



Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2254**

M. Janßen
G. Ott

**Messverfahren zur Bewertung
inkohärenter optischer Strahlung**

Dortmund/Berlin/Dresden 2016

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung“ – Projekt F 2254 – der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dipl.-Ing. Marco Janßen
Dipl.-Ing. Günter Ott
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelfoto: Uwe Völkner, Fotoagentur FOX, Lindlar/Köln

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 - 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon: 0231 9071-2071
Telefax: 0231 9071-2070
E-Mail: info-zentrum@baua.bund.de
Internet: www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 - 42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



www.baua.de/dok/7764532

ISBN 978-3-88261-170-0

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| Kurzreferat | 5 |
| Abstract | 6 |
| 1 Einleitung | 7 |
| 2 Gesetzliche Grundlagen | 8 |
| 2.1 EU-Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“ | 8 |
| 2.2 Gesetzliche Grundlagen zum Schutz vor natürlicher optischer Strahlung | 9 |
| 2.3 EU-Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG | 10 |
| 2.4 Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung | 11 |
| 2.5 Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) | 12 |
| 2.6 Normen zur Anwendung der OStrV | 13 |
| 2.6.1 DIN EN 62471 (VDE 0837-471):2009-02, „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ | 13 |
| 2.6.2 DIN EN 12198 „Sicherheit von Maschinen - Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung“ | 14 |
| 2.6.3 DIN EN 14255 „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ | 15 |
| 2.6.4 DIN 5031-11: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 11 | 16 |
| 3 Theoretische Grundlagen | 17 |
| 3.1 Optische Strahlung | 17 |
| 3.1.1 Radiometrische und photometrische Kenngrößen | 18 |
| 3.1.2 Bestrahlungsstärke, effektive Bestrahlungsstärke | 19 |
| 3.1.3 Bestrahlung | 20 |
| 3.1.4 Strahldichte | 20 |
| 3.1.5 Beleuchtungsstärke | 21 |
| 3.2 Quellen inkohärenter optischer Strahlung | 22 |
| 3.2.1 Sonnenstrahlung | 23 |
| 3.2.2 Glühlampen und Halogenglühlampen | 24 |
| 3.2.3 LED | 25 |
| 3.2.4 Quecksilberniederdruck-Lampe | 26 |
| 3.2.5 Schweißlichtbögen | 28 |
| 3.2.6 Strahlung bei der Glasbearbeitung | 29 |
| 3.3 Biologische Wirkungen | 29 |
| 3.3.1 Auswirkungen auf das Auge | 31 |
| 3.3.2 Wirkung von UV-Strahlung auf das Auge | 31 |
| 3.3.3 Wirkung von sichtbarer und IR-Strahlung auf das Auge | 32 |
| 3.3.4 Indirekte Auswirkungen inkohärenter optischer Strahlung | 34 |
| 3.3.5 Auswirkungen auf die Haut | 34 |
| 3.3.6 Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4 | Messverfahren und Messgeräte | 37 |
| 4.1 | Spektralverfahren | 38 |
| 4.1.1 | Monochromator mit Detektor zur schrittweisen Abtastung der Wellenlänge | 39 |
| 4.1.2 | Spektralradiometer mit Array-Detektor | 40 |
| 4.2 | Integralverfahren | 41 |
| 4.2.1 | Integralradiometer mit selektiver Empfindlichkeit | 41 |
| 4.2.2 | Personendosimeter | 43 |
| 4.2.3 | Messsystem mit pyroelektrischem Empfänger | 45 |
| 4.2.4 | Bildgebende Verfahren | 46 |
| 4.3 | Streulichtreduktion bei Array-Spektralradiometern | 47 |
| 4.3.1 | Subtraktionsverfahren | 48 |
| 4.3.2 | Bandpassfilterung | 48 |
| 5 | Kalibrierung | 50 |
| 5.1 | Kalibrierung der Wellenlänge | 51 |
| 5.1.1 | Kalibrierquellen | 51 |
| 5.1.2 | Zeitpunkt/Kalibrierintervall | 52 |
| 5.1.3 | Durchführung einer Wellenlängenkalibrierung | 52 |
| 5.2 | Kalibrierung von Bestrahlungsstärke und Strahldichte | 52 |
| 5.2.1 | Kalibrierquellen für die Strahldichte | 53 |
| 5.2.2 | Durchführung einer spektralen Kalibrierung | 55 |
| 5.2.3 | Distanz zwischen Messkopf und Kalibrierlampe | 56 |
| 5.2.4 | Durchführung und Überprüfung einer Absolutkalibrierung | 57 |
| 6 | Bewertung optischer Strahlung am Arbeitsplatz | 60 |
| 7 | Bewertung optischer Strahlungsquellen | 67 |
| 7.1 | Bestimmung der scheinbaren Quellgröße | 68 |
| 7.2 | Einhaltung von Grenzwerten nach DIN EN 62471 | 71 |
| 7.2.1 | Einteilung in Risikogruppen nach DIN EN 62471 | 72 |
| | Literaturverzeichnis | 74 |
| | Tabellenverzeichnis | 77 |
| | Abbildungsverzeichnis | 78 |
| | Anhang | 80 |
| | Anhang 1 Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung nach OStrV [9] | 80 |
| | Anhang 2 Messprotokoll | 82 |

Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung

Kurzreferat

Für die Beurteilung inkohärenter optischer Strahlung am Arbeitsplatz ist die Kenntnis der gesetzlichen Grundlagen Voraussetzung. Insbesondere die EU-Richtlinie „Künstliche optische Strahlung“ und die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung mit ihren technischen Regeln verpflichten den Arbeitgeber zu einer Bewertung davon ausgehender Gefährdungen. Verschiedene Normen stellen Messverfahren und Bewertungskriterien bereit, die dafür von Bedeutung sind.

Neben dem Regelwerk sind zur Beurteilung auch theoretische Grundlagen zu den verschiedenen Bereichen optischer Strahlung, den radiometrischen und photometrischen Kenngrößen, wichtigen Quellen inkohärenter optischer Strahlung und zu biologischen Wirkungen auf Auge und Haut erforderlich.

Zur Ermittlung der auftretenden optischen Strahlung ist ein geeignetes Messverfahren sowie ein entsprechendes Messgerät auszuwählen. Zu unterscheiden sind prinzipiell spektrale und integrale Verfahren. Mit Spektralmessgeräten wird die spektrale Verteilung einer Kenngröße ermittelt. Diese Geräte sind im Allgemeinen genauer, in der Anschaffung jedoch auch teurer und die Bedienung aufwendiger. Integralmessgeräte bieten zudem den Vorteil, dass sie das Messergebnis direkt anzeigen. Sie sind daher für Übersichtsmessungen oft besser geeignet. Integral messen auch verschiedene Dosimeter, besonders kompakte Messgeräte, die von exponierten Personen am Körper getragen werden.

Eine genaue Messung setzt neben der Auswahl des geeigneten Verfahrens eine Kalibrierung des Messgerätes voraus. Diese kann vom Gerätehersteller bzw. einem geeigneten Labor oder bei Spektralmessgeräten selbst durchgeführt werden. Neben der Auswahl einer geeigneten Kalibrierquelle sind dabei in Abhängigkeit von der zu kalibrierenden Größe weitere Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu zählen insbesondere der Abstand und die Ausrichtung des Detektors (Eingangsoptik) zur Kalibrierquelle.

Die Bewertung der optischen Strahlung an einem Arbeitsplatz setzt eine sorgfältige Planung und Durchführung voraus. Erforderlich sind die Definition der Zielsetzung, die Festlegung der Expositionsbedingungen, die Planung und Durchführung der Messungen sowie die Auswertung und Protokollierung der Messergebnisse. Die konkrete Vorgehensweise ist von der jeweiligen Arbeitsplatzsituation abhängig.

Im vorliegenden Bericht werden das zugrundeliegende Regelwerk, theoretische Grundlagen optischer Strahlung und ihrer Ermittlung sowie Erfahrungen aus der Praxis im Umgang mit der Messtechnik vermittelt, die bei der Beurteilung einer Gefährdung durch optische Strahlung am Arbeitsplatz unterstützen sollen.

