Systeme sind meistens Brillen, die der Proband während des Versuches trägt. Diese sind direkt mit einem Notebook verbunden, das die Versuchsdaten aufzeichnet. Von Vorteil ist, dass das ganze System mobil ist und der Proband sich - mit dem Notebook in einem Rucksack - frei bewegen kann. So können beispielsweise Tests außerhalb von Laborbedingungen, wie z.B. im Supermarkt oder im Auto durchgeführt werden.

Die Brille ist mit insgesamt drei Kameras und einem Mikro ausgestattet. Die vordere Kamera zeichnet das Blickfeld des Probanden auf und ist in der Analyse das Bezugsbild der verschiedenen Blickpositionen. Die anderen beiden Kameras sind im unteren Bereich der Brillengläser und zeichnen jeweils die Augenbewegungen auf.



Abb. 20 SMI Eye-Tracking Brille

Übliche Geräte kommen hier von *SMI - SensoMotoric Instrument* oder *Tobii*.

4.1.2 Externe Systeme

Die externen Systeme, auch Remote Eyetracker genannt, sind stationär in Computer-Monitoren oder mit separatem Gerät unter dem Monitor angebracht. Sie bieten eine realitätsnähere Situation und beeinflussen den Probanden nicht durch eine Brille. Diese Methode eignet sich vor allem zur Untersuchung der Usability von Websites oder Softwareprogrammen. Von den zwei externen Kameras mit Infrarottechnik werden die Augenbewegungen ohne jeglichen Berührungspunkt gemessen. Das Bezugsbild ist hierbei der angeschaute Content auf dem Monitor selbst. Die Analyse kann hier direkt verarbeitet werden, während die Fixationen beim mobilen Eyetracking manuell auf ein Referenzbild bezogen werden müssen.



Abb. 21 SMI - Remote Eye-Tracker

4.2 Software Analyse

In den folgenden Versuchen wurde das mobile Eye-Tracking-Glases-System der Firma *SMI - SensoMotoric Instrument* verwendet. Um die aufgenommenen Daten eines mobilen Systems analysieren zu können, wird zunächst ein Referenzbild benötigt, auf das die einzelnen Augenbewegungen bezogen werden. Hierzu kann wahlweise ein Screenshot aus dem Video der Vorderkamera, ein Foto des gesamten Sichtbereichs der Versuchsperson (Panorama-Aufnahme) genommen oder eine Grafik erstellt werden, auf der alle relevanten Blickbereiche des Versuchs skizziert sind.

Jede neue Fixation, die auf eine Sakkade folgt, wird als Event bezeichnet und im Bild manuell aufgezeichnet. Die Software *BeGaze* von SMI bietet nun mehrere Möglichkeiten, um das aufgenommene Material auszuwerten und zu analysieren:

- Der Scan-Path visualisiert alle Events des Versuches zusammen im Referenzbild und verbindet sie miteinander. So kann man zum einen erkennen, in welche Bereiche die Versuchsperson besonders häufig geschaut hat und zum anderen in welcher Reihenfolge die verschiedenen Blickbewegungen aufeinander folgten. Dies ist eine der am häufigsten verwendete Analysemethoden bei Eye-Tracking und wird vor allem im Bereich

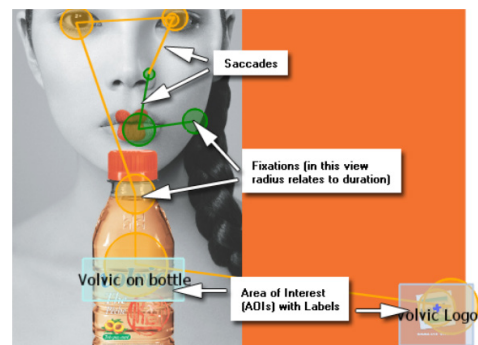


Abb. 22 Scan Path

von Software- und Website-Analyse bevorzugt.

- Mit einer Focus Map lassen sich Gebiete und Punkte im Sichtfeld visualisieren, die besonders oft von der Versuchsperson fokussiert wurden. Dabei wird die Helligkeit in Bezug auf die Anzahl der Fixationen gesetzt. Zunächst ist das komplette Referenzbild schwarz dargestellt. In denjenigen Bereichen des Bildes, die oft fixiert werden, wird die schwarze Bildmaske transparenter. So sind am Ende die am häufigsten betrachteten Bereiche in ihrer normalen Helligkeit dargestellt, während die weniger häufig fixierten Stellen dunkel bis schwarz bleiben.

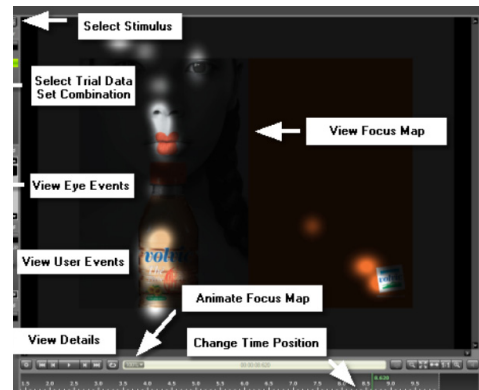


Abb. 23 Focus Map

- Entsprechend der Focus Map lässt sich mit einer Heat Map die absolute Fixationsdauer bestimmter Bereiche im Sichtfeld der Versuchsperson visualisieren. Fokussierte Bereiche werden ähnlich einer Wärmebildkamera in verschiedenen Farben dargestellt. Beginnend bei blau (wenig fixiert) wird das Farbspektrum bis zu rot (häufig fixiert) durchlaufen. Mithilfe einer Legende lassen sich Farben der jeweiligen Fixationsdauer zuordnen. Dabei werden die Fixationszeiten des gesamten Versuches summiert und im Referenzbild dargestellt.

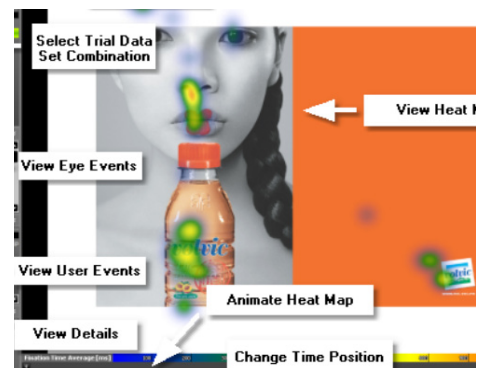


Abb. 24 Heat Map

- Mit Areas of Interest (AOI) können einzelne Bereiche des Sichtfeldes genauer untersucht werden. Dabei werden Anzahl und Dauer von Fixationen auf die AOI bezogen, um die relative und absolute Häufigkeit der Fixationen auf bestimmte Objekte oder Bildbereiche zu analysieren. Dazu gehören Fixationen an sich und kurze Sakkaden innerhalb der Areas of Interest. Die einzelnen Bereiche, die speziell untersucht werden sollen, können vom Benutzer selber im Referenzbild oder dem Video ausgewählt werden. Während vorherige Analysemethoden das Ergebnis des Versuches eher visualisieren und Tendenzen aufweisen, können mit den AOI statistische Auswertungen und Ergebnisse erzielt werden. Auch hier gibt es mehrere Methoden.
- Mithilfe der Key Performance Indicators können quantitative, statistische Ergebnisse für die einzelnen AOI im Bild visualisiert werden. Untersucht werden können hierbei in Bezug auf die AOI die Reihenfolge der Fixationen, die Eintrittsdauer, die absolute



Abb. 25 AOI / Key Performance Indicators

Verweildauer innerhalb einer AOI, die Häufigkeit der Fixationen einer AOI, die Zeit bis zum ersten Eintritt der AOI und viele weitere Indikatoren, die direkt im Referenzbild angezeigt werden.

- Gridded Areas of Interest sind eine Kombination aus Heatmap und Key Performance Indicators. Das Referenzbild wird in einem gleichmäßigen Raster aus AOI eingeteilt. Die einzelnen Bereiche färben sich in Bezug auf die Fixationsdauer in Farben von blau (wenig Fixationen) bis zu rot (viele Fixationen) und geben gleichzeitig die Parameter der Key Performance Indicators für die einzelnen Flächen an.



Abb. 26 Gridded Areas of Interest

- Der AOI Sequence Chart visualisiert das Ergebnis nicht im Referenzbild, sondern bezieht sich auf die Timeline des gesamten Versuches. Die vom Benutzer eingeteilten Areas of Interest werden in einem Diagramm gegen die Zeit der Timeline aufgetragen. Daraus ist erkennbar, zu welchem Zeitpunkt, wie häufig und wie lange bestimmte Bereiche fixiert werden.

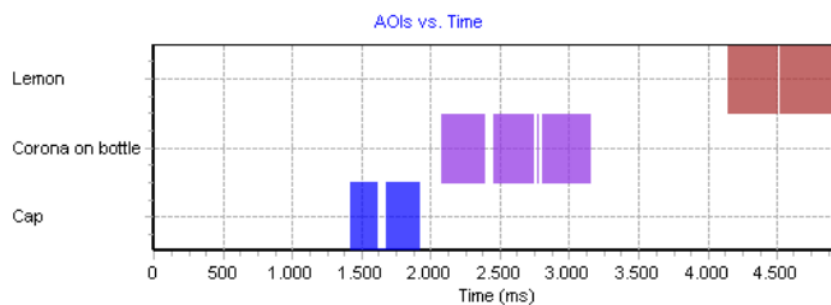


Abb. 27 Sequence Chart

5. Praxisversuche

In den Praxisversuchen soll mithilfe eines mobilen Eye-Tracking-Systems herausgefunden werden, wie oft und wie lange Moderatoren und Nachrichtensprecher in TV-Studios sowie Schauspieler in Theatern direkt in Scheinwerfer oder in deren unmittelbares Umfeld schauen.

5.1 Vorversuche

Die Vorversuche wurden im Lichtlabor der HAW Hamburg durchgeführt. Als realistische Versuchsperson für eine Theater-Situation war eine Schauspielstudentin des dritten Semesters der Schauspielschule Frese im Einsatz. Mit ihrer Hilfe wurden vier mögliche Szenarien auf der Bühne untersucht.

- Theater Monolog bei 2000 lx
- Theater Dialog bei 500 lx
- Zuschauer mit LED-Wand
- TV Moderator mit Teleprompter bei 1000 lx

Für die Versuche 1-3 wurden drei 1 kW Halogen-Fresnelscheinwerfer und ein 1 kW LED Fresnelscheinwerfer (ARRI L7-C) als Vorderlicht, sowie zwei 1 kW Halogen-Fresnelscheinwerfer als Kante verwendet. Die Kombination aus LED- und Halogenscheinwerfer wurde hier gewählt, um herauszufinden, ob es einen Unterschied für das Blickverhalten der Versuchsperson macht.

Für den Versuch 4 wurde eine klassische Dreipunktausleuchtung gewählt mit einem 1 kW Halogen-Fresnelscheinwerfer und einem 1 kW ARRI L7-C als Führungslicht und Aufhellung sowie einem 1 kW Halogen-Fresnelscheinwerfer als Kante.

Alle Scheinwerfer haben eine Höhe von 4,5 m. Die Gegenlicht-Scheinwerfer besitzen dabei einen Winkel von 45°, die Vorderlicht-Scheinwerfer einen Winkel von ca. 35°, da die Deckenhöhe keinen steileren Winkel erlaubt. Diese haben einen Abstand von ca. 6,5 m zur Versuchsperson.

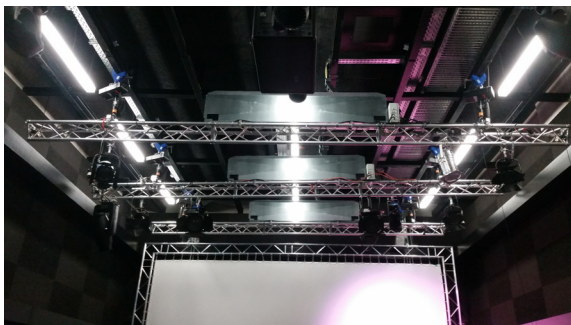


Abb. 28 Lichtlabor - Vorderlicht

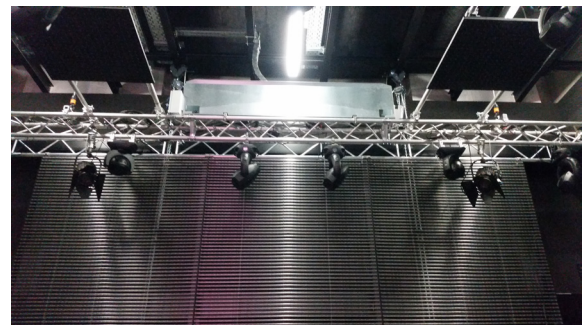


Abb. 29 Lichtlabor - Gegenlicht + LED-Wand

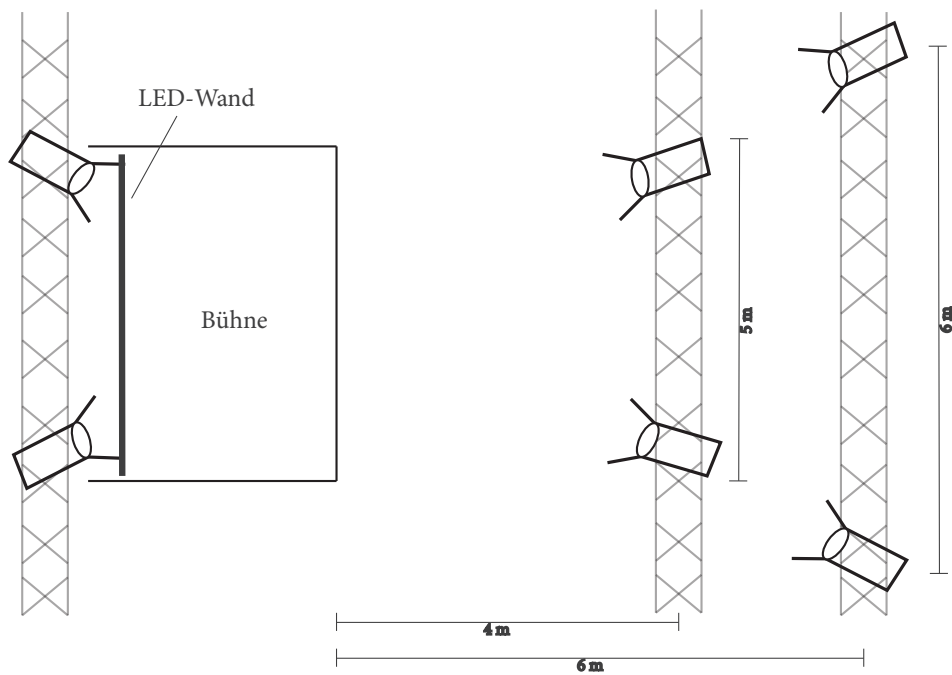


Abb. 30 Vorversuche: Beleuchtungsplan Lichtlabor

5.1.1 Theater Monolog bei 2000 lx / Theater Dialog bei 500 lx

Es wurde bewusst ein Monolog gewählt, bei dem die Schauspielerin ins Publikum blickt, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass sie in einen Scheinwerfer schaut und somit eine „worst-case“-Situation vorliegt. Bei bspw. Dialogen auf der Bühne, die den Großteil einer Theatervorstellung ausmachen, ist es weniger wahrscheinlich in einen Scheinwerfer zu schauen.