Schlagwörter:

Optische Strahlung, biologische Wirkungsfunktion, spektrale und integrale Messverfahren, Beurteilung der Gefährdung, Grenzwerte

Measurement procedures for the evaluation of incoherent optical radiation

Abstract

For the evaluation of incoherent optical radiation knowledge of the legal foundations is a prerequisite. In particular, the EU directive "Artificial Optical Radiation", the Working Conditions Act and the Occupational Safety and Health Regulation to artificial optical radiation with their technical regulations require the employer to an assessment of the hazards. Various standards represent measuring methods and evaluation criteria which are of importance for this.

In addition to the rules and theoretical foundations to the different areas of optical radiation, radiometric and photo-metric characteristics, important sources of incoherent optical radiation and biological effects on eye and skin are necessary for the evaluation.

To determine the occurring optical radiation, a suitable measurement procedure and an appropriate meter must be selected. Spectral and integral methods can be distinguished in principle. With spectral measurement, the spectral distribution of a parameter is determined. These devices are generally more accurate, but also more expensive to purchase and costly to operate. Integral measurement devices offer the advantage that they show the measurement result directly. Therefore, they are often better for overview measurements. Various dosimeters are measuring integral, especially compact measuring devices that are worn by persons exposed to the body.

An accurate measurement requires in addition to the selection of the appropriate method a calibration of the instrument. This can be performed by the equipment manufacturer or a suitable laboratory or spectral measurement itself. In addition to selecting a suitable calibration source other factors are taken into account, depending on the size to be calibrated.

The evaluation of optical radiation in a workplace requires careful planning and execution. It requires the definition of objectives, defining the exposure conditions to the planning and execution of the measurements and the analysis and reporting of results. The specific procedure is dependent on the particular workplace situation.

In this report, the underlying set of rules, the theoretical foundations of optical radiation and its determination as well as practical experience in dealing with the measurement technique are taught to assist in the assessment of hazards of optical radiation in the workplace.

Key words:

Optical radiation, biological effect function, spectral and integral measuring methods, risk assessment, limit values

1 Einleitung

Am 17.06.2010 ist die Verordnung zum Schutz von Arbeitnehmern vor künstlicher optischer Strahlung (OStrV) in Kraft getreten. Damit wurde die EU-Richtlinie 2006/25/EG über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) in deutsches Recht umgesetzt. Nicht erst seit diesem Zeitpunkt müssen Gefährdungen am Arbeitsplatz beurteilt werden, die durch optische Strahlung hervorgerufen werden. Fachkräfte für Arbeitssicherheit sind in der Regel mit dieser Aufgabe betraut. In vielen Fällen fehlen jedoch theoretische und praktische Grundkenntnisse, um eine Beurteilung im Sinne der OStrV durchzuführen.

Wie optische Strahlungsquellen nach ihrer Gefährdung bewertet werden müssen, ist nicht Gegenstand dieses Berichtes. Hierzu sind die Technischen Regeln zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Inkohärente optische Strahlung) erstellt worden, die u.a. detailliert die Vorgehensweise zur Ermittlung der Gefährdung beschreibt [20].

Mit der OStrV wird die Forderung nach dem Arbeitsschutzgesetz zur Beurteilung der Gefährdungen für Beschäftigte am Arbeitsplatz konkretisiert. Gefährdet sind die Augen und die Haut, für die, je nach Wellenlängenbereich, unterschiedliche physikalische und biologische Wirkungsfunktionen zu berücksichtigen sind.

Das Messen optischer Strahlung ist eine komplexe Aufgabe und erfordert neben der Bereitstellung geeigneter Messgeräte entsprechende Fachkenntnisse und Erfahrungen. Die meisten Fehler beruhen auf Unkenntnis heraus, was, wie und womit gemessen werden soll. Je nach Messaufgabe kann selbst eine Messwertabweichung von 50 % toleriert werden, wenn sie z. B. für eine Abschätzung der Gefährdung vorgenommen werden und die Fehlertoleranzen berücksichtigt werden. Für die direkte Kontrolle, ob Grenzwerte überschritten werden oder zur Ermittlung der maximalen Expositionsdauer sollten die Messgeräte eine Fehlertoleranz von weniger als 30 % haben.

Obwohl die Toleranzgrenzen für Messgeräte sehr hoch erscheinen, werden sie oft, insbesondere für den ultravioletten Bereich, nicht erreicht.

2 Gesetzliche Grundlagen

2.1 EU-Richtlinie 2006/25/EG „Künstliche optische Strahlung“

Mit der Industrialisierung und der zunehmenden Anzahl von Arbeitsprozessen, bei denen optische Strahlung auftreten kann, nahm auch die Anzahl der Arbeitsunfälle mit Schädigungen an Haut und Augen zu. Lange Zeit bestand der Schutz vor optischer Strahlung nur auf der Grundlage von Erfahrungen und es fehlte das Wissen über Schädigungsmechanismen, das als Basis für die Festlegung von Grenzwerten nötig war.

Anfang des letzten Jahrhunderts wurden erste Untersuchungen zu den biologischen Wirkungen der optischen Strahlung an Augen und Haut durchgeführt. Sehr schnell nach der Entwicklung des ersten Lasers 1960 haben Mediziner in enger Zusammenarbeit mit Physikern ein Grenzwertkonzept erstellt. Über viele Jahre wurden in der Praxis die Grenzwertempfehlungen zunächst von der American Conference of Governmental Industrial and Hygienists (ACGIH), der WHO, der Internationalen Strahlenschutzkommission und den Berufsgenossenschaften (BGI 5006) angewandt. Mit der europäischen Richtlinie 2006/25/EG über „Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“, die am 5. April 2006 in Kraft getreten ist, wurden erstmalig verbindliche Grenzwerte festgelegt. In den Anhängen der Richtlinie sind Grenzwerte aufgeführt, die den Schutz der Arbeitnehmer vor einer Schädigung von Augen und Haut durch die Exposition gegenüber optischer Strahlung von künstlichen Quellen gewährleisten sollen. Der Anhang I betrifft Grenzwerte für inkohärente optische Strahlung und der Anhang II Grenzwerte für Laserstrahlung [1].

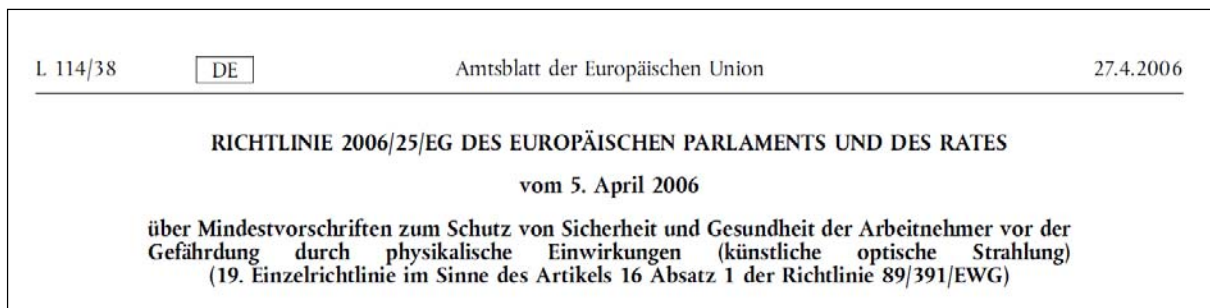


Abb. 2.1 Deckblatt EU-Richtlinie 2006/25/EG

Nach Artikel 4 „Ermittlung der Exposition und Bewertung der Risiken“ ist der Arbeitgeber dazu verpflichtet, im Falle der Exposition von Arbeitnehmern gegenüber künstlichen Quellen optischer Strahlung, eine Bewertung und erforderlichenfalls eine Messung und/oder Berechnung des Ausmaßes der optischen Strahlung vorzunehmen. Bei der Bewertungs-, Mess- und/oder Berechnungsmethodik sind hinsichtlich Laserstrahlung und inkohärenter Strahlung die einschlägigen Normen zu berücksichtigen.