Abb. 31 Vorversuch Theater Monolog/Dialog

Ergebnis Theater Monolog bei 2000 lx

Schon bei der visuellen Heat-Map der Eye-Tracking Software BeGaze (vgl. Abb. 33) wird deutlich, dass die Schauspielerin keinen festen Punkt hat zu dem sie schaut, da sie zu sich selbst spricht. Ihre Blicke wandern durch den gesamten „Zuschauerraum“ (blaue Bereiche). Der Großteil der Blicke befinden sich auf ihrer Augenhöhe und in der Mitte zentriert (gelber/roter Bereich). Wenige Blicke gehen darüber hinaus. Deutlicher und genauer lässt sich die Situation mit den „Key Performance Indicators“ (vgl. Abb. 34) analysieren.



Abb. 32 Referenzbild Schauspielerin



Abb. 33 Heat Map Monolog

Hier wird das Blickfeld der Versuchsperson manuell in bestimmte Bereiche unterteilt, die untersucht werden können. Folgende Areas of Interest sind hier gewählt worden: Scheinwerfer links, Scheinwerfer rechts, zwischen den Scheinwerfern, Zone 1 mit relativem Winkel 10° - 20° (zwischen Scheinwerfer und Blickpunkt), Zone 2 mit relativem Winkel 20° - 30° , Zone 3 mit relativem Winkel 30° - 45° und der White Space, welcher außerhalb des untersuchten Sichtfeldes liegt.

Bei dem untersuchten Monolog, der eine Dauer von ca. sieben Minuten hatte, hat die Versuchsperson nur ein einziges Mal direkt in einen Scheinwerfer (rechts) geschaut. Diese Fixation hat nur eine Dauer von 66,4 ms, was bedeutet, dass die Blendung des Scheinwerfers zu einem schnellen Blickwechsel (Sakkade) geführt hat. Auch zwischen den Scheinwerfern landen lediglich zwei kurze Fixationen mit einer Gesamtdauer von 232 ms. Je größer der Abstand bzw. Winkel zwischen Blickpunkt und Scheinwerfer ist, desto öfter wird der jeweilige Bereich fixiert. D.h. die Versuchsperson schaut häufiger in die Bereiche, die am weitesten vom Scheinwerfer entfernt liegen (Zone 3). Die Gesamtfixationsdauer in Zone 1 ist 6,38 s mit einer

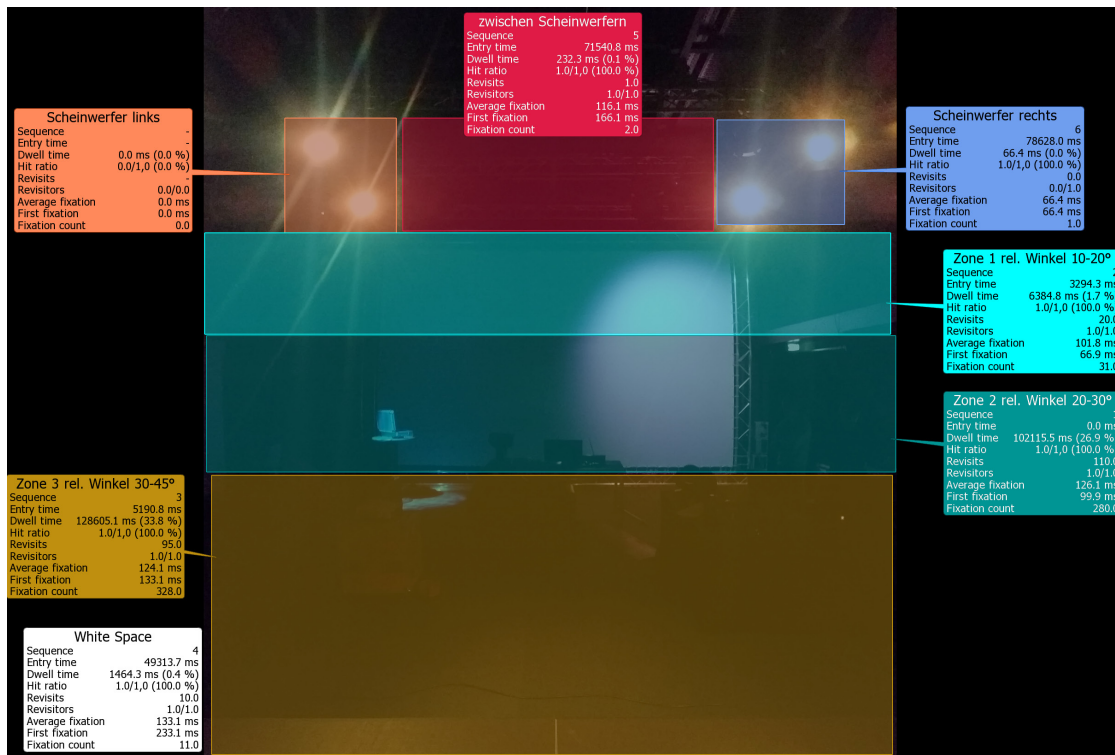


Abb. 34 Key Performance Indicators Monolog

durchschnittlichen Fixationsdauer von 101 ms, in Zone 2 liegt die Gesamtfixationsdauer bei 1 min 42 s mit einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 126 ms, in Zone 3 liegt die Gesamtfixationsdauer bei 2 min 8 s mit einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 124 ms.



Abb. 35 Heat Map Dialog

Ergebnis Theater Dialog bei 500 lx

Bei diesem Versuch wurde die Beleuchtungsstärke auf 500 lx herabgesetzt, um herauszufinden, ob dies einen Unterschied in Bezug auf Blendung und Blickrichtung macht. Weiterhin hat die Schauspielerin bei diesem Versuch einen ca. 4-minütigen Dialog mit zwei imaginären Personen - eine rechts im Zuschauerraum und eine links auf der Bühne - gehalten.

Auf der Heat Map (vgl. Abb. 35) wird deutlich, dass die Blicke weniger umherirren, sondern gezielter auf einzelne Bereiche fallen. Der am meisten fixierte Bereich ist der imaginäre

Gesprächspartner (gelb-roter Bereich). Weitere Blicke gehen weniger in die Publikumsmitte, sondern mehr zu den Bereichen um die jeweilige Gesprächsperson (blaue Bereiche). Deutlicher ist dies auch hier anhand der „Key Performance Indicators“ zu analysieren.

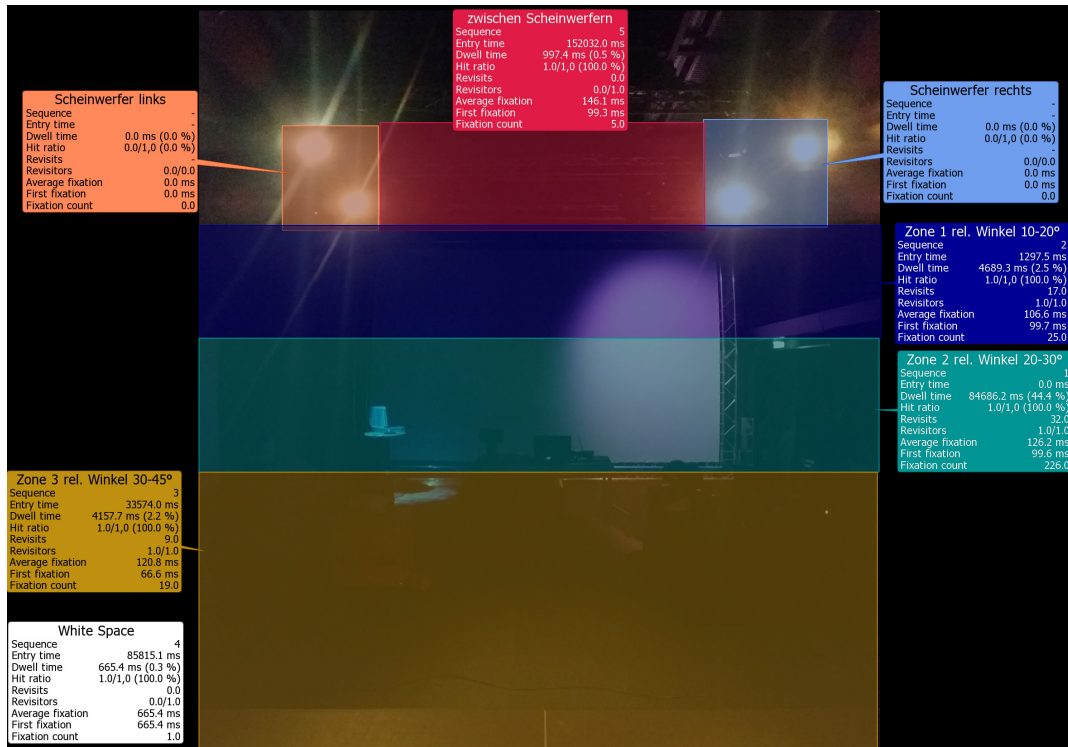


Abb. 36 Key Performance Indicators Dialog

Bei diesem Versuch hat die Schauspielerin nicht direkt in die Scheinwerfer geschaut. Nur fünf kurze Fixationen fielen in den Bereich zwischen den Scheinwerfern mit einer Gesamtfixationsdauer von 997 ms und einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 146 ms. Die meisten Fixationen liegen bei diesem Versuch in Zone 2 mit relativem Winkel 20°-30°, da sich hier der Gesprächspartner befindet. 44% der Fixationen haben hier eine Gesamtfixationsdauer von 1 min 24 s mit einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 126 ms. Zone 1 hat hier nur eine Gesamtfixationsdauer von 4,6 s.

Die heruntergesetzte Beleuchtungsstärke von 500 lx hat zwar eine geringere Blendwirkung, dennoch schaut die Schauspielerin kein einziges Mal direkt in einen Scheinwerfer, was bedeutet, dass der direkte Blick in den Scheinwerfer auch bei geringer Beleuchtungsstärke intuitiv eher vermieden wird.

5.1.2 Zuschauer mit LED-Wand



Abb. 37 Vorversuch Zuschauer mit LED-Wand

Bei diesem Versuch wurde das Blickverhalten eines Zuschauers bei einer TV-Show oder einem Konzert mit LED-Wand im Hintergrund untersucht. Während die Schauspielerin auf der Bühne den Monolog aufgeführt hat, wurde mithilfe der Eye-Tracking Brille untersucht, wie oft und wie lange der Zuschauer auf die LED-Wand schaut. Diese wurde mit sich bewegenden Inhalten in den Farben grün und blau bespielt.



Abb. 38 Referenzbild Zuschauer

Ergebnis

Focus Map und Heat Map von BeGaze veranschaulichen, dass der Zuschauer größtenteils auf die Schauspielerin auf der Bühne fixiert ist. Speziell auf die Gestikulation der Hände und das Gesicht (roter Bereich) sowie Bewegungen der Beine (grüner Bereich) scheint sich der Zuschauer am meisten zu konzentrieren und somit zu fixieren. Auffällig ist jedoch, dass auch die Bewegungen der LED-Wand häufig fixiert werden (blaue/grüne Punkte), besonders der Bereich in Kopfnähe (roter Punkt), bei dem der Blick schnell zur Bewegung der LED-Wand überspringen kann.

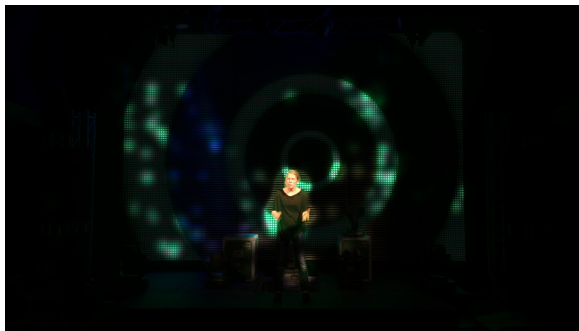


Abb. 39 Focus Map Zuschauer



Abb. 40 Heat Map Zuschauer

Bei den Key Performance Indicators wurden bei diesem Versuch lediglich zwei Areas of Interest festgelegt: die Schauspielerin und die LED-Wand. Die vorhandenen Fresnel Scheinwerfer nebst zwei zusätzlichen LED Wash Moving Heads, die auf die LED-Wand ausgerichtet sind, wurden bei diesem Versuch nicht mit einbezogen, da sie lediglich die Bühne beleuchten und den Zuschauer nicht beeinflussen.



Abb. 41 Key Performance Indicators Zuschauer

Die Fixationen auf die Schauspielerin haben eine Gesamtdauer von 4 min 45 s bei einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 706 ms. Diese ist im Vergleich zu den anderen Versuchen deutlich höher, da der Bereich, auf den sich der Zuschauer konzentriert, eindeutig und verhältnismäßig klein ist. Dieser Bereich wird zu 85% der gesamten Aufführung vom Zuschauer fixiert. Die LED-Wand hat die Versuchsperson mit einer Gesamtfixationsdauer von 30,6 s und durchschnittlicher Fixationsdauer von 248 ms zu 9% der Zeit fokussiert.

5.1.3 TV Moderator mit Teleprompter bei 1000 lx



Abb. 42 Vorversuch Moderator mit Teleprompter

Bei diesem Versuch wurde eine TV-Studio Situation eines Moderators mit klassischer Dreipunktausleuchtung nachgestellt. Als Teleprompter wurde hier eine Flipchart-Tafel verwendet, von der der Moderator den Text ablesen konnte. Bei einer Gesamtzeit von etwa drei Minuten wurde der Text mehrfach gelesen. Untersucht werden sollte hier, ob der Moderator lediglich auf den

Teleprompter schaut oder auch in die Scheinwerfer.