2.2 Gesetzliche Grundlagen zum Schutz vor natürlicher optischer Strahlung

Obwohl die Sonnenstrahlung als natürliche optische Strahlung nicht in die EU-Richtlinie 2006/25/EG zur optischen Strahlung aufgenommen ist, sind die Gefährdungen durch natürliche optische Strahlung nach der Rahmenrichtlinie 89/391/EWG zu bewerten. Danach besteht für die Mitgliedstaaten die Verpflichtung, dass die Arbeitgeber alle notwendigen Maßnahmen ergreifen müssen, um für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer in Bezug auf alle Aspekte, die die Arbeit betreffen, zu sorgen [2].

Die Arbeitgeber in Deutschland sind

- nach dem Arbeitsschutzgesetz [3] (§ 4 „Allgemeine Grundsätze“, § 5 „Beurteilung der Arbeitsbedingungen“, § 11 „Arbeitsmedizinische Vorsorge, § 12 „Unterweisung“),
- nach der Arbeitsstättenverordnung [4] (ArbStättV § 3, Anhang 5.1 „Nicht allseits umschlossene und im Freien liegende Arbeitsstätten“)
- und nach der Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“ BGV A1 [5], § 23 „Maßnahmen gegen Einflüsse des Wettergeschehens“

gesetzlich für den Gesundheitsschutz und die Sicherheit ihrer Beschäftigten auch gegenüber natürlicher optischer Strahlung am Arbeitsplatz verantwortlich.

Es gelten die Verpflichtungen:

- zur Gefährdungsbeurteilung (Expositionsermittlung und -bewertung) einschließlich Festlegung und Anwendung von Schutzmaßnahmen
- zur Unterweisung
- zur arbeitsmedizinischen Vorsorge

Es bestehen jedoch keine Verpflichtungen:

- zur Einhaltung von Expositionsgrenzwerten, da solche nicht existieren und die Grenzwerte für optische Strahlung aus künstlichen Strahlungsquellen nicht unmittelbar anwendbar sind
- zur Klassifizierung
- zur Abgrenzung und Kennzeichnung [6]

Nach der Arbeitsstättenverordnung sind Arbeitsplätze in nicht allseits umschlossenen Arbeitsstätten und im Freien so zu gestalten, dass sie von den Beschäftigten bei jeder Witterung sicher und ohne Gesundheitsgefährdung erreicht, benutzt und wieder verlassen werden können. Dazu gehört, dass Arbeitsplätze gegen Witterungseinflüsse geschützt sind oder den Beschäftigten geeignete persönliche Schutzausrüstungen zur Verfügung gestellt werden.

Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV)

ArbStättV

Ausfertigungsdatum: 12.08.2004

Vollzitat:

"Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179), die zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960) geändert worden ist"

Abb. 2.2 Deckblatt Arbeitsstättenverordnung

Für die Prävention leistet die Unterweisung durch den Arbeitgeber einen sehr wichtigen Beitrag. Hinweise zur eigenen Beobachtung des Körpers und Informationen über mögliche Hauterkrankungen können zu einer frühen Erkennung und somit zu einem guten Therapieerfolg beitragen.

Informationen zu einem risiko- und verantwortungsbewussten Umgang mit der Sonne für den privaten und beruflichen Bereich sind in der Broschüre „Licht und Schatten - Schutz vor Sonnenstrahlung für Beschäftigte im Freien“ enthalten [7].

2.3 EU-Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG

Im Artikel 13 der europäischen Richtlinie 2006/25/EG wird die Kommission zur Erstellung eines praktischen Leitfadens verpflichtet. Der Leitfaden soll eine Hilfestellung geben, um die Richtlinie besser zu verstehen. Dies betrifft insbesondere die Bestimmungen zu Artikel 4 „Ermittlung der Exposition und Bewertung der Risiken“ und Artikel 5 „Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung der Risiken“ sowie zu den Expositionsgrenzwerten nach Anhang I „Inkohärente optische Strahlung“ und Anhang II „Laserstrahlung“. In den Anhängen des Leitfadens werden die Eigenschaften der optischen Strahlung, ihre biologische Wirkung auf das Auge und die Haut sowie der Gebrauch von Substanzen, die die Lichtempfindlichkeit von Menschen verstärken, erläutert. Weiterhin sind umfangreich ausgearbeitete Beispiele für einige künstliche Quellen optischer Strahlung enthalten und Tätigkeitsbereiche beschrieben, bei denen künstliche optische Strahlungsquellen zur Anwendung kommen.



Abb. 2.3 Deckblatt Leitfaden zur EU-Richtlinie

Hinsichtlich der Messung enthält der Leitfaden nur wenige Aussagen. Danach können nicht in allen Fällen die Herstellerangaben für eine Gefährdungsbeurteilung hinreichend sein, sodass eine Messung der optischen Strahlung notwendig wird. Die dazu erforderlichen Messgeräte sind relativ teuer und können nur mit entsprechender Sachkenntnis eingesetzt werden. Die falsche Bedienung kann zu fehlerhaften Messdaten als Grundlage der Gefährdungsbeurteilung führen. Falls die eigene Ausstattung mit geeigneter Messtechnik nicht ausreichend ist und die Erfahrung im Einsatz der Geräte fehlt, sollte externe Unterstützung in Anspruch genommen werden [8].

2.4 Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung

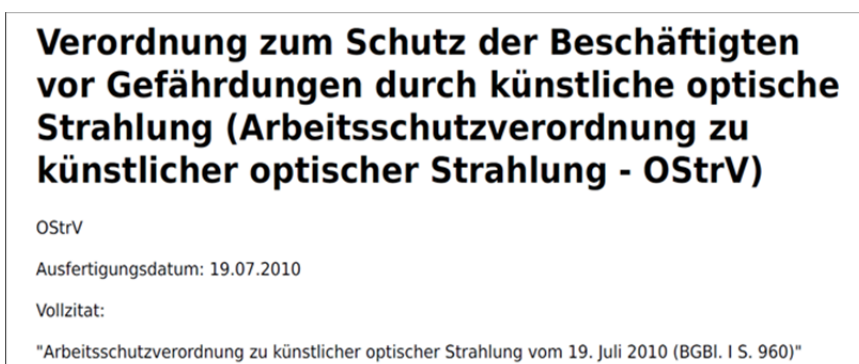


Abb. 2.4 Deckblatt Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung

Mit der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) wird die EU-Richtlinie 2006/25/EG in nationales Recht umgesetzt. Sie ist am 27. Juli 2010 in Kraft getreten.

Eine wichtige Forderung der OStrV ist die Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung. Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach § 5 Arbeitsschutzgesetz hat ein Arbeitgeber zunächst festzustellen, ob Beschäftigte am Arbeitsplatz optischer Strahlung aus künstlichen Quellen ausgesetzt sind bzw. sein können. Da die OStrV für jegliche Quellen künstlicher optischer Strahlung an Arbeitsplätzen verbindlich ist, werden nahezu alle Arbeitgeber verpflichtet sein, die davon ausgehenden Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu beurteilen. Notwendige Informationen hierzu können beispielsweise beim Hersteller oder Inverkehrbringer der verwendeten Arbeitsmittel beschafft werden. Grundlage für die Gefährdungsbeurteilung ist ein vom Gesetzgeber festgelegtes Konzept zu Expositionsgrenzwerten gegenüber künstlicher optischer Strahlung. Lässt sich anhand der vorliegenden Informationen nicht sicher feststellen, ob die Expositionsgrenzwerte eingehalten werden, muss der Umfang der Exposition durch Berechnungen oder Messungen festgestellt werden. Entsprechend dem Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung (einschließlich Festlegung von Schutzmaßnahmen) hat der Arbeitgeber betroffene Beschäftigte zu unterweisen [9].

Nach § 4 der OStrV gilt:

„Messungen und Berechnungen

- (1) Der Arbeitgeber hat sicherzustellen, dass Messungen und Berechnungen nach dem Stand der Technik fachkundig geplant und durchgeführt werden. Dazu müssen Messverfahren und -geräte sowie eventuell erforderliche Berechnungsverfahren
 1. den vorhandenen Arbeitsplatz- und Expositionsbedingungen hinsichtlich der betreffenden künstlichen optischen Strahlung angepasst sein und
 2. geeignet sein, die jeweiligen physikalischen Größen zu bestimmen; die Messergebnisse müssen die Entscheidung erlauben, ob die in § 6 genannten Expositionsgrenzwerte eingehalten werden.
- (2) Die durchzuführenden Messungen können auch eine Stichprobenerhebung umfassen, die für die persönliche Exposition der Beschäftigten repräsentativ ist.“

2.5 Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS)

Mit den Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) wird die Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung hinsichtlich der Ermittlung und Bewertung der Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung (IOS), der Messungen und Berechnungen von Expositionen sowie der Ableitung von geeigneten Schutzmaßnahmen konkretisiert. Des Weiteren werden durch die TROS im Rahmen ihres Anwendungsbereichs die Anforderungen

der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge umgesetzt. Sie besteht aus folgenden Teilen:

- TROS IOS Teil Allgemeines
- TROS IOS Teil 1: Beurteilung der Gefährdung durch inkohärente optische Strahlung
- TROS IOS Teil 2: Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung
- TROS IOS Teil 3: Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung

Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnungen erfüllt sind [20].

2.6 Normen zur Anwendung der OStrV

Normen sind grundsätzlich nicht rechtlich bindend. Dennoch können sie Richtlinien und Verordnungen gelistet sein und als „Stand der Technik“ angesehen werden. Es gilt dann die Vermutungswirkung, d.h. werden die Bedingungen der Norm erfüllt, können auch die Verordnungen als erfüllt angesehen werden. Erst wenn Normen in einem Gesetz explizit benannt werden, sind sie rechtlich bindend (z.B. Messungen sind nach DIN EN XY durchzuführen). Nachstehend werden die wichtigsten Normen vorgestellt, die zur Anwendung der OStrV von Bedeutung sind.

2.6.1 DIN EN 62471 (VDE 0837-471):2009-02, „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“

In dem Verzeichnis 1 der Verordnung über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt (1. ProdSV) sind Normen aus dem harmonisierten Bereich gelistet. In diesem Verzeichnis ist auch die DIN EN 62471-1 [10] aufgeführt. Bei korrekter Anwendung dieser Norm kann der Hersteller davon ausgehen, dass die grundlegenden Anforderungen an Sicherheit und Gesundheit der EU-Richtlinie erfüllt sind.

Die Norm stellt ein standardisiertes Verfahren für die Bewertung von möglichen Gefahren, die von Lampen und Lampensystemen ausgehen können, bereit.

Nachdem die LED aus dem Anwendungsbereich der Laser-Norm DIN EN 60825-1 gestrichen wurden, fallen sie jetzt in den Anwendungsbereich der DIN EN 62471 [10]. Der Anwendungsbereich umfasst somit alle elektrisch betriebenen, inkohärenten optischen Breitbandstrahlungsquellen für den Wellenlängenbereich von 200 nm bis 3 000 nm. Laser werden weiterhin durch die DIN EN 60825-1 abgedeckt und daher nicht in der DIN EN 62471 behandelt.

Wichtiger Bestandteil dieser Norm sind die Festlegungen zur Messung, als Grundlage für die Berechnung von photobiologisch wirksamen Strahlungsgrößen, und ein Verfahren zur Klassifizierung von Lampen. Für die Klassifizierung gelten die Grenzwerte der EU-Richtlinie zur künstlichen optischen Strahlung (2006/25/EG). Das Klassifizierungsschema bezieht sich auf die Klassifizierung von Lampen, kann jedoch in ähnlicher Art auf Leuchten oder andere Systeme, die Lampen enthalten, Anwendung finden. Lampen werden in vier Risikogruppen eingeteilt, wobei die aufsteigende Risi-

kogruppe auf ein steigendes potenzielles Risiko der Gesundheitsgefährdung hinweist (siehe Tab. 2.1) [10].

Tab. 2.1 Festlegung der Risikogruppen nach DIN EN 62471

| Risikogruppe | Risiko | Hintergrund |
|-----------------------|---------------|---|
| Freie Gruppe | kein | Keine photobiologische Gefahr, auch nicht bei längerer Exposition |
| Risikogruppe 1 | gering | Sicher bei normalem Umgang, außer für sehr lang andauernde Betrachtung |
| Risikogruppe 2 | mittel | Gefährdung wird aufgrund der Abwendungsreaktionen minimiert |
| Risikogruppe 3 | hoch | Gefahr schon bei kurzzeitiger Bestrahlung im Referenzabstand Eine Verwendung in der Allgemeinbeleuchtung ist nicht erlaubt |

2.6.2 DIN EN 12198 „Sicherheit von Maschinen - Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung“

Mit dem Teil 1 DIN EN 12198-1 „Allgemeine Leitsätze“ werden die grundlegenden Anforderungen der Maschinenrichtlinie 98/37/EG hinsichtlich der von Maschinen ausgehenden Strahlenemission konkretisiert. Diese Norm ist für optische Strahlungsquellen anzuwenden, sofern sie Bestandteil einer Maschine sind und nicht zur Beleuchtung verwendet werden. Sie gilt neben der optischen Strahlung auch für nieder- und hochfrequente Felder. Zum Anwendungsbereich gehören jedoch nicht die ionisierende Strahlung und die Laserstrahlung.

Maschinen sind so zu konstruieren, dass jede Strahlenemission auf eine für den Betrieb erforderliche Intensität begrenzt und der Zugang für Personen verhindert bzw. die zugängliche Strahlung auf ein nichtgefährliches Maß reduziert wird.

Für den Hersteller sind in der Norm Verfahren zur Gefährdungsbeurteilung festgelegt. Sie umfassen eine Ermittlung der Strahlenemission, eine Kennzeichnung aller Gefahren und Maßnahmen zur Verminderung der Risiken. Weiterhin ist eine Einteilung der Maschinen in Gefährdungs-Kategorien erforderlich (siehe Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Sicherheitsklassifizierung von Maschinen nach EN 12198-1

| Kategorie | Anforderungen und Schutzmaßnahmen | Informationen und Ausbildung |
|-----------|--|---|
| 0 | Keine Anforderungen | Keine Informationen notwendig |
| 1 | Anforderungen, Zugangsbegrenzung, Schutzmaßnahmen können erforderlich sein | Informationen über Gefahren, Risiken und sekundäre Gefährdungen |
| 2 | Besondere Anforderungen und grundlegende Schutzmaßnahmen | Informationen über Gefahren, Risiken und sekundäre Wirkungen; spezielle Ausbildung kann erforderlich sein |

Bei der Zuweisung einer Kategorie sind die Einricht-, Betriebs- und Reinigungsphase beim Einsatz der Maschine zu berücksichtigen. Für Maschinen, die nicht der Kategorie 0 entsprechen, ist die Strahlenemission für den beabsichtigten Einsatz zu beurteilen. Dabei ist neben dem Abstand von der Strahlungsquelle und möglichen Bestrahlungszeiten auch zu berücksichtigen, welche Personen der Strahlung ausgesetzt sein können (Erwachsene, Kinder, unterwiesene und nichtunterwiesene Personen usw.).

Neben dem Teil 1 „Allgemeine Leitsätze“ sind weitere Anforderungen in Teil 2 DIN EN 14255-2 „Messverfahren für die Strahlenemission“ und in Teil 3 DIN EN 14255-3 „Verminderung der Strahlung durch Abschwächung oder Abschirmung“ festgelegt [11], [12], [13].

2.6.3 DIN EN 14255 „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“

Die DIN EN 14255 „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ besteht aus vier Teilen. In Teil 4: „Terminologie und Größen für Messungen von UV-, sichtbaren und IR-Strahlungsexpositionen“ werden Begriffe und Formeln aufgeführt, die in den Teilen 1, 2 und 3 zur Anwendung kommen.

Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung

Teil 2: Sichtbare und infrarote Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz

Teil 3: Von der Sonne emittierte UV-Strahlung

2.6.4 DIN 5031-11: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 11

Bei vielen Anwendungen ist optische Strahlung zu messen, die eine photochemische, photophysikalische, photobiologische oder photomedizinische Wirkung auf die Augen und die Haut besitzt. Dies sind zum Beispiel die erythemwirksame Bestrahlungsstärke, die Strahldichte zur Blaulichtschädigung oder die Strahldichte zur thermischen Netzhautschädigung.