Ergebnis

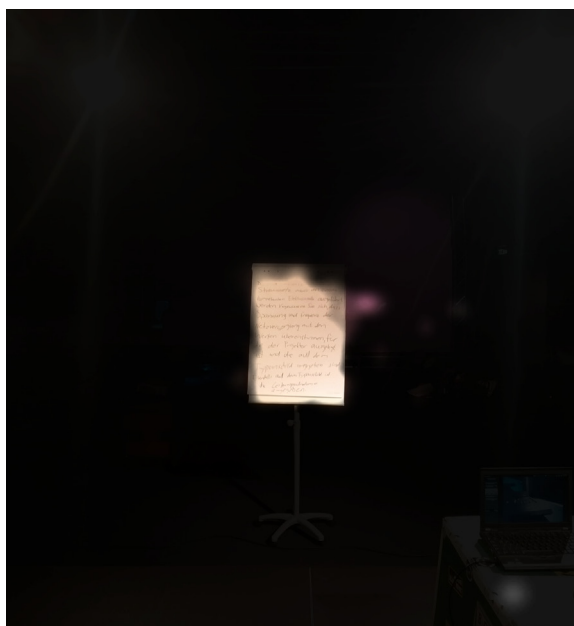


Abb. 43 Focus Map Moderator



Abb. 44 Scan Path Moderator

Focus Map und Scan Path (vgl. Abb. 43 u. 44) veranschaulichen deutlich, dass der Moderator bei diesem Versuch nahezu ausschließlich den Teleprompter fokussiert. Einige wenige Fixationen landen im Umfeld des Teleprompters, jedoch auf Augenhöhe.

Auch die Key Performance Indicators zeigen, dass die Scheinwerfer oder deren Umfeld zu keinem Zeitpunkt fokussiert wurden, sondern ausschließlich der Teleprompter zu 95%.

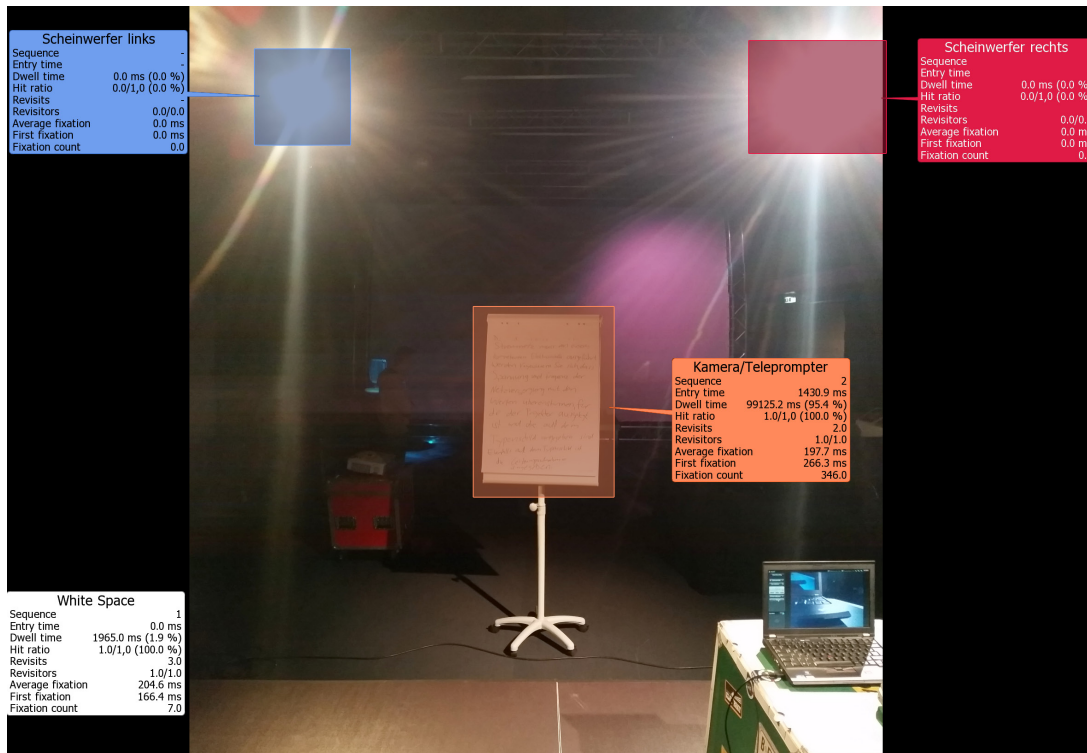


Abb. 45 Key Performance Indicators Moderator

5.1.4 Fazit

Die Vorversuche haben gezeigt, dass die Versuchspersonen intuitiv den direkten Blick in den Scheinwerfer meiden. Durch die Blendwirkung bleiben Blicke eher von Scheinwerfern entfernt. Bei den Versuchen gab es nur eine einzige direkte Fixation eines Scheinwerfers, die eine Verweildauer von 66,4 ms hatte. Dennoch werden die Versuchspersonen im peripheren Bereich der Netzhaut in bestimmten Winkeln von 10° - 45° von den Scheinwerfern bestrahlt. Auch dies könnte zu einer gewissen Schädigung dieses Bereiches führen. Mit folgender Formel kann die Bestrahlungsstärke unter einem bestimmten Winkel berechnet werden: $E_{\Phi} = E_0 \cdot \cos(\Phi)$

Da hier Halogenscheinwerfer verwendet wurden, ist jedoch davon auszugehen, dass keine Gefährdung bestand.

5.2 Versuch NDR - Hamburg Journal

Um nun herauszufinden, wie das Blickverhalten unter professionellen, realen Bedingungen in TV-Studios aussieht, wurde der Hauptversuch im Hamburg Journal Studio des NDR in Hamburg Lokstedt durchgeführt. Als Versuchsperson hat Kristina Gruse, Nachrichtensprecherin des Hamburg Journals, im Anschluss an die Sendung die Nachrichten des Tages verlesen.



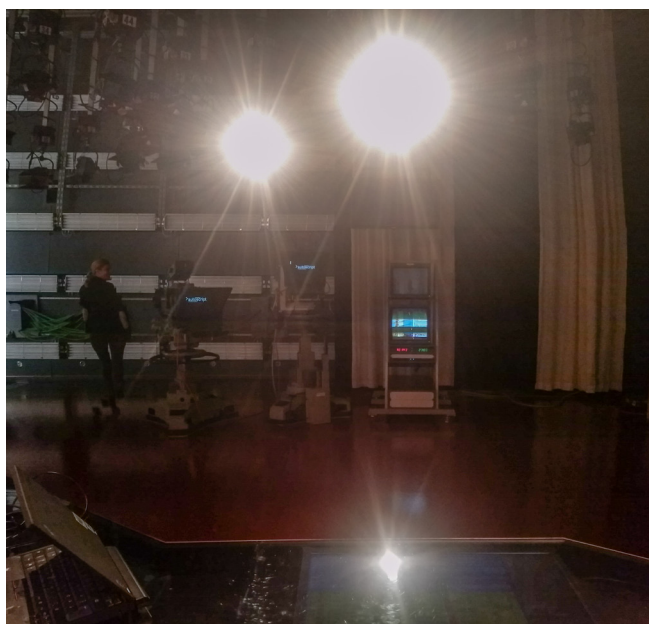
Abb. 46 Messung im Hamburg Journal Studio mit Kristina Gruse

5.2.1 Aufbau

Das Hamburg Journal Studio des NDR wird von ca. 100 Scheinwerfern ausgeleuchtet. Fast ausschließlich werden hierbei *DeSisti Leonardo* 1 kW Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer eingesetzt. Dabei handelt es sich um die gleichen Scheinwerfer, die auch bei den Vorversuchen verwendet wurden. Auch zur Ausleuchtung der Nachrichtensprecherin ist der Aufbau nahezu identisch zu dem des Vorversuches (vgl. 5.1.3 TV Moderator mit Teleprompter bei 1000 lx). Hier werden zwei 1 kW Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer als Führungslicht und Aufhellung verwendet sowie ein 1 kW Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer als Kante von hinten. Ein weiterer 1 kW Fresnelscheinwerfer, der weiter seitlich von rechts strahlt, dient als zusätzliche Aufhellung und befindet sich nicht im Blickfeld der Nachrichtensprecherin. Die übrigen Scheinwerfer dienen zur Ausleuchtung des Studios und liegen ebenfalls nicht im Sichtfeld der Nachrichtensprecherin. Diese sind somit für den Versuch nicht weiter relevant (vgl. Anhang Abb. 76 - Vereinfachter Beleuchtungsplan).

Allgemein wird in TV-Studios eher „flach“ geleuchtet, d.h. die Scheinwerfer hängen relativ niedrig und haben einen niedrigen Neigungswinkel. Würden die Scheinwerfer höher hängen und einen größeren Winkel haben, so würde dies einen größeren Schlagschatten im Gesicht der beleuchteten

Person erzeugen. Die flache Beleuchtung führt allerdings dazu, dass die Scheinwerfer mehr im Blickfeld der Sprecher/Moderatoren liegen und diese teilweise geblendet werden.



Die vorderen beiden Scheinwerfer befinden sich rechts und links nahe der Kamera in einem Abstand von ca. 6 m zum Sprecherpult. Sie haben eine Höhe von ca. 4 m und ihr Neigungswinkel beträgt etwa 30°. Der Kantenscheinwerfer von hinten hat einen Neigungswinkel von ca. 60°. Nimmt man eine Augenhöhe von 1,80 m der Nachrichtensprecherin an, ergibt sich ein Abstand von ca. 6,4 m zu den vorderen Scheinwerfern.

$$r = \sqrt{(6)^2 + (4 - 1,8)^2} = 6,4 \text{ m}$$

Abb. 47 Referenzbild Hamburg Journal

Die Beleuchtungsstärke auf der Position der Nachrichtensprecherin beträgt ca. 800 lux.

Die 18 Uhr Nachrichten des Hamburg Journals haben eine Gesamtdauer von 15 min. Davon sind etwa 3 min 20 s reine Sprechzeit der Nachrichtensprecherin, der Rest der Sendezeit wird durch Beiträge gefüllt. Während des Versuches hat Nachrichtensprecherin Kristina Gruse die Nachrichten am Stück vom Teleprompter gelesen.

5.2.2 Analyse



Abb. 48 Scan Path Hamburg Journal



Abb. 49 Heat Map Hamburg Journal

In den Auswertungstools Scan Path und Heat Map (vgl. Abb. 48 u. 49) der Software wird deutlich, dass die Nachrichtensprecherin überwiegend den Teleprompter fixiert. Weitere Fixationspunkte der Messung sind die zweite Kamera links (auf der auch der Text angezeigt wurde), ein Monitor rechts neben der Kamera, der das Kamerabild anzeigt, sowie das Moderationspult, auf dem der ausgedruckte Text liegt. Eine weitere Fixation liegt im leeren Raum auf Augenhöhe. Es gibt keine Fixation oberhalb der Kamera.



Abb. 50 Key Performance Indicators - Hamburg Journal

Auch die Auswertung der Key Performance Indicators beweist nochmals, dass zu keinem Zeitpunkt Scheinwerfer oder umliegende Bereiche fixiert werden. Der Teleprompter wird mit 2 min 11 s zu 70% fixiert. Dabei beträgt die durchschnittliche Fixationszeit 115 ms. Der relative Winkel zu den Scheinwerfern beträgt in dieser Blickrichtung etwa 25°. Dadurch würde sich ein Faktor von $\cos_{\phi} (25^{\circ}) = 0,906$ der direkten Bestrahlungsstärke E_B ergeben.

Der Monitor mit Kamerabild wurde insgesamt 1,8 s fixiert mit einer durchschnittlichen Fixationszeit von 87,7 ms. Für diese Blickrichtung ergibt sich ein relativer Winkel von ca. 30° zu den Scheinwerfern. Daraus folgt ein Faktor von $\cos_{\phi} (30^{\circ}) = 0,866$ der direkten Bestrahlungsstärke E_B .

Zwischen den Nachrichtenthemen wird oft das Moderationspult fixiert. Einige Sprecher lesen die Texte, die über die Beiträge gesprochen werden vom Blatt ab und fixieren damit für längere Zeit diesen Bereich. Im konkreten Fall wurden keine Beiträge abgespielt und der Text lediglich vom Teleprompter abgelesen. So wurde der Bereich des Pultes insgesamt für 7,7 s fixiert bei einer durchschnittlichen Fixationszeit von 118 ms. Der relative Winkel zu den Scheinwerfern liegt hier

bei $70^\circ - 80^\circ$. Daraus würde sich ein Faktor von $\cos_\phi (70^\circ - 80^\circ) = 0,342 - 0,173$ der direkten Bestrahlungsstärke E_B ergeben.

5.2.3 Fazit

Die Messung im Hamburg Journal Studio hat das Ergebnis der Vorversuche bestätigt. Die Scheinwerfer werden von der Nachrichtensprecherin während der Nachrichtensendung nicht fixiert. Durch die „flache“ Beleuchtung im TV- Studio wird die Person ohnehin schon teilweise vom Scheinwerferlicht geblendet und vermeidet instinktiv den direkten Blick in den Scheinwerfer. Weitere Fixationen liegen somit eher weiter entfernt vom Scheinwerfer. Die „flache“ Beleuchtung sorgt jedoch dafür, dass der Winkel zwischen Blickachse zum Teleprompter und Strahlrichtung der Scheinwerfer relativ klein ist und daher bis zu 90% der direkten Bestrahlungsstärke E_0 auf der Netzhaut der beleuchteten Person ankommt. Diese trifft zwar nicht den Bereich der Fovea Centralis, jedoch den nahen unterhalb liegenden Bereich der Netzhaut, was sich im schlechtesten Fall negativ auf das periphere Sehen auswirken könnte.

Im Falle des Hamburg Journals stehen Nachrichtensprecher allerdings nur für eine Zeit von ca. 3 min 20 s im Scheinwerferlicht der 18 Uhr Sendung. Hinzu kommen zwei kleinere Nachrichtenblöcke in der Hauptsendung des Hamburg Journals um 19.30 Uhr. Dort ergibt sich eine Gesamtzeit von etwa 5 min, in der Nachrichtensprecher dem Scheinwerferlicht ausgesetzt sind. Anzunehmen ist, dass sie dabei höchstens für sehr kurze Zeit einen Scheinwerfer fixieren und die meiste Zeit in die Kamera bzw. den Teleprompter schauen. Die Zeit verringert sich nochmals, wenn die Sprecher den Text während der Video-Beiträge vom Blatt statt vom Teleprompter lesen, da unter diesem Blickwinkel die Bestrahlungsstärke der Scheinwerfer vernachlässigbar ist.

Der wohl wichtigste Aspekt der Gefährdungsbeurteilung ist jedoch der, dass in diesem Studio ausschließlich Halogenscheinwerfer mit einer Beleuchtungsstärke von etwa 800 lux zum Einsatz kommen. Wie von der AUVA untersucht und bewertet, ist davon auszugehen, dass bei diesen Scheinwerfern bei angegebenen Abstand und Beleuchtungsstärke höchstwahrscheinlich keine Gefährdung besteht.

5.3 Versuch Thalia Theater

Der zweite Hauptversuch wurde auf der Studiobühne des Thalia Theaters Gaußstraße durchgeführt, das 200 Zuschauerplätze aufweist. Als Versuchsperson fungierte Steffen Siegmund, Hauptdarsteller des Stückes „Tschick“. Vor der eigentlichen Vorstellung des Stückes wurden während des Soundchecks insgesamt zwei Messungen durchgeführt. In der ersten Messung hat Steffen

Siegmund einen Monolog vornehmlich in Richtung des Publikums gespielt. In der zweiten Messung hat er zusammen mit Schauspielpartner Pascal Houdus einen Dialog aus dem Stück „Tschick“ aufgeführt.



Abb. 51 Messung Thalia Theater

5.3.1 Aufbau

Während des Theaterstückes gibt es mehrere Lichtstimmungen, d.h. unterschiedliche Scheinwerfer werden ein- und ausgeschaltet. Zumeist sind dabei mehrere Scheinwerfer gleichzeitig in Betrieb. Aus diesem Grund kann keine einheitliche Beleuchtungsstärke angegeben werden. Um für die Messungen alle möglichen „Gefahrenquellen“ miteinzubeziehen, wurden alle Scheinwerfer des Stückes eingeschaltet und auf ca. 60% gedimmt. Dies betraf 16 2 kW Halogen-Stufenscheinwerfer als Frontlicht sowie 17 2 kW Halogen-Stufenscheinwerfer als Oberlicht. Diese sind auf vier verschiedene Traversen aufgeteilt und haben einen Neigungswinkel zwischen 45° und 90° . Zusätzlich wurden drei Profilscheinwerfer *Niethammer HPZ 2 kW* als Frontlicht dazugeschaltet, die im Normalfall während des Stückes nicht verwendet werden. Diese haben einen flachen Neigungswinkel von 10° bis 20° . Da sich die Schauspieler auf der Bühne ständig bewegen, kann kein genauer Abstand zu den Scheinwerfern angegeben werden, sondern lediglich ein Bereich von 12 bis 25 m (vgl. Anhang - Beleuchtungsplan Thalia).



Abb. 52 Referenzbild - Thalia Gaußstr.

Das Theaterstück hat eine Gesamtlänge von etwa 1 Std. 30 Min. Die beiden Monolog- und Dialogszenen hatten in der Messung jeweils eine Länge von etwa vier Minuten.

5.3.2 Analyse

Da die Schauspieler während der Messungen in verschiedene Richtungen schauen und sich dabei bewegen, ist das Sichtfeld für die Personen in diesem Fall 360°. Als Referenzbild wurde hier die Sicht in Richtung Publikum verwendet, da dies die Hauptblickrichtung ist und sich dort die meisten Scheinwerfer befinden, die im Sichtfeld der Schauspieler liegen. Fixationen, die über diesen Bereich hinausgehen, wurden außerhalb des Referenzbildes markiert.



Abb. 53 Scan Path Monolog



Abb. 54 Scan Path Dialog

Der Scan Path (vgl. Abb. 53) bestätigt, dass der Schauspieler während des Monologes nahezu den ganzen Raum fixiert und dabei keinen speziellen Anhaltspunkt hat. In der Heat Map ist zudem zu erkennen, dass sich Fixationen allerdings im oberen Mittelfeld des Publikums sowie auf dem Boden häufen. Einige Fixationen erreichen auch den Deckenbereich des Theaters und liegen oftmals zwischen den Stufenlinsenscheinwerfern. Die linken beiden der drei hell-leuchtenden Profilscheinwerfer werden ebenfalls fixiert.

In der Messung des Dialoges zeigen Scan Path und Heat Map auch ein breites Feld an Fixationen, jedoch mit zwei Häufungen in der oberen Zuschauermitte unterhalb der Profilscheinwerfer und im Bereich des Dialogpartners, links im Bild (vgl. Abb. 54 und 55). Weitere Fixationen zielen

in die Theaterdecke und auf den Boden. Auch während des Dialogs fixiert der Schauspieler die linken beiden Profilscheinwerfer sowie einen der Stufenlinsenscheinwerfer.

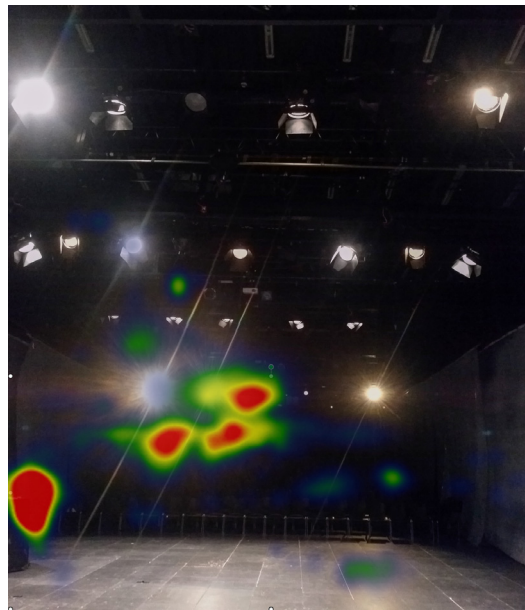


Abb. 55 Heat Map Dialog Thalia Theater

Für die genauere Auswertung der Key Performance Indicators wurden die Areas of Interest jeweils in zwei verschiedene Grafiken unterteilt, um die Vielzahl der Scheinwerfer einzeln untersuchen zu können. Die erste Grafik beinhaltet jeweils die Profilscheinwerfer 1-3 sowie die Bereiche „Publikum“, „Boden“ und „Schauspielpartner“ (vgl. Abb. 56 u. 57), in denen die meisten Fixationen liegen. Die zweite Grafik beinhaltet jeweils die 16 einzelnen Stufenlinsenscheinwerfer.

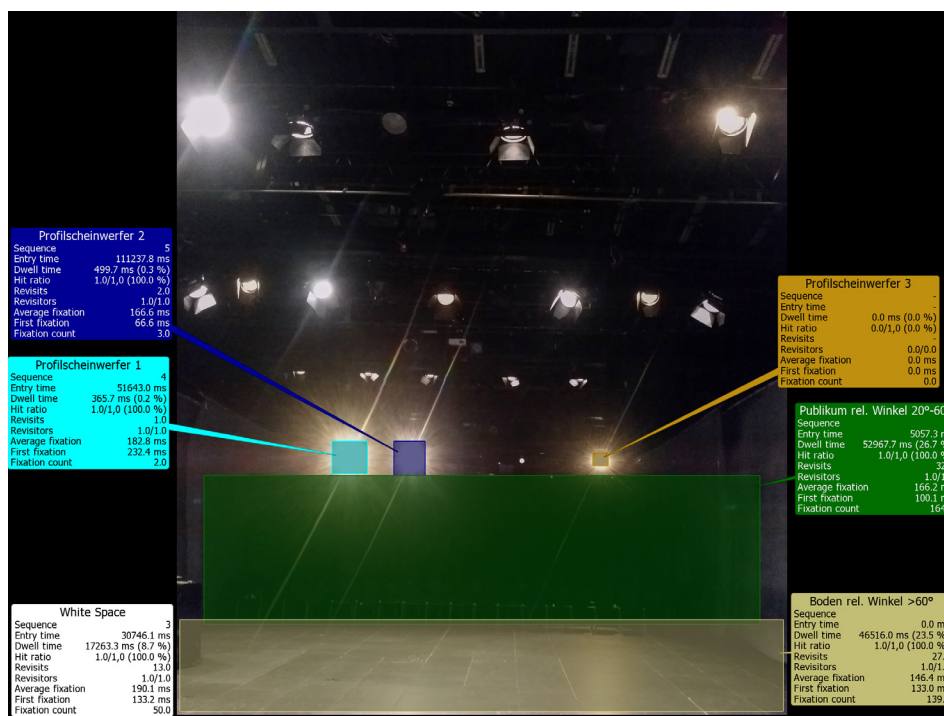


Abb. 56 Key Performance Indicators Monolog

In der Messung des Monologes wird der Profilscheinwerfer 1 zweimal fixiert für eine Gesamtdauer von 365,7 ms bei einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 182 ms. Der Profilscheinwerfer 2 wird dreimal fixiert für eine Gesamtdauer von 499,7 ms bei einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 166 ms. Der Profilscheinwerfer 3 im rechten Bereich des Bildes wird nicht fixiert. Der Publikumsbereich wird mit 52,9 s zu 26,7% fixiert. Die durchschnittliche Fixationsdauer liegt hier bei 166 ms. Der relative Winkel zwischen den Profilscheinwerfern und der Blickrichtung des Schauspielers ist dabei etwa 20°-60°. Daraus würde sich ein Faktor von \cos_{ϕ} (20°- 60°) = 0,939 - 0,500 der direkten Bestrahlungsstärke E_b der Profilscheinwerfer ergeben. Der Boden wird mit 46,5 s zu 23,5% fixiert. Diese Blickrichtung kann aufgrund des hohen rel. Winkels > 60° als nicht gefährdend eingestuft werden.

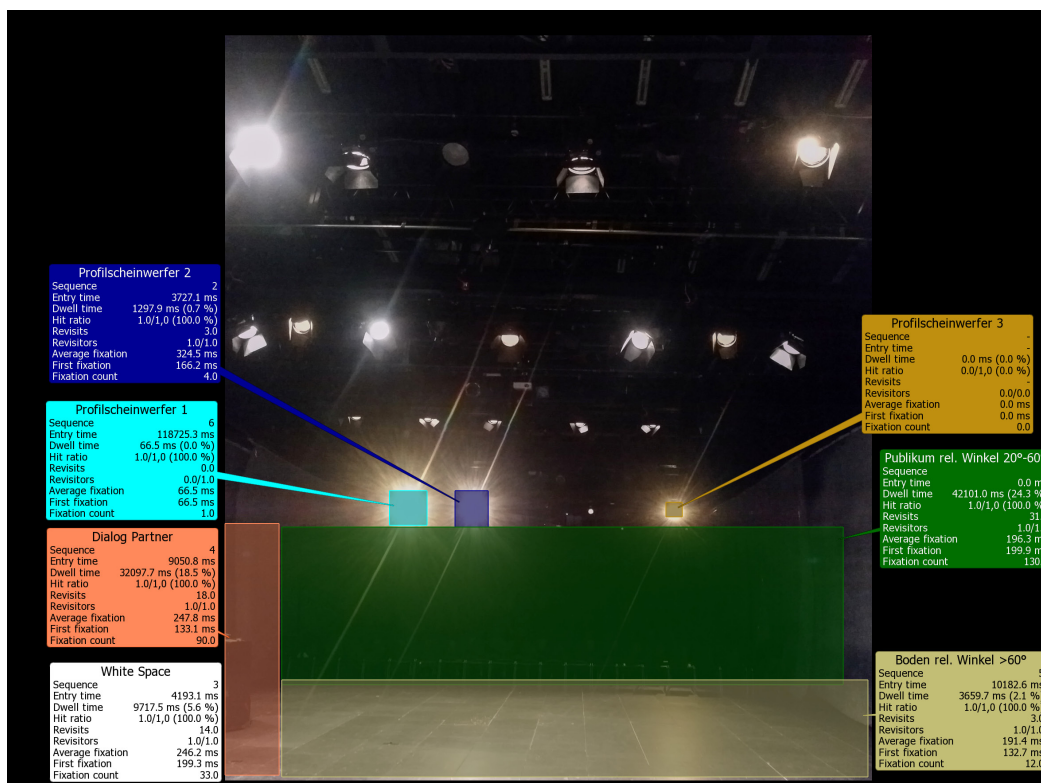


Abb. 57 Key Performance Indicators Dialog

Auch in der Messung des Dialoges wird der Profilscheinwerfer 1 einmal für 66,5 ms fixiert. Der Profilscheinwerfer 2 wird bei dieser Messung viermal fixiert für eine Gesamtdauer von 1,28 s und einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 324 ms. Ähnlich dem Monolog wird auch der Publikumsbereich zu 24% für 42 s fixiert. Hinzu kommt bei diesem Versuch der Dialogpartner, der zu 18,5% für 32 s fixiert wird. Auch diese Blickrichtung ist für die Untersuchung nicht weiter relevant, da hier keine Scheinwerfer im direkten Blickfeld der Schauspieler bzw. nur unter sehr großem rel. Winkel liegen.

Die Auswertung der 16 Stufenlinsenscheinwerfer hat ergeben, dass während des Monloges keiner der Scheinwerfer fixiert wurde. Während des Dialoges wurde lediglich einer der Scheinwerfer für 232 ms fixiert (vgl. Anhang Abb. 73 und 74).

5.3.3 Fazit

Während der beiden Messungen im Thalia Theater Gaußstraße wurde der Schauspieler von den drei hellen Profilscheinwerfern geblendet, da diese einen geringen Neigungswinkel haben. Entgegen der Erwartung wurden diese jedoch im Vergleich zu den vorherigen Versuchen relativ oft fixiert (insgesamt 10 mal). Gemittelt über 8 min betrifft dies eine Expositionsdauer von 2,2 s. Hochgerechnet über eine 1,5 Std. Vorstellung würde sich in diesem Falle eine Expositionszeit von 24,7 s ergeben. Die Stufenlinsenscheinwerfer mit höherem Neigungswinkel und geringerer Blendwirkung wurden hingegen nur insgesamt einmal fixiert. Je nachdem welcher Bereich im Publikum fixiert wird, kann zusätzlich bis zu 94% der direkten Bestrahlungsstärke E_0 der Profilscheinwerfer auf der Netzhaut der Schauspieler ankommen. Dieser Bereich betrifft allerdings einen so großen Winkel, dass der Blick bei einer durchschnittlichen Fixationsdauer von ca. 200 ms ständig wechselt und somit selten der gleiche Bereich auf der Netzhaut bestrahlt wird. Die Abbildung der Lichtquelle auf der Netzhaut „verschmiert“ (vgl. Abb. 19).

Die Beleuchtungssituation betrifft hier einen „worst-case“-Fall, da alle Scheinwerfer für die Messungen eingeschaltet wurden. Im Normalfall wären die drei Profilscheinwerfer für dieses Stück nicht in Betrieb, sondern lediglich die Stufenlinsenscheinwerfer. In Stücken, in denen auch diese Scheinwerfer verwendet werden, ist davon auszugehen, dass diese nicht alle gleichzeitig eingeschaltet sind und nicht dauerhaft über das ganze Stück in Betrieb sind. Die Schauspieler wären dem hellen Scheinwerferlicht der Profilscheinwerfer also nur über einen kurzen Zeitraum ausgesetzt. Alle anderen Scheinwerfer haben einen recht steilen Neigungswinkel, da sie hoch positioniert sind. Dadurch liegen sie weniger im Blickfeld der Schauspieler und eine Fixation dieser Scheinwerfer kommt somit eher selten vor.

Auch hier ist der entlastendste Aspekt der Gefährdungsbeurteilung die Tatsache, dass alle Scheinwerfer des Theaters in diesem Fall Halogen-Leuchtmittel besitzen. Gemäß dem Report Nr. 53 der AUVA ist davon auszugehen, dass auch von Halogen-Profilscheinwerfern im gegebenen Abstand keine Gefährdung ausgeht und der Grenzwert für Blaulichtgefährdung nicht überschritten wird. Dem Beleuchtungsplan (s. Anhang, S.68 ff.) ist zu entnehmen, dass das Theater zusätzlich über zwei 2,5 kW HMI Fresnelscheinwerfer verfügt, die allerdings am äußersten Rand des Theaters angebracht sind und so vermutlich nicht im Sichtfeld der beleuchteten Personen liegen.