In dieser Norm sind die Kenngrößen und Eigenschaften von Radiometern¹ zur Erfassung von aktinischen Strahlungsgrößen² beschrieben. Es werden Anforderungen an integral messende Radiometer, Spektralradiometer und Dosimeter beschrieben. Die Norm legt die wesentlichen Begriffe und die zur Kennzeichnung von aktinischen Radiometern anzuwendenden Kenngrößen fest, die zum Vergleich von aktinischen Radiometern und zur Auswahl eines Radiometers für den konkreten Anwendungsfall dienen. Die Radiometer sind in vier Güteklassen eingeteilt. Die höchsten Anforderungen sind in der Güteklasse 1 für Präzisionsmessungen festgelegt. In der Güteklasse 4 sind die Anforderungen deutlich geringer und genügen einem Messgerät, welches für Übersichtsmessungen geeignet ist.

Für die Praxis sind wichtige Informationen in den Anhängen enthalten, wie z. B. Filterdaten, Daten von Bezugsspektren und Angaben zur Durchführung von Integral- bzw. Spektralmessungen [19].

¹ Messgerät zur quantitativen Bestimmung von Strahlungsgrößen

² Größen, die über eine Wirksamkeit auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien verfügen

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Optische Strahlung

Der Wellenlängenbereich der optischen Strahlung ist von 100 nm bis 1 mm definiert und wird in die Strahlungsbereiche ultraviolette (UV-), sichtbare (VIS) und Infrarotstrahlung (IR) unterteilt (s. Abb. 3.1).

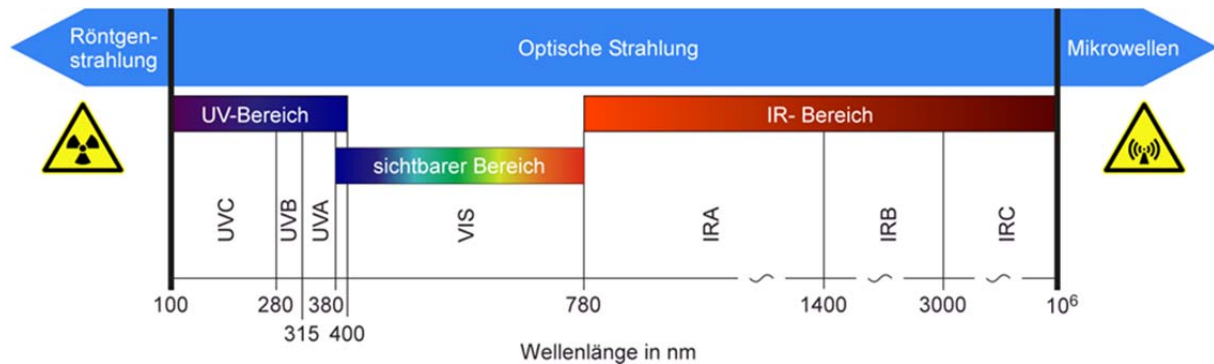



Abb. 3.1 Spektralbereiche der optischen Strahlung

Der Bereich der UV-Strahlung wird in drei Bereiche, UV-C (100 bis 280 nm), UV-B (280 bis 315 nm) und UV-A (315 bis 400 nm), eingeteilt. Die UV-Strahlung ist die energiereichste optische Strahlung.

Die Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm kann im Auge bis zur Netzhaut vordringen und erzeugt dort einen visuellen Reiz. Diese für uns Menschen sichtbare Strahlung wird als Licht bezeichnet. Angaben wie UV-Licht oder IR-Licht sind nach dieser Definition nicht korrekt, da Licht nur auf den sichtbaren Bereich begrenzt ist.

Am langwelligen Ende des Lichts schließt sich die IR-Strahlung an, die auch als Wärmestrahlung bezeichnet wird. Der Bereich der IR-Strahlung wird in drei Bereiche, IR-A (780 bis 1400 nm), IR-B (1400 bis 3000 nm) und IR-C (3000 nm bis 1 mm), eingeteilt. In der Tab. 3.1: Einteilung der optischen Strahlung sind die Spektralbereiche dargestellt [21].

Tab. 3.1 Einteilung der optischen Strahlung

| Bezeichnung der Strahlung | | Wellenlänge λ in nm | Frequenz ν in THz |
|---------------------------|---|--------------------------------|--------------------------|
| UV-C | Vakuum-UV (VUV) | 100 bis 200 | 3000 bis 1500 |
| | Fernes UV (FUV) | 200 bis 280 | 1500 bis 1070 |
| UV-B | Mittleres UV (MUV) | 280 bis 315 | 1070 bis 950 |
| UV-A | Nahes UV (NUV) | 315 bis 400 | 950 bis 790 |
| Sichtbar |  VIS | 380 bis 780 | 789 bis 385 |
| IR-A | Nahes IR | 780 bis 1400 | 385 bis 214 |
| IR-B | Nahes IR | 1400 bis 3000 | 214 bis 100 |
| IR-C | Mittleres IR | 3000 bis 50000 | 100 bis 6 |
| | Fernes IR | 50000 bis 10^6 | 100 bis 0,3 |

3.1.1 Radiometrische und photometrische Kenngrößen

Die Radiometrie ist die Wissenschaft von der Messung elektromagnetischer Strahlung. Mit den radiometrischen Größen werden die energetischen Eigenschaften von Strahlungsquellen, Empfängern und bestrahltem Material beschrieben. Für eine Beurteilung der Gefährdung sind die Bestrahlungsstärke und die Strahldichte die wichtigsten Bewertungsgrößen.

Die photometrischen Größen berücksichtigen die Hellempfindlichkeit $V_{(\lambda)}$ des Auges (siehe Abb. 3.3) und sind auf den sichtbaren Bereich von 380 nm bis 780 nm beschränkt.

In diesem Abschnitt werden radiometrische Größen und eine photometrische Strahlungsgröße beschrieben. In der Tabelle 3.2 sind radiometrische Größen und die entsprechenden photometrischen Größen gegenübergestellt.

Tab. 3.2 Gegenüberstellung der radiometrischen und photometrischen Strahlungsgrößen

| Strahlungsart | Radiometrische Größe | Photometrische Größe |
|--|---|---|
| Strahlung, die von einer Quelle insgesamt emittiert wird | Strahlungsleistung Φ_e in W | Lichtstrom Φ_v in lm |
| Strahlungsgröße, die eine Oberfläche bestrahlt | Bestrahlungsstärke E_e in W/m ² | Beleuchtungsstärke E_v in lm/m ² = lx |
| Strahlungsgröße, die eine Oberfläche über eine bestimmte Zeit bestrahlt | Bestrahlung H_e in J/m ² | Belichtung H_v in lx•s |
| Strahlungsleistung von einem gegebenen Punkt der Strahlungsquelle pro projizierter Fläche und Raumwinkel | Strahldichte L_e in W/(m ² sr) | Leuchtdichte L_v in lm/(m ² sr) = cd/m ² |

Die wesentlichen radiometrischen Strahlungsgrößen sind:

3.1.2 Bestrahlungsstärke, effektive Bestrahlungsstärke

Unter der Bestrahlungsstärke E ist die auf die Fläche eines Empfängers auftreffende Strahlungsleistung Φ , bezogen auf die Größe dieses Flächenelementes A , zu verstehen:

$$E_e = \frac{\Phi}{A} \quad \text{Einheit W/m}^2$$

Dabei gilt:

- E_e Bestrahlungsstärke, energetisch in W/m²
- Φ Strahlungsfluss in W
- A Empfängerfläche in m²

Die Bestrahlungsstärke E wird auch als Leistungsdichte bezeichnet.