6. Zusammenfassende Betrachtung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es herauszufinden, inwieweit die Vorschriften und Expositionsgrenzwerte für Blaulichtgefährdung in TV-Studios und Theatern erreicht werden, um so die Relevanz von Blaulichtgefährdung zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden Eye-Tracking-Messungen im NDR Hamburg Journal Studio und im Thalia Theater Gaußstraße durchgeführt. Dabei hat sich ergeben, dass die Versuchspersonen in den meisten Fällen den direkten Blick in die Scheinwerfer meiden und diese nicht bzw. nur im Milisekundenbereich fixieren. Naturgemäß können durch die Messergebnisse nur Tendenzen aufgezeigt werden, da jede Person ein anderes Blickverhalten hat und zusätzlich Messungenauigkeiten durch das Eye-Tracking-System auftreten können. In den beiden untersuchten Bereichen wurden zudem ausschließlich Halogenscheinwerfer verwendet, die ein warmweißes Emissionsspektrum besitzen (vgl. Abb. 5). Die Intensität des Blaulichtanteils ist daher sehr gering, weshalb eine Grenzwertüberschreitung von Blaulichtgefährdung in diesen Fällen sehr unwahrscheinlich ist.

In den meisten TV-Studios werden überwiegend Halogen-Stufenlinsenscheinwerfer zur Ausleuchtung des Studios und vor allem für die Personenausleuchtung verwendet. So besitzt auch das Hamburg Journal Studio des NDR ausschließlich Halogenscheinwerfer. Andere Studios, die für den Entertainment-Bereich ausgelegt sind, wie z.B. das der Satiresendung „extra3“, besitzen zudem weitere Scheinwerfertypen wie bspw. Profilscheinwerfer und Moving Lights mit HMI Leuchtmittel oder LED Washlights. Diese Scheinwerfertypen werden allerdings nicht zur Personenausleuchtung, sondern vorwiegend für Effektlicht oder zur Ausleuchtung bestimmter Bereiche des Studios verwendet. Daher liegen diese Scheinwerfer nicht oder nur selten im Blickfeld der beleuchteten Person. Eine Gefährdung kann also auch hier ausgeschlossen werden.

Das ARD Tagesschaustudio unterscheidet sich in der Beleuchtung von den anderen Studios. Hier werden ausschließlich ARRI L7-C LED-Stufenlinsenscheinwerfer zur Ausleuchtung verwendet (vgl. Anhang Abb. 75). Mit den LED-Scheinwerfern wird eine kühlere Lichtfarbe von etwa 6000 K mit deutlich höherem Blaulichtanteil erzielt.⁴⁵ Auch hier werden die Nachrichtensprecher unter flachem Neigungswinkel beleuchtet. Aus den Messungen im Hamburg Journal Studio kann übernommen werden, dass die Sprecher nicht oder nur selten direkt in die Scheinwerfer schauen. Allerdings kann durch die flache Beleuchtung bis zu 90% der Bestrahlungsstärke auf die Netzhaut gelangen. Da die Nachrichtensprecher fast ausschließlich den Teleprompter der Kamera fixieren, ist deren Blickwinkel relativ klein, sodass nur ein kleines Areal der Netzhaut vom Scheinwerfer

45 http://www.film-tv-video.de/newsdetail+M5a6f57a63f3.html?&no_cache=1

bestrahlt wird. Aus diesem Grund sollte dieser Scheinwerfer bzgl. der Bestrahlungsstärke und max. Expositionszeit für Blaulichtgefährdung durchgemessen werden, um eine Grenzwertüberschreitung und Gefährdung auszuschließen.

Theater können eine Vielzahl von Scheinwerfertypen verwenden. So können zur flächigen Beleuchtung oft Stufenlinsenscheinwerfer oder PAR-Scheinwerfer eingesetzt werden, zur klaren abgegrenzten Personenausleuchtung ohne Streulicht Profil- bzw. Verfolgerscheinwerfer. Als Leuchtmittel werden hier je nach gewünschter Lichtfarbe Halogen- oder HMI-Lichtquellen eingesetzt. Im untersuchten Thalia Theater Gaußstraße wurden lediglich Halogenscheinwerfer verwendet, wodurch eine Gefährdung durch Blaulicht weitgehend ausgeschlossen werden kann. In größeren Theatern werden allerdings auch HMI-Scheinwerfer eingesetzt, die den Grenzwert für Blaulichtgefährdung bereits nach wenigen Sekunden erreichen können (vgl. 3.3.3 Messergebnisse verschiedener Scheinwerfer). In den Eye-Tracking Messungen im Theater hat sich ergeben, dass der Schauspieler im Gegensatz zu den Messungen im TV-Studio diverse Male für kurze Zeit in die Profilscheinwerfer schaut. Trotz der hellen Blendwirkung wurden diese Scheinwerfer hier fixiert. Anders als bei einer Nachrichtensendung im TV-Studio hat die beleuchtete Person keinen klaren Blickpunkt, der fixiert wird. So kann es beim Blick ins Publikum auch zu Fixationen von Scheinwerfern kommen. Der Großteil der verwendeten Scheinwerfer sind in großer Höhe mit steilem Neigungswinkel angebracht, wodurch ein Blick in diese Scheinwerfer eher unwahrscheinlich ist. Profil- bzw. Verfolgerscheinwerfer können hingegen einen recht flachen Winkel in niedrigerer Position haben und somit im Blickfeld der Schauspieler liegen. Werden hierfür HMI-Leuchtmittel eingesetzt, kann eine Grenzwertüberschreitung für Blaulichtgefährdung nicht ausgeschlossen werden. Der Grenzwert ist dabei jedoch von weiteren Parametern abhängig (vgl. 3.3.4 Parameter der Blaulichtgefährdung). Zu beachten ist an dieser Stelle vor allem, dass nicht nur die Bestrahlungsstärke des direkten Blickes in den Scheinwerfer zu werten ist, sondern auch die Bestrahlung der Netzhaut unter einem bestimmten Winkel. Bei Blicken in die Nähe des Scheinwerfers kann bis zu 94% der direkten Bestrahlungsstärke auf die Netzhaut gelangen. Durch diese Bestrahlung würde tendenziell nicht der zentrale Bereich der Netzhaut, der für das scharfe Sehen verantwortlich ist, geschädigt werden, sondern das untere Areal des peripheren Sehens.

Insgesamt ist es also sinnvoll, gerade im Theater- und Bühnenbereich jeden HMI-Scheinwerfer, der zur Beleuchtung von Personen genutzt wird und in deren Blickfeld liegt, zu evaluieren und gegebenenfalls bzgl. der Bestrahlungsstärke und max. Expositionszeit für Blaulichtgefährdung durchzumessen. Gleiches gilt für LED-Scheinwerfer mit blauer oder kaltweißer Lichtfarbe. Allerdings werden LED-Scheinwerfer bisher noch überwiegend im Veranstaltungsbereich eingesetzt und weniger in TV-Studios und Theatern. Für Beleuchter sollten die Messergebnisse der potenziell gefährdenden Scheinwerfer anschaulich und verständlich aufgeführt werden. Hierbei bietet

sich an, für jeden der Scheinwerfer die max. Expositionszeit in Abhängigkeit des Abstandes und Öffnungswinkels des Scheinwerfers sowie die Beleuchtungsstärke in einem Diagramm darzustellen (gemäß Abb. 17). Werden Grenzwerte in gegebenen Beleuchtungssituationen überschritten, sollten je nach Möglichkeit Schutzmaßnahmen ergriffen werden, wie z.B. Leistungsverringerung des Scheinwerfers, Erhöhung des Öffnungswinkels, steilere Beleuchtungswinkel oder Farbfilter. Zusätzlich ist es sinnvoll, Schauspieler und Moderatoren/Nachrichtensprecher dahingehend zu instruieren, nicht direkt in Scheinwerfer oder deren unmittelbares Umfeld zu blicken.

Anhang



Abb. 58 Vorversuch - Scan Path Schauspielerin Monolog

Abb. 59 Vorversuch - Scan Path Schauspielerin Dialog

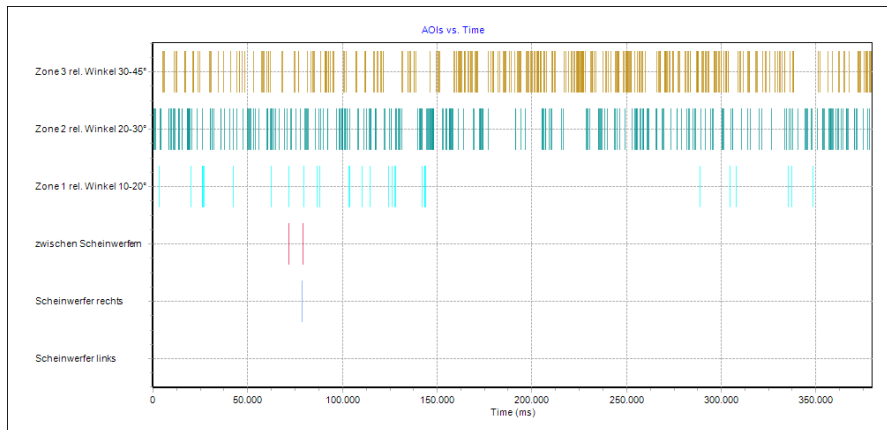


Abb. 60 Vorversuch - Sequence Chart Schauspielerin Monolog

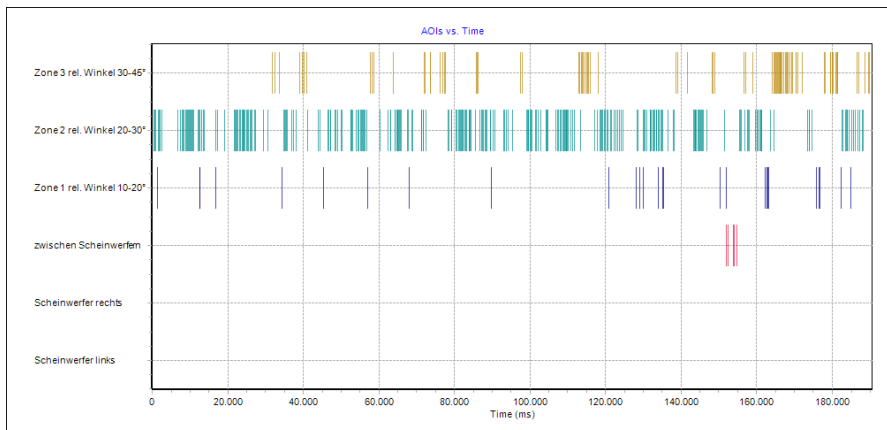


Abb. 61 Vorversuch - Sequence Chart Schauspielerin Dialog

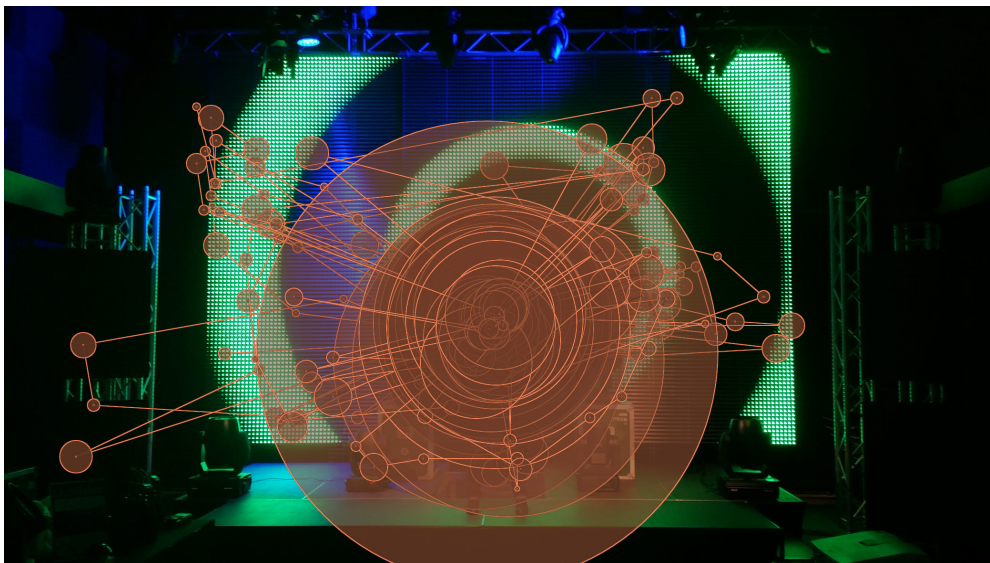


Abb. 62 Vorversuch - Scan Path Zuschauer vor LED-Wand

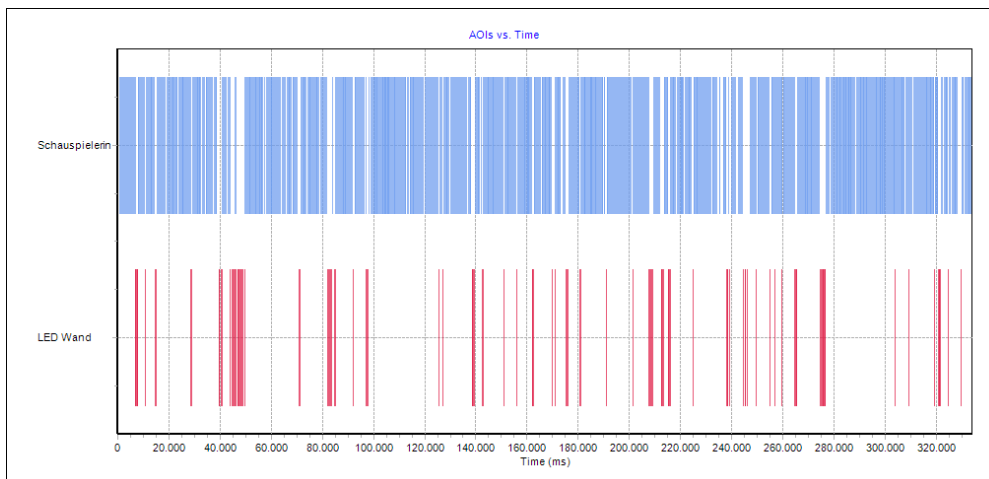


Abb. 63 Vorversuch - Sequence Chart Zuschauer vor LED-Wand

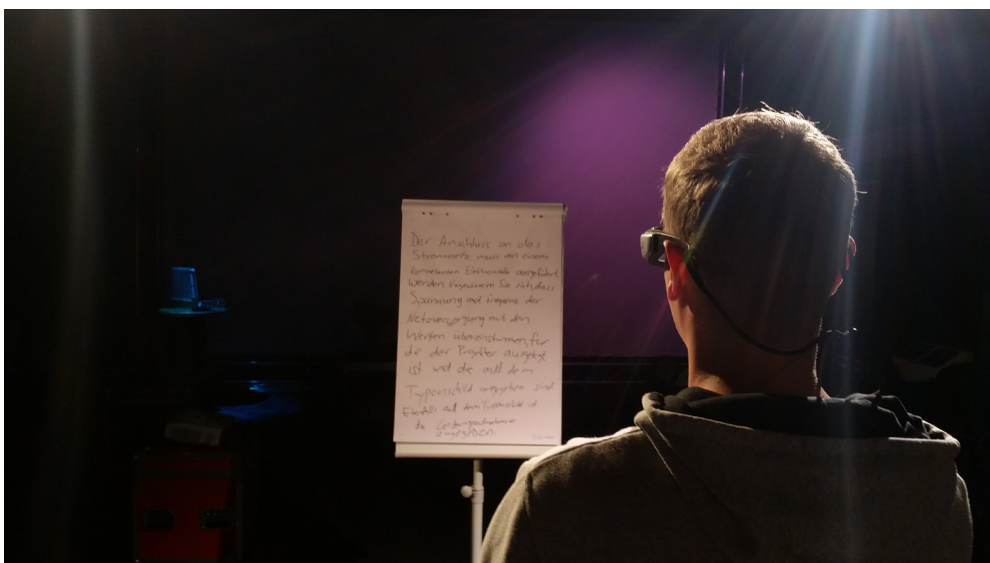


Abb. 64 Vorversuch - Moderator mit Teleprompter

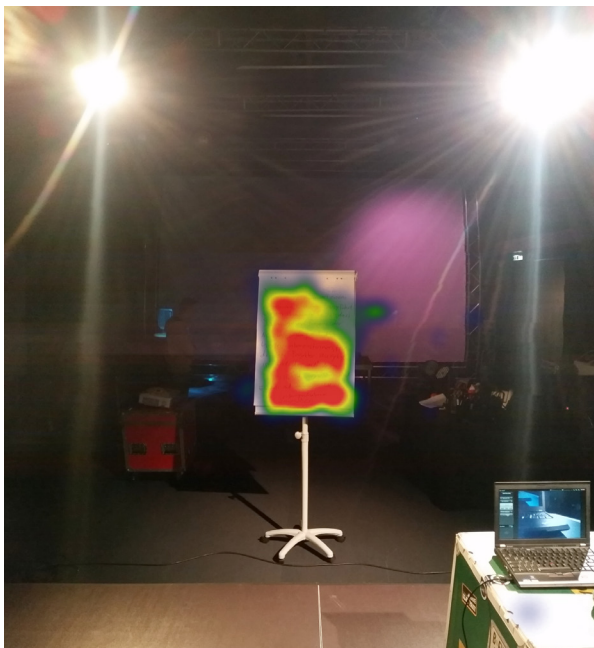


Abb. 65 Vorversuch - Heat Map Moderator

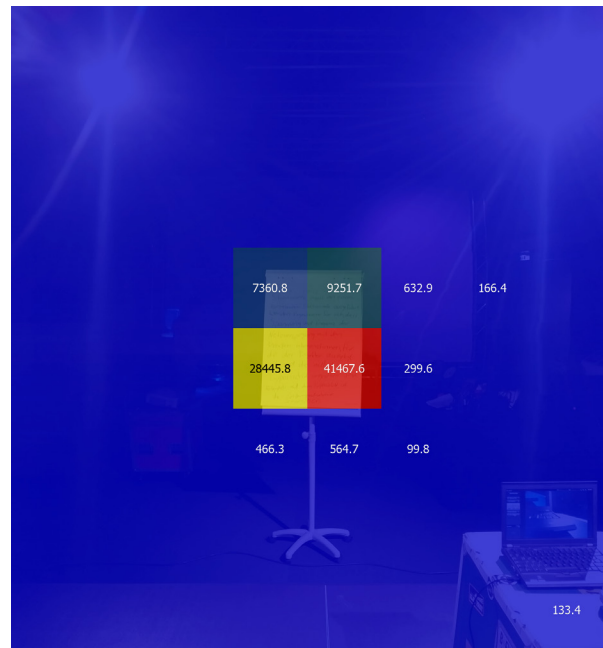


Abb. 66 Vorversuch - Gridded AOIs Moderator



Abb. 67 Hamburg Journal Studio



Abb. 68 Messung Hamburg Journal mit Kristina Gruse

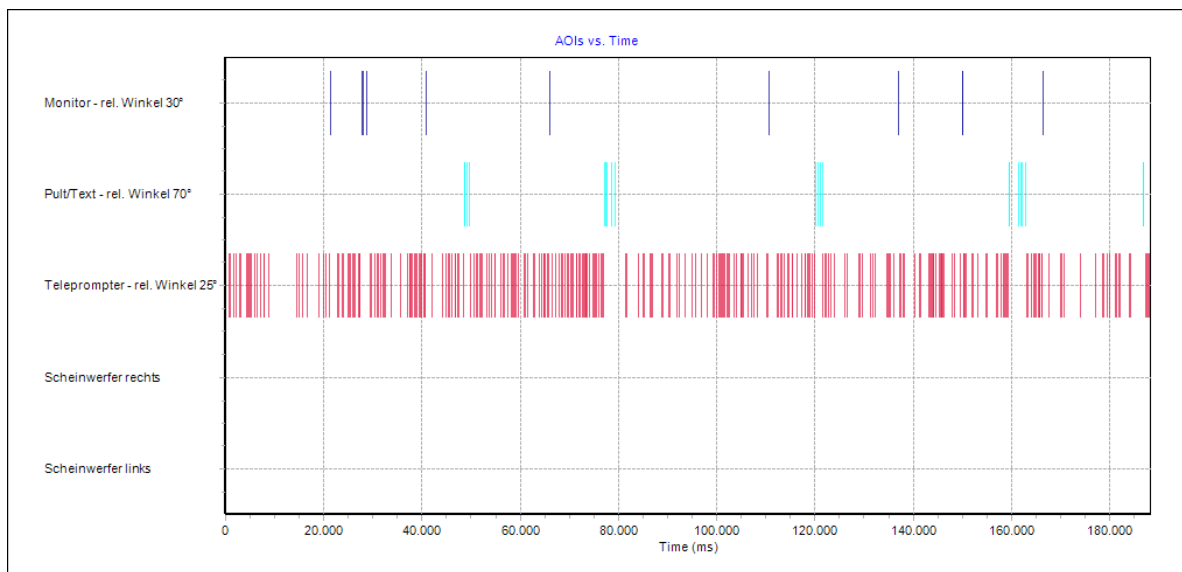
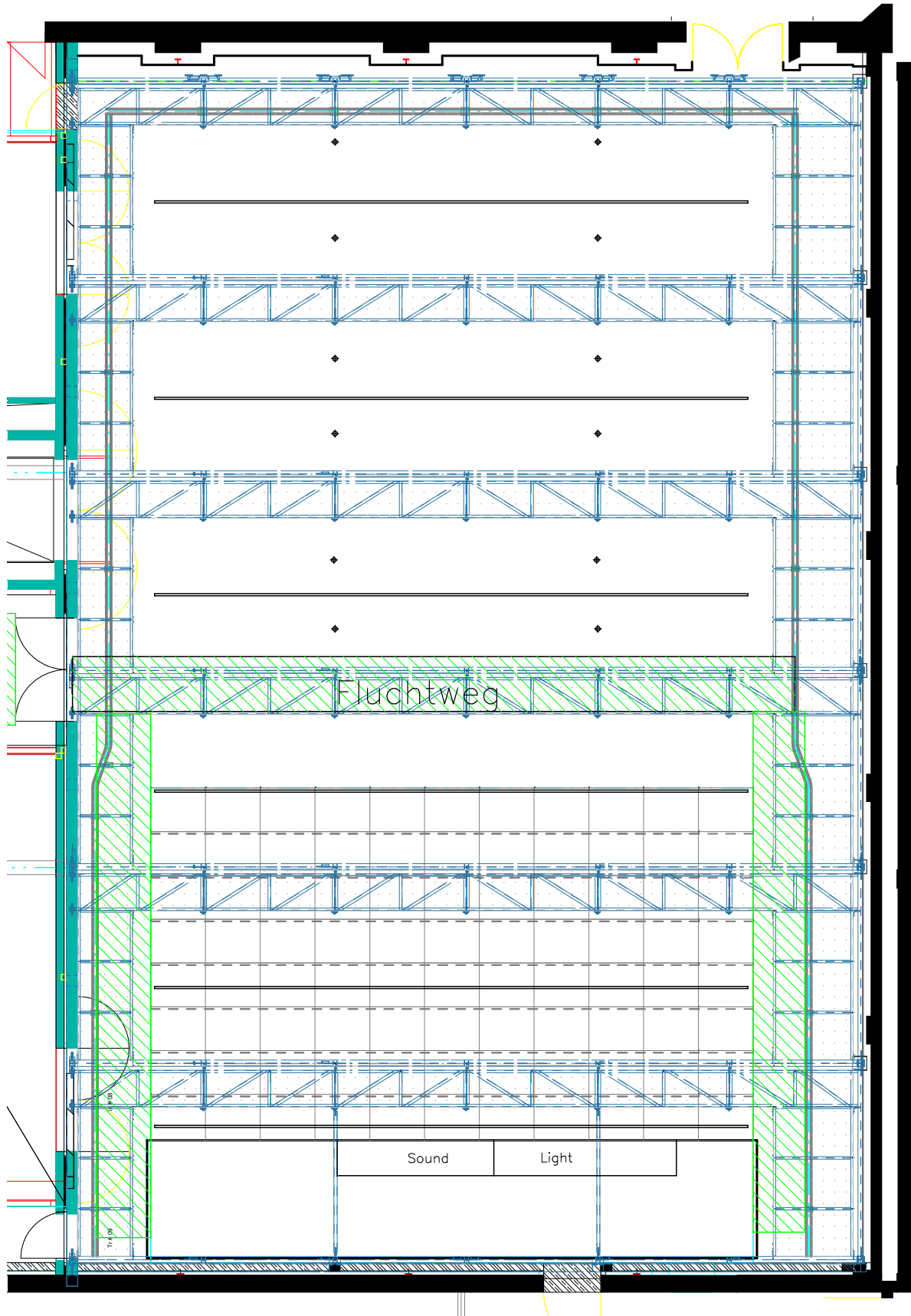
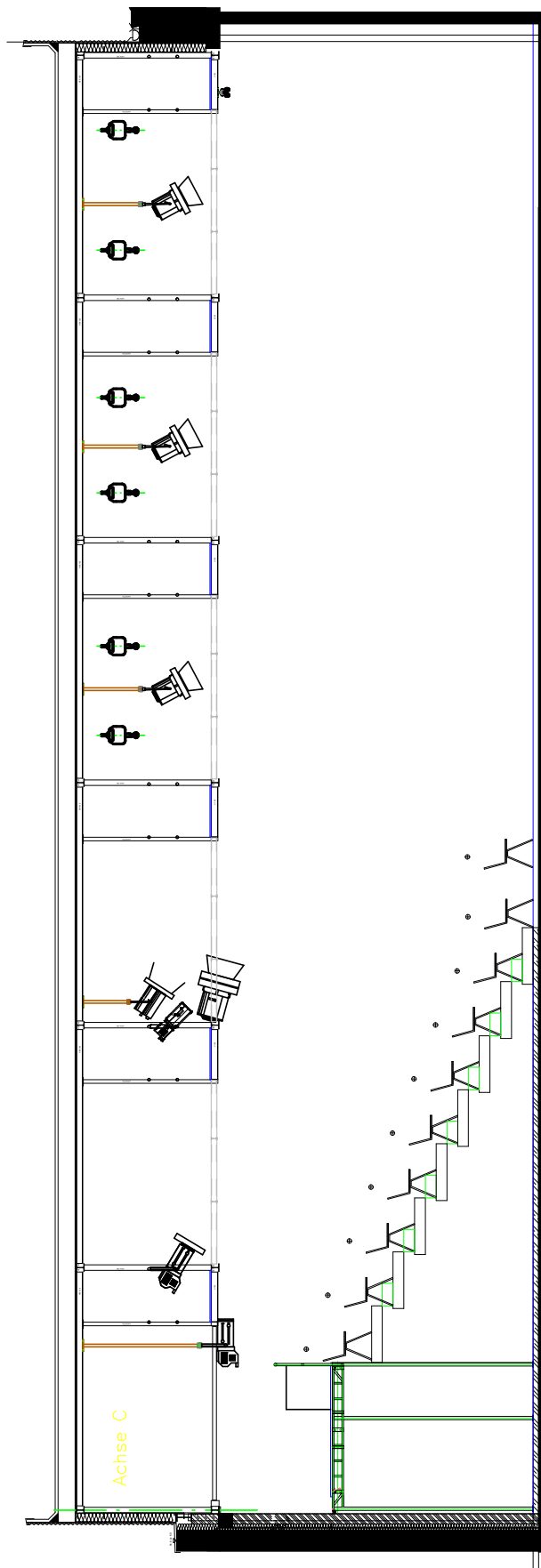