Für die Anwendung von Expositionsgrenzwerten ist es in einigen Wellenlängenbereichen notwendig, die Strahlungsgrößen mit einer biologischen Wirkungsfunktion zu bewerten. Nach der EU-RL 2006/25/EG [1] werden die biologisch wirksamen Strahlungsgrößen als effektive Strahlungsgrößen bezeichnet. Zur Unterscheidung werden die Bestrahlungsstärken entsprechend der angewandten biologischen Wirkungsfunktionen mit Indizes gekennzeichnet, z. B. wird die effektive Bestrahlungsstärke für die Blaulichtschädigung mit E_B benannt.

$$E_B = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} s_{\lambda}(\lambda)_{B,rel} \cdot E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad \text{Einheit W/m}^2$$

Dabei gilt: E_B effektive Bestrahlungsstärke für Blaulichtschädigung in W/m²
 $E_{\lambda}(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke in W/m²
 $s_{\lambda}(\lambda)_{B,rel}$ spektrale Gewichtung für Blaulichtschädigung

3.1.3 Bestrahlung

Die Bestrahlung H ist die auf eine Fläche A einfallende Strahlungsenergie, geteilt durch die Größe dieses Flächenelementes. Ist die Bestrahlungsstärke bekannt, kann durch Multiplikation der Bestrahlungsstärke E mit der Expositionsdauer t die Bestrahlung H berechnet werden.

$$H_e = E_e \cdot t \quad \text{Einheit J/m}^2 \text{ (Joule pro Fläche)}$$

Dabei gilt: H_e Bestrahlung, energetisch in J/m²
 E_e Bestrahlungsstärke, energetisch in W/m²
t Expositionsdauer in s

Durch eine einfache Umstellung der Formel kann durch Division der als Grenzwert angegebenen Bestrahlung durch eine ermittelte Bestrahlungsstärke eine zulässige Aufenthaltsdauer t bestimmt werden. Innerhalb dieser Expositionsdauer kommt es zu keiner Grenzwertüberschreitung.

Die Berechnung der effektiven Bestrahlung erfolgt entsprechend der effektiven Bestrahlungsstärke.

3.1.4 Strahldichte

Die Strahldichte L gibt an, welche Strahlungsleistung Φ von einem gegebenen Punkt der Strahlungsquelle in die durch den Polarwinkel ε_1 gegebene Richtung pro projiziertem Flächenelement ($\cos(\varepsilon_1)A_1$) und pro Raumwinkel Ω ausgesendet wird.

$$L_e = \frac{\Phi_e}{\Omega \cdot \cos(\varepsilon_1) A_1} \quad \text{Einheit W/m}^2\text{sr}$$

$$L_e = \frac{\Phi_e}{\Omega \cdot A_1} \quad \text{bei } \varepsilon_1 = 0$$

Dabei gilt: L_e Strahldichte, energetisch in W/m²sr
 Φ_e Strahlungsleistung in W
 Ω Raumwinkel in sr
 A_1 Flächenelement

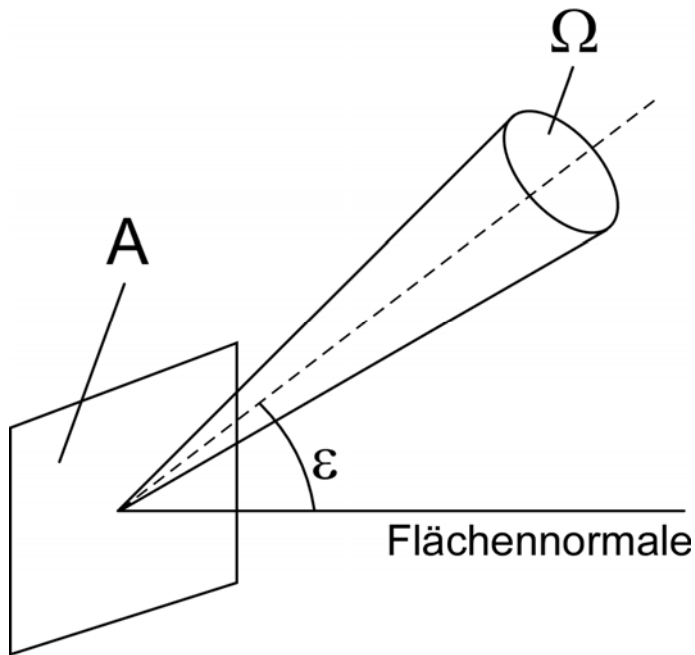


Abb. 3.2 Schematische Darstellung der Strahldichte

Die Berechnung der effektiven Strahldichte erfolgt entsprechend der effektiven Bestrahlungsstärke.

3.1.5 Beleuchtungsstärke

Für die Beurteilung der inkohärenten Strahlung von künstlichen Quellen nach der DIN EN 62471-1 ist die Kenntnis der Beleuchtungsstärke E_v als photometrische Größe von Bedeutung. Die Sehzellen des menschlichen Auges sind nur in dem Bereich von 380 nm bis 780 nm empfindlich. Nicht alle Farben werden von unseren Sehzellen mit der gleichen Helligkeit wahrgenommen. Die maximale Empfindlichkeit der menschlichen Sehzellen besteht bei einer Wellenlänge von ca. 550 nm, was der Farbe Hellgrün entspricht. Wird die spektrale Bestrahlungsstärke E_e mit der Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ des Auges (Abb. 3.3) bewertet, erhält man die spektrale Beleuchtungsstärke.

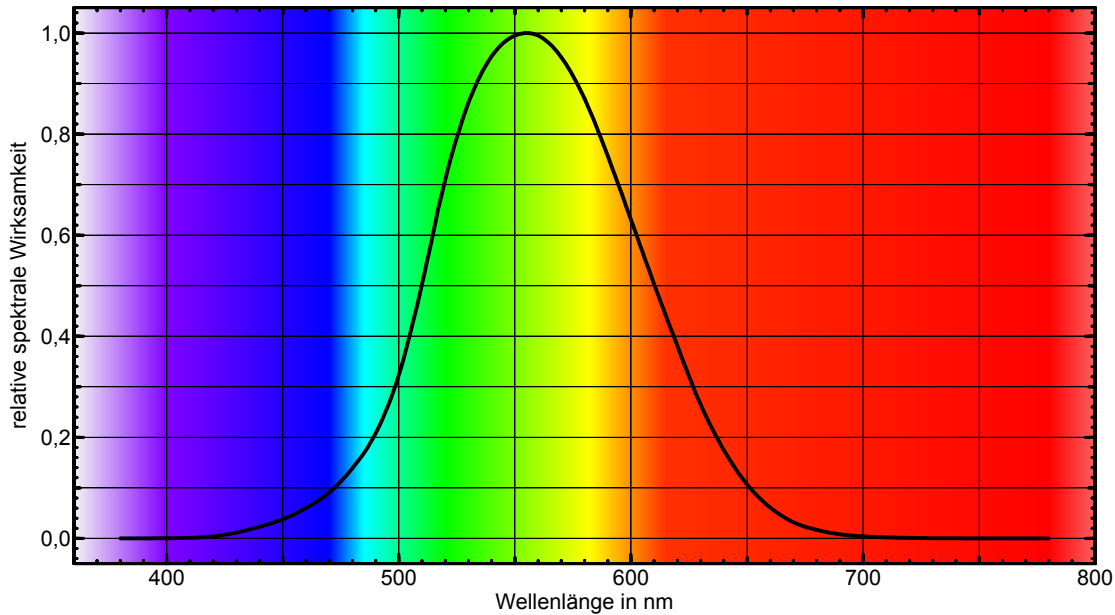


Abb. 3.3 Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ des menschlichen Auges

3.2 Quellen inkohärenter optischer Strahlung

Die optischen Strahlungsquellen können in die Gruppe der inkohärenten und kohärenten Strahlungsquellen (Laser) eingeteilt werden. In diesem Bericht wird nur die Strahlung von inkohärenten Quellen behandelt.

Alle Körper, die über eine bestimmte Temperatur verfügen, emittieren inkohärente Strahlung. Je höher die Temperatur, desto weiter verschiebt sich das Maximum des Spektrums in den sichtbaren bzw. ultravioletten Bereich.