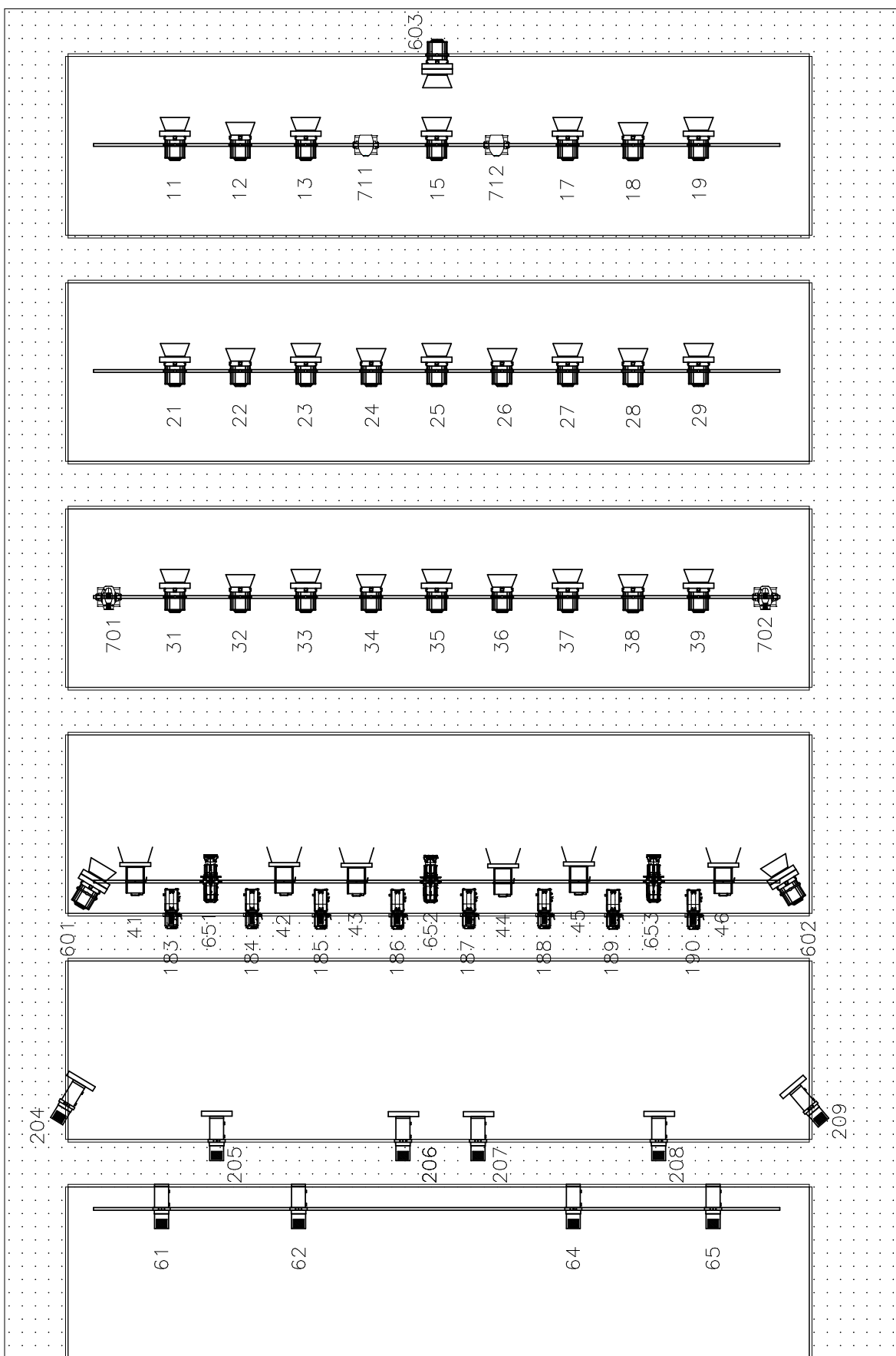
Abb. 69 Hamburg Journal - Sequence Chart

Beleuchtungsplan Thalia Theater Gaußstraße Studiobühne





THALIA THEATER HAMBURG
Thalia in der Gaußstrasse
Studiobühne
M 1:100
Stand v. 20.09.14



Rainbow Pro Colour Changer 12 "

- Pos. 1 LEE HT 363
- Pos. 2 LEE 136
- Pos. 3 LEE 165
- Pos. 4 LEE 200
- Pos. 5 LEE 203
- Pos. 6 LEE 202
- Pos. 7 LEE 201
- Pos. 8 LEE 130 clear
- Pos. 9 LEE 152
- Pos. 10 LEE 103
- Pos. 11 LEE 205
- Pos. 12 LEE 204
- Pos. 13 LEE 105
- Pos. 14 LEE 106
- Pos. 15 LEE 213
- Pos. 16 LEE 115

Rainbow Pro Colour Changer 15 "

- Pos. 1 LEE 130 clear
- Pos. 2 LEE 156
- Pos. 3 LEE 213
- Pos. 4 LEE 139
- Pos. 5 LEE 115
- Pos. 6 LEE HT 363
- Pos. 7 LEE 197
- Pos. 8 LEE 200
- Pos. 9 LEE 165
- Pos. 10 LEE 174
- Pos. 11 LEE 180
- Pos. 12 LEE 130 clear
- Pos. 13 LEE 103
- Pos. 14 LEE 205
- Pos. 15 LEE 100
- Pos. 16 LEE 101
- Pos. 17 LEE 105
- Pos. 18 LEE 022
- Pos. 19 LEE 164
- Pos. 20 LEE 106
- Pos. 21 LEE 128
- Pos. 22 LEE 136
- Pos. 23 LEE 126
- Pos. 24 LEE 130 clear

Robert Juliat SX 614 1 kW 15–38°

Niethammer HPZ 2 kW 15–40°

Niethammer HPZ 2 kW 15–40°
+ 12" Rainbow Colour Changer

Strand Studio 2 kW Fresnel pole-operated

Strand Studio 2 kW Fresnel pole-operated
+ 12" Rainbow Colour Changer

Strand HMI 2,5 kW Fresnel
+ DMX Jalousie
+ 15" Rainbow Colour Changer

Martin MAC 500

Martin MAC 600

ADB C201 2kW PC 5°–65°
+ 12" Rainbow Pro Colour Changer

ETC SourceFour 36° LED Lustr2+

Equipment:

ETC Ion mit 1024 channels, Remote Control, Faderwing

174 Dimmer á 2,3 kW

6 Dimmer á 5 kW

28 NonDim á 10 A

nicht beweglicher Festverhang:

- 36 Strand Studio 2 kW Fresnel
- davon 24 mit 12" Rainbow Pro Colour Changer
- 10 Niethammer HPZ 2 kW Profile 15–40°
- davon 5 mit 12" Rainbow Pro Colour Changer
- 8 Robert Juliat SX 614 1 kW Profile 15–38°
- 2 Strand HMI 2,5 kW Fresnel + DMX Jalousie + 15" Rainbow Pro Colour Changer

zusätzlich Verfügbar:

- 18 ETC SourceFour Zoom 750W Profile 15–30°
- 5 ETC SourceFour fixed 750W Profile 36°
- 5 ETC SourceFour fixed 750W Profile 50°
- 30 PAR 64 (CP60, CP61, CP62, CP95)
- 1 Robert Juliat Cricket Follow 10°–22° Halogen
- 4 Strand Alto 2kW Fresnel
- 4 Strand Alto/Cadenza 2kW PC
- 6 Strand Studio 2kW Fresnel



Abb. 70 Messung Thalia Gaußstraße

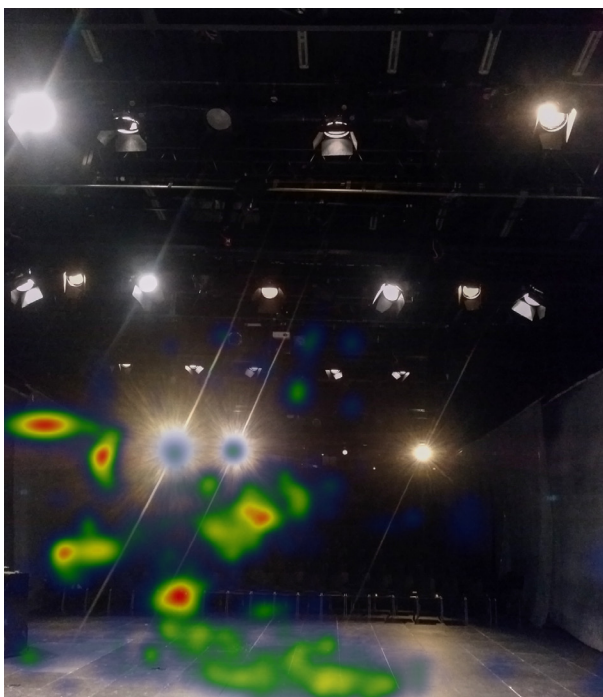


Abb. 71 Thalia Monolog - Heat Map

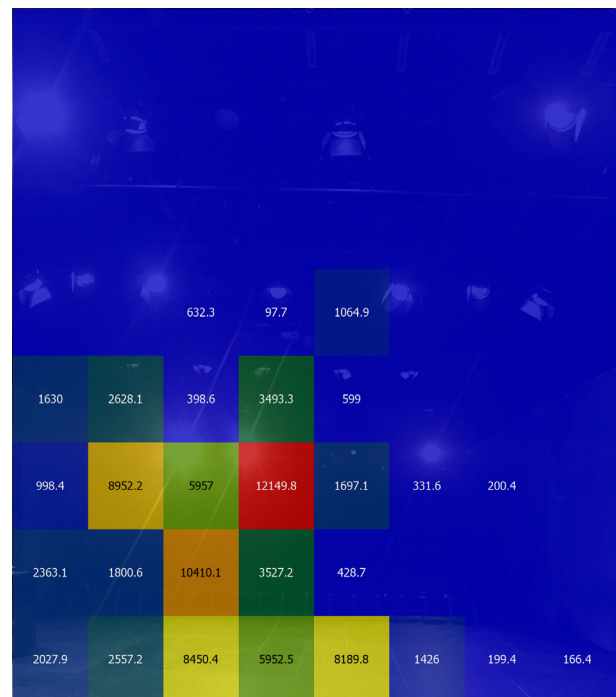


Abb. 72 Thalia Monolog - Gridded AOIs

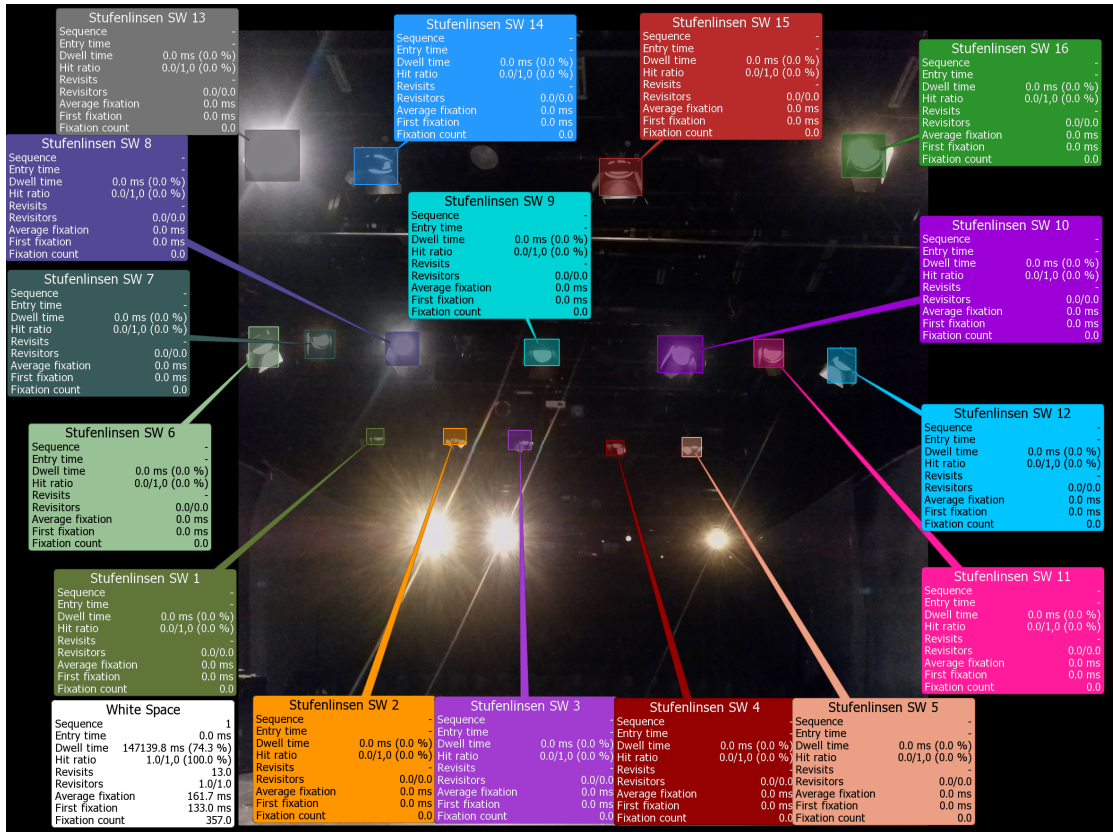


Abb. 73 Thalia Monolog - Key Performance Indicators

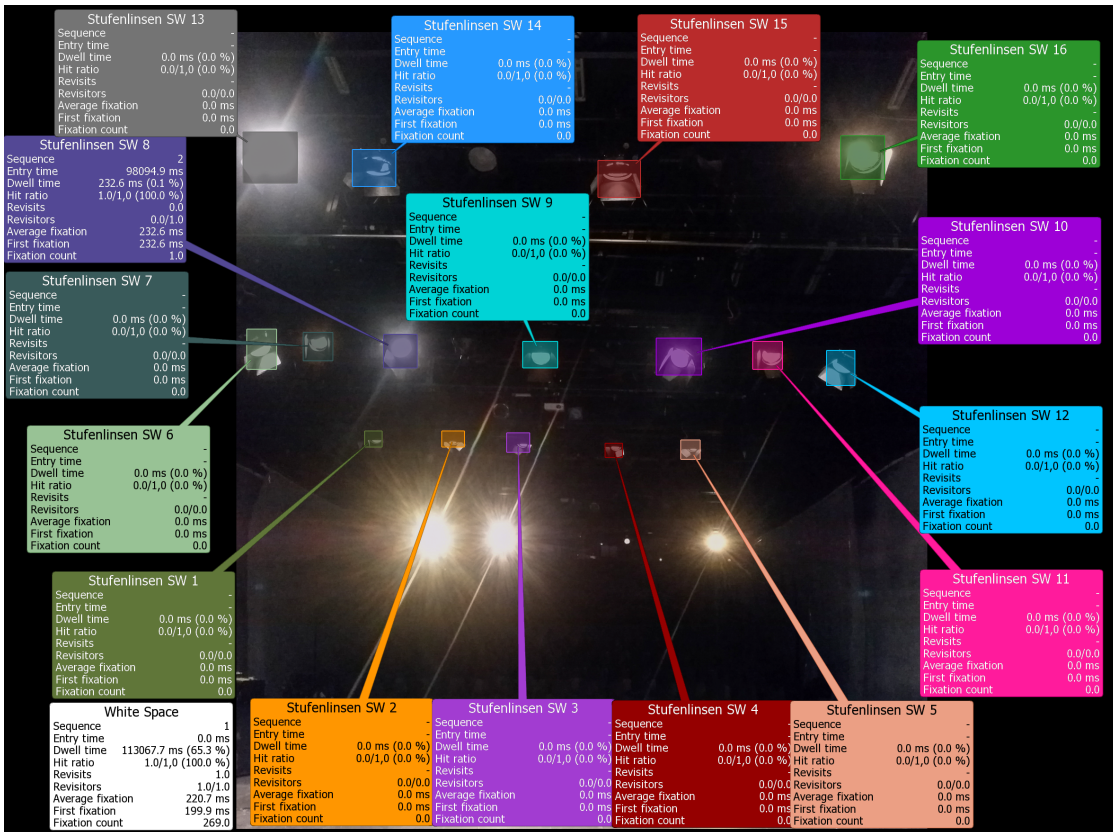


Abb. 74 Thalia Dialog - Key Performance Indicators



Abb. 75 ARD Tagesschau Studio

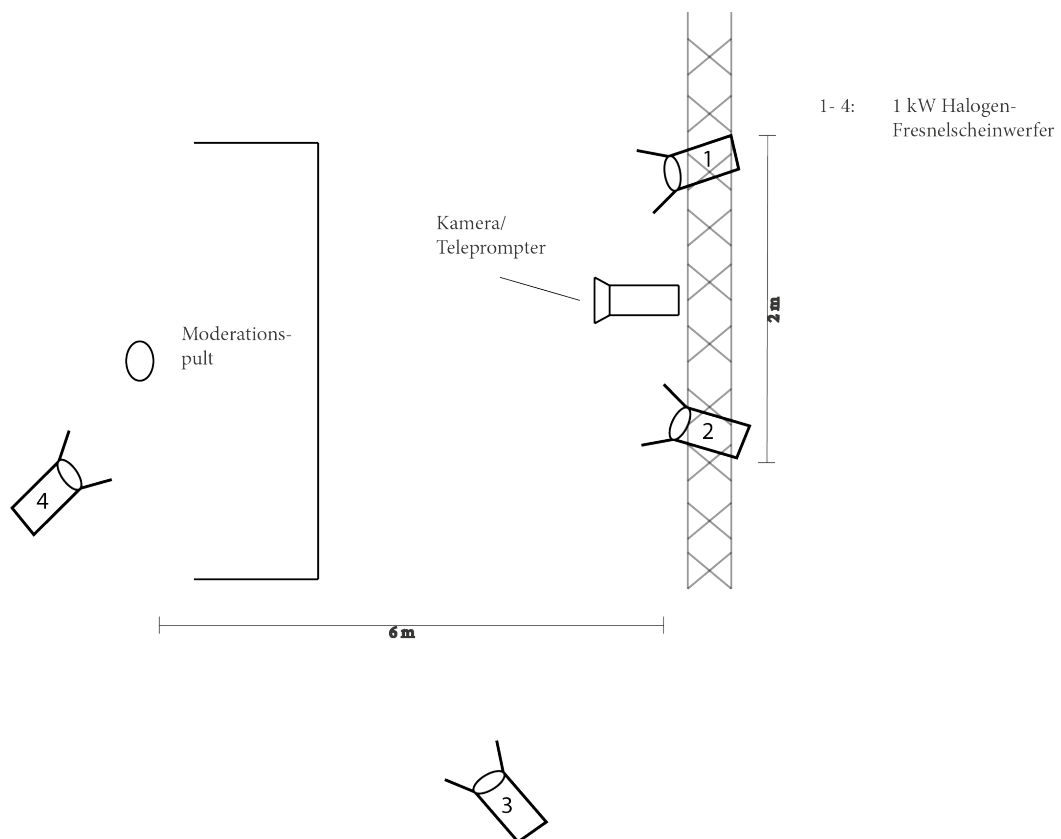


Abb. 76 Vereinfachter Beleuchtungsplan Hamburg Journal

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 **Elektromagnetisches Spektrum**
Quelle: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/20/EM-Spektrum.svg/2000px-EM-Spektrum.svg.png>
- Abb. 2 **Das menschliche Auge**
Quelle: Biopsychologie, John P.J. Pinel, Pearson Higher Education, 2012
- Abb. 3 **Relative spektrale Empfindlichkeit**
Quelle: Biopsychologie, John P.J. Pinel, Pearson Higher Education, 2012
- Abb. 4 **Spektrum Glühlampe**
Quelle: <http://feldfrei.de/202-535-thickbox/led-leuchtmittel-pure-z.jpg>
- Abb. 5 **Spektrum Halogenlampe**
Quelle: http://illumina-schweiz.ch/wp-content/uploads/2015/04/Halogen_AR111_3000K_spd.png
- Abb. 6 **Spektrum Leuchtstofflampe**
Quelle: http://www.eickhorst.com/typo3temp/GB/_2015_eickhorst.com__2015_eickhorst.com_csm_normaltageslicht-spektrum_de_1c08f7fcf3_628377ed6e.jpg
- Abb. 7 **Spektrum HMI Lampe**
Quelle: http://www.osram.at/media/resource/lightboxlarge1/384073/hqi_ts_d_s_cable.jpg
- Abb. 8 **Spektrum kaltweiße LED bei 6500 K**
Quelle: http://dennerle.com/sites/default/files/uploads/public/products/6032_ps_scapers_led_spektrum.png
- Abb. 9 **PC-Scheinwerfer**
Quelle: http://www.lucifer-gmbh.de/shop/346-thickbox_default/rama-hp-pc-scheinwerfer-1000-1200w.jpg
- Abb. 10 **Stufenlinsenscheinwerfer**
Quelle: http://www.fournell.de/media/products/83_1349865979.jpg
- Abb. 11 **Profilscheinwerfer ETC Source Four**
Quelle: <http://www.camwerkz.com/wp-content/uploads/2011/12/source-four-light.jpg>
- Abb. 12 **PAR 64-Scheinwerfer**
Quelle: http://www.cubus-event.de/uploads/tx_hrrrentals/Par_64_Spot.jpg
- Abb. 13 **Flächenleuchte**
Quelle: http://pam.pamevents.de/files/imagecache/product_full/shopbilder/fl%C3%A4chenleuchte_800.jpg

- Abb. 14 **Moving Light MAC 2000**
Quelle: <http://www.martin.com/Files/images/Products/mac2000beamxb.jpg>
- Abb. 15 **Wash Light LED**
Quelle: http://www.elationlighting.com/images/elation_design_wash_led_zoom.jpg
- Abb. 16 **Moving Light - Scanner**
Quelle: http://img.frbiz.com/nimg/02/67/033efc9d59b135654da642b9c1f3-0x0-0/300w_strong_style_color_b82220_scanner_strong_light_ys_300.jpg
- Abb. 17 **Diagramm fotobiologische Gefährdung für kleine Lichtquellen**
Quelle: HAW Hamburg, modifiziert nach PLASA
- Abb. 18 **relativer Winkel zwischen Strahlrichtung und Blickrichtung**
Quelle: Grafik Autor
- Abb. 19 **Abbildung auf der Netzhaut verschmiert**
Quelle: Report Nr. 53 Optische Strahlung, AUVA 2015
- Abb. 20 **SMI Eye-Tracking Brille**
Quelle: https://c1.staticflickr.com/7/6006/6191785199_02fdeb3d7b_b.jpg
- Abb. 21 **SMI - Remote Eye-Tracker**
Quelle: <http://www.medgadget.com/img/gqedd.jpg>
- Abb. 22 **Scan Path**
Quelle: https://psycho.unibas.ch/fileadmin/psycho/redaktion/files/nlab/SMI_BeGaze_Manual.pdf
- Abb. 23 **Focus Map**
Quelle: https://psycho.unibas.ch/fileadmin/psycho/redaktion/files/nlab/SMI_BeGaze_Manual.pdf
- Abb. 24 **Heat Map**
Quelle: https://psycho.unibas.ch/fileadmin/psycho/redaktion/files/nlab/SMI_BeGaze_Manual.pdf
- Abb. 25 **AOI / Key Performance Indicators**
Quelle: https://psycho.unibas.ch/fileadmin/psycho/redaktion/files/nlab/SMI_BeGaze_Manual.pdf
- Abb. 26 **Sequence Chart**
Quelle: https://psycho.unibas.ch/fileadmin/psycho/redaktion/files/nlab/SMI_BeGaze_Manual.pdf
- Abb. 27 **Gridded Areas of Interest**
Quelle: https://psycho.unibas.ch/fileadmin/psycho/redaktion/files/nlab/SMI_BeGaze_Manual.pdf
- Abb. 28 **Lichtlabor - Vorderlicht**
Quelle: Foto Autor
- Abb. 29 **Lichtlabor - Gegenlicht + LED-Wand**
Quelle: Foto Autor

Abb. 30 Vorversuche: Beleuchtungsplan Lichtlabor

Quelle: Grafik Autor

Abb. 31 Vorversuch Theater Monolog/Dialog

Quelle: Foto Autor

Abb. 32 Referenzbild Schauspielerin

Quelle: Foto Autor

Abb. 33 Heat Map Monolog

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 34 Heat Map Dialog

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 35 Key Performance Indicators Monolog

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 36 Key Performance Indicators Dialog

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 37 Vorversuch Zuschauer mit LED-Wand

Quelle: Foto Autor

Abb. 38 Referenzbild Zuschauer

Quelle: Foto Autor

Abb. 39 Focus Map Zuschauer

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 40 Key Performance Indicators Zuschauer

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 41 Heat Map Zuschauer

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 42 Vorversuch Moderator mit Teleprompter

Quelle: Foto Autor

Abb. 43 Focus Map Moderator

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

Abb. 44 Scan Path Moderator

Quelle: Grafik aus Software BeGaze

- Abb. 45 Key Performance Indicators Moderator
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 46 Messung im Hamburg Journal Studio mit Kristina Gruse
Quelle: Foto Autor
- Abb. 47 Referenzbild Hamburg Journal
Quelle: Foto Autor
- Abb. 48 Scan Path Hamburg Journal
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 49 Heat Map Hamburg Journal
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 50 Key Performance Indicators - Hamburg Journal
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 51 Messung Thalia Theater
Quelle: Foto Autor
- Abb. 52 Referenzbild - Thalia Gaußstraße
Quelle: Foto Autor
- Abb. 53 Scan Path Monolog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 54 Scan Path Dialog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 55 Heat Map Dialog Thalia Theater
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 56 Key Performance Indicators Monolog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 57 Key Performance Indicators Dialog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 58 Vorversuch - Scan Path Schauspielerin Monolog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 59 Vorversuch - Sequence Chart Schauspielerin Monolog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 60 Vorversuch - Sequence Chart Schauspielerin Dialog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze

- Abb. 61 Vorversuch - Scan Path Schauspielerin Dialog
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 62 Vorversuch - Scan Path Zuschauer vor LED-Wand
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 63 Vorversuch - Sequence Chart Zuschauer vor LED-Wand
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 64 Vorversuch - Moderator mit Teleprompter
Quelle: Foto Autor
- Abb. 65 Vorversuch - Heat Map Moderator
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 66 Vorversuch - Gridded AOIs Moderator
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 67 Hamburg Journal Studio
Quelle: Foto Autor
- Abb. 68 Messung Hamburg Journal mit Kristina Gruse
Quelle: Foto Autor
- Abb. 69 Hamburg Journal - Sequence Chart
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 70 Messung Thalia Gaußstraße
Quelle: Foto Autor
- Abb. 71 Thalia Monolog - Heat Map
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 72 Thalia Monolog - Gridded AOIs
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 73 Thalia Monolog - Key Performance Indicators
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 74 Thalia Dialog - Key Performance Indicators
Quelle: Grafik aus Software BeGaze
- Abb. 75 ARD Tagesschau Studio
Quelle: <https://www.tagesschau.de/inland/panorama-111.html>
- Abb. 76 Vereinfachter Beleuchtungsplan Hamburg Journal
Quelle: Grafik Autor

Literaturverzeichnis

Fachbücher

Ackermann, N.; Lichttechnik: Systeme der Bühnen- und Studiobeleuchtung, Oldenbourg 2006

Baker, J.; 50 Schlüsselideen Quantenphysik, Springer 2015

DIN 5030-2; Spektrale Strahlungsmessung; Strahler für spektrale Strahlungsmessungen, 1982-09

DIN 62471; Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen, Beuth Verlag, 2009

EU-Richtlinie 2006/25/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung), 5. April 2006

Galley, N.; Physiologische Grundlagen, Meßmethoden und Indikatorfunktionen der okulomotorischen Aktivität, 2001

Greule, R.; Licht und Beleuchtung im Medienbereich, Hanser Verlag, 2015

Löffel, M.; Zeitungswbsites - Der Einfluss von Usability und Design auf den Werbeerfolg, Springer 2014

Lübbe, E.; Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung, Springer 2013

Müller, Jens; Handbuch der Lichttechnik: Das Kompendium für den Praktiker, PPV-Medien, 4. Auflage, 2008

Pinel, John P.J.; Biopsychologie, Pearson Higher Education, 2012

Ris, H.R.; Beleuchtungstechnik für Praktiker, VDE 2013

Unsöld, A.; Physik der Sternatmosphären: Mit besonderer Berücksichtigung der Sonne, Springer 2013

Fachzeitschriften / Online-Reader

Guidance for the risk assessment of exposure to entertainment lighting (non laser) required by the Control of Artificial Optical Radiation at Work Regulations, PLASA 2010

Künstlich optische Strahlung, Dr. Wehrle, LUBW 2010

Lichttechnische Grundlagen, Aqua Signal 2001

Licht-Handbuch für den Praktiker, Zumtobel 2013

Moderne Lichtquellen, Strahlenschutzkommission 2010

Report Nr.53 Optische Strahlung, AUVA 2015

Sicherheit bei Veranstaltungen und Produktionen - Scheinwerfer, VGB 2015

Standard for Labelling Entertainment Lighting Fixtures, PLASA 2011

Internetquellen

<http://www.licht.de/de/trends-wissen/ueber-licht/was-ist-licht/ir-und-uv-strahlung/>
- Stand: 15.12.15

<http://www.osram.de/media/resource/hires/317281/technical-data-sheet-hmi-1200-wdxx-gb.pdf>
- Stand: 15.12.15

<http://www.osram.de/media/resource/HIRES/491272/7520930/powerball-hci-de.pdf>
- Stand: 15.12.15

<http://www.ledlight.osram-os.com/2011/04/high-color-rendering-index-cri-led-lights>
- Stand: 15.12.15

http://www.osram.de/osram_de/presse/pressemeldungen/_fachpresse/2014/osram-erreicht-rekordwerte-bei-gruenen-led/index.jsp
- Stand: 15.12.15

<http://www.retina.ch/files/retina-journal/html/2004/rsj2004-01-d-2.htm>, 2004
- Stand: 15.12.15

<http://www.arbeitsinspektion.gv.at/nr/rdonlyres/0fe4ceb1-6ffc-4ba4-9634-f97a7a51dfff/0/vopst.pdf>
- Stand: 15.12.15

<http://www.chauvetlighting.com/colorado-2-zoomtour>
- Stand: 15.12.15

<http://www.spektrum.de/lexikon/optik/pupille/2698>
- Stand: 15.12.15

http://www.uni-bielefeld.de/lili/personen/gnottbusch/doc/Schriftspracherwerb_10.pdf
- Stand: 15.12.15

http://www.gaa.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16050/2_1_19.pdf
- Stand: 15.12.15

http://www.film-tv-video.de/newsdetail+M5a6f57a63f3.html?&no_cache=1
- Stand: 15.12.15

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, die vorliegende Bachelorthesis mit dem Titel „Praktische Untersuchung der Relevanz von Blaulichtgefährdung in TV Studios und Theatern“ selbständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben.

Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

(Unterschrift)