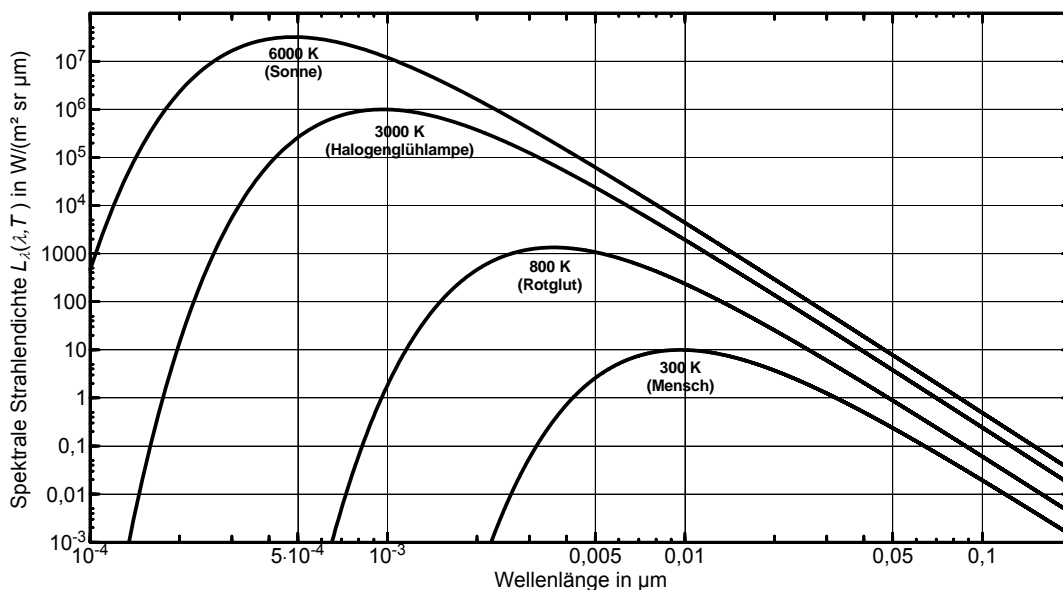


Abb. 3.4 Planck'sches Strahlungsspektrum

Wesentliche Merkmale inkohärenter optischer Strahlung sind:

- breitbandiges Spektrum bzw. Emissionslinien
- großer Abstrahlwinkel (voller Raumwinkel 4π sr)
- ausgedehnte Quelle

Für eine Beurteilung, ob durch die Strahlung von einer optischen Strahlungsquelle eine Gefährdung ausgeht, ist die Kenntnis über die Zusammensetzung des Spektrums der Quellen bedeutsam. Dabei sind weiterhin neben den Strahlungsgrößen die Dauer der Exposition und die Art, wie die Quelle im beruflichen oder privaten Bereich eingesetzt wird, von Bedeutung.

Beispiele für inkohärente optische Strahlung an Arbeitsplätzen sind:

- Raumbelichtung
- Projektoren, Beamer
- LED-Lampen
- Scheinwerfer für Bühnen- und Baustellenbeleuchtungen
- Belichtungs-, Härtings- und Trocknungsanlagen, Materialprüfungen (UV-Strahler)
- Entkeimungs- und Desinfektionsanlagen
- In der Medizin: UV- bzw. Wärme-Therapie
- Wärmestrahler für Trocknung oder Schmelzung
- Materialbearbeitung (z. B. Plasmastrahler)

An einigen Arbeitsplätzen entsteht inkohärente optische Strahlung als Nebenprodukt von Fertigungsprozessen:

- beim Schweißen
- beim Glühen und Schmieden von Metallen
- bei der Glasbearbeitung

Exemplarisch werden einige Spektren mit inkohärenter Strahlung dargestellt:

3.2.1 Sonnenstrahlung

Die wichtigste natürliche Strahlungsquelle ist die Sonne. Entsprechend der Oberflächentemperatur von ca. 6000 K liegt das Emissionsmaximum bei etwa 500 nm. Die Abbildung 3.5 zeigt die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung. Zu erkennen ist, dass die Sonnenstrahlung neben der sichtbaren Strahlung auch nicht zu vernachlässigende ultraviolette und infrarote Strahlungsanteile enthält.

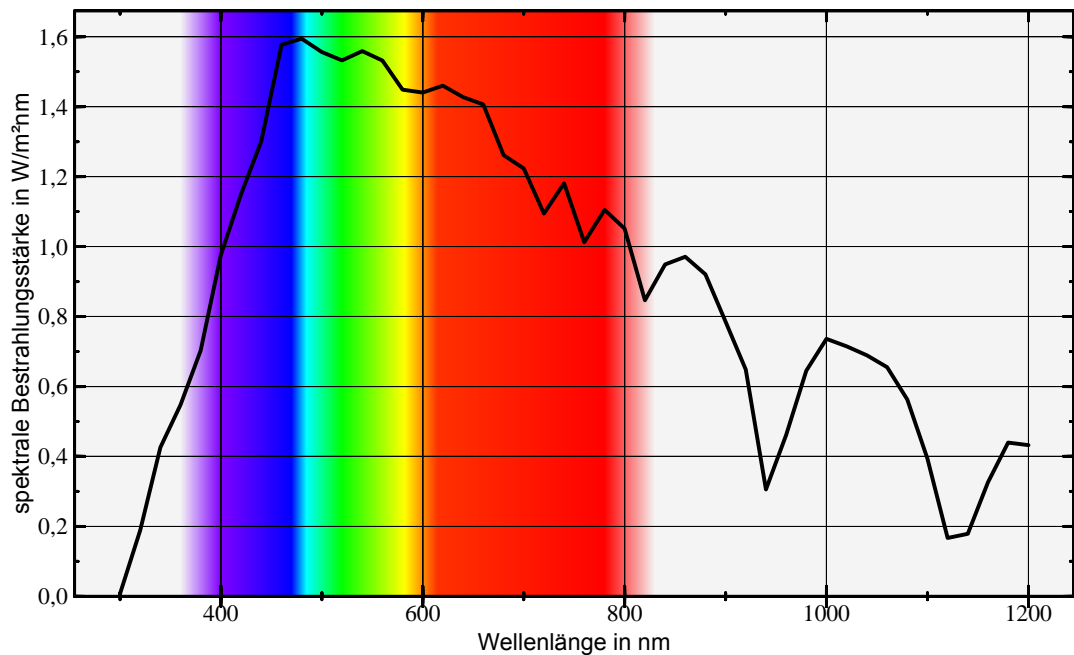


Abb. 3.5 Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung

Ein Großteil der UV-Strahlung wird im Wesentlichen durch die Ozonschicht in der Stratosphäre und Troposphäre absorbiert. Da der Abfall im UV-B-Bereich sehr steil erfolgt, wird dieser als UV-B-Kante bezeichnet. Die Zusammensetzung des Sonnenspektrums wird bestimmt durch den Ozongehalt in der Atmosphäre, Sonnenhöhe, Jahreszeit, Tageszeit, Breitengrad, Bewölkung, Höhenlage und atmosphärische Trübung.

3.2.2 Glühlampen und Halogenglühlampen

Die Glühlampe ist ein klassisches Produkt der künstlichen Temperaturstrahler. Die maximale Temperatur für diesen Strahler wird durch die Schmelztemperatur von 3695 K für die Glühwendel aus Wolfram bestimmt. Üblicherweise werden, je nach Verwendungszweck, Glühlampen im Temperaturbereich von 2400 bis 3450 K betrieben.

Im Wesentlichen entspricht die Halogenglühlampe dem Aufbau einer Glühlampe. Durch die Zugabe eines Halogens, üblicherweise Jod oder Brom, wird eine Schwärzung des Glaskolbens unterdrückt. Dadurch kann die Lampe bei Temperaturen von 3000 K (für die Allgemeinbeleuchtung) bis zu 3500 K (für Spezialanwendungen) betrieben werden. Der kompakte Lampenkolben besteht aufgrund der höheren Lampentemperatur aus Quarzglas. Er sollte für die Allgemeinbeleuchtung mit Zusätzen, die ein Austreten kurzwelliger UV-Strahlung verhindern (UV-Stopp), oder mit einem zusätzlichen Sicherheitsglas ausgeführt sein. Bei Lampen mit hoher Leistung sollte der Einsatz immer mit einem funktionsfähigen Schutzfilter erfolgen.

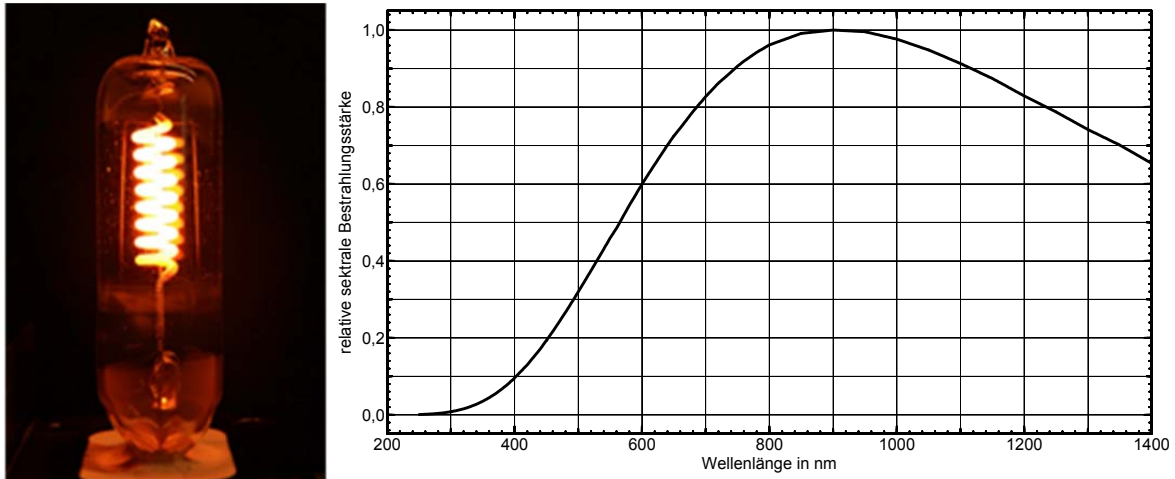


Abb. 3.6 Halogenglühlampen mit Spektrum

Glühlampen und Halogenglühlampen werden für die Allgemeinbeleuchtung, Studio-
beleuchtung, Baustellenbeleuchtung und für einige technische Anwendungen (Sola-
rien, Kalibrierlampen) verwendet. Die Spektren der Lampen haben neben der UV-
Strahlung starke Anteile an sichtbarer und an Infrarot-Strahlung.

3.2.3 LED

Bei den künstlichen inkohärenten Strahlungsquellen gewinnen Leuchtdioden, kurz
LED (engl. light-emitting diode), rasant an Bedeutung. Bei einer farbigen LED ist ein
schmalbandiges Spektrum charakteristisch, mit spektralen Bandbreiten von 15 bis
35 nm.

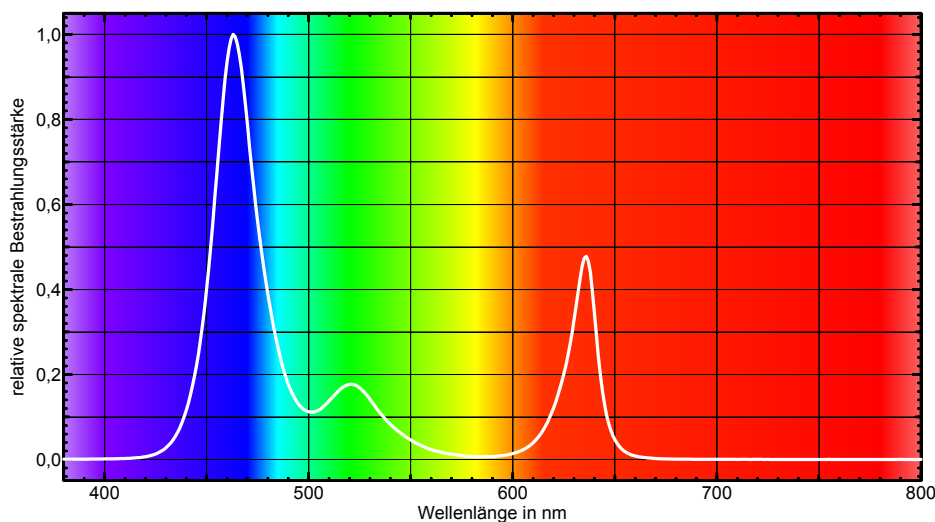


Abb. 3.7 Spektrum einer RGB³-LED

Bei RGB-LED kann mittels der drei Grundfarben nahezu jede beliebige Farbe ge-
mischt werden. Hierzu bedarf es einer Steuerungselektronik.

³ RGB: Rot Grün Blau

Die Strahlung einer weißen LED wird überwiegend durch Kombination von einer blau emittierenden LED mit fluoreszierenden Lumineszenzfarbstoffen erreicht (s. Abb. 3.8). Das Spektrum der weißen LED setzt sich dementsprechend aus einem breiten Spektralbereich des Leuchtstoffes und einem schmalbandigen blauen Strahlungsanteil zusammen.

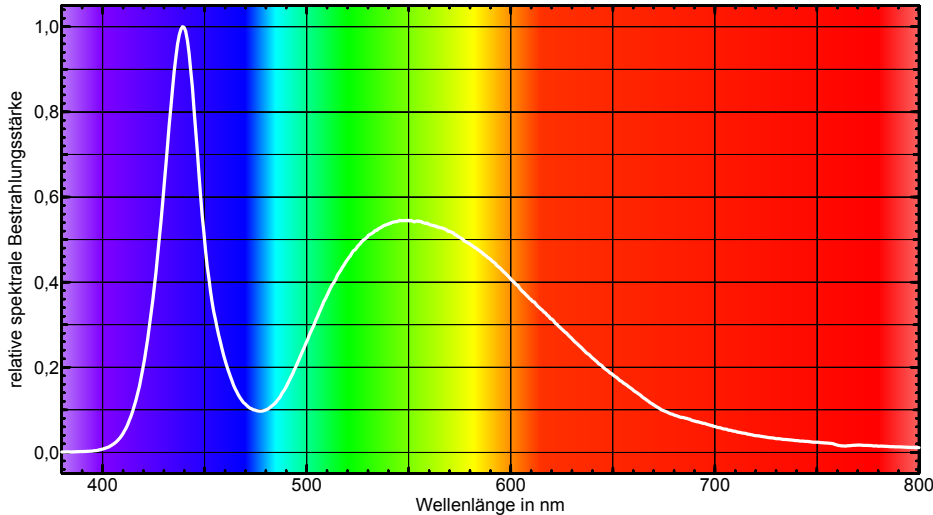


Abb. 3.8 Spektrum einer weißen LED

3.2.4 Quecksilberniederdruck-Lampe

Die Quecksilberniederdruckgasentladungslampe gehört zu der Gruppe der Gasentladungsstrahler. Aufgrund ihrer nahezu optimalen Eigenschaften, im Hinblick auf hohe UV-Intensität, stellt sie eine bedeutsame technische Strahlungsquelle für UV-Anwendungen dar. Die Anregung der Dampf- bzw. Gasmoleküle erfolgt über den Elektronenstoß. Charakteristisch für diese Lampe ist, dass sie ein Spektrum mit starken Emissionslinien aufzeigt, die kennzeichnend für die Zusammensetzung der Gasfüllung sind. Markante und energiereiche Linien einer Quecksilberniederdruckdampflampe liegen bei 254 nm und bei 365/366 nm (Doppellinie). Bei einer Hochdruckentladung ist die Intensität der 254 nm-Linie im Vergleich zur Niederdrucklampe geringer. Es treten weitere Linien im UV-Bereich auf, die stark verbreitert und je nach Gasdruck mit einem schwachen Kontinuum unterlegt sind. Abbildung 3.9 zeigt eine Quecksilberniederdruckgasentladungslampe, die als Hand-Desinfektions-Lampe ausgeführt ist.



Abb. 3.9 Quecksilberniederdruckgasentladungslampe, ausgeführt als Hand-Desinfektions-Lampe

Das typische Spektrum einer Quecksilberniederdruckgasentladungslampe ist in Abbildung 3.10 dargestellt, wobei bei der linearen Darstellung nur die 254 nm-Linie zu erkennen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die 254 nm-Linie im Vergleich zu den anderen Linien sehr groß ist. Dass dieser Lampentyp über weitere Linien verfügt, wird erst durch die logarithmische Darstellung erkennbar (s. Abb. 3.11). Bei einer Bewertung mit biologischen Wirkungskurven wird deutlich, dass diese Strahlungsanteile nicht zu vernachlässigen sind.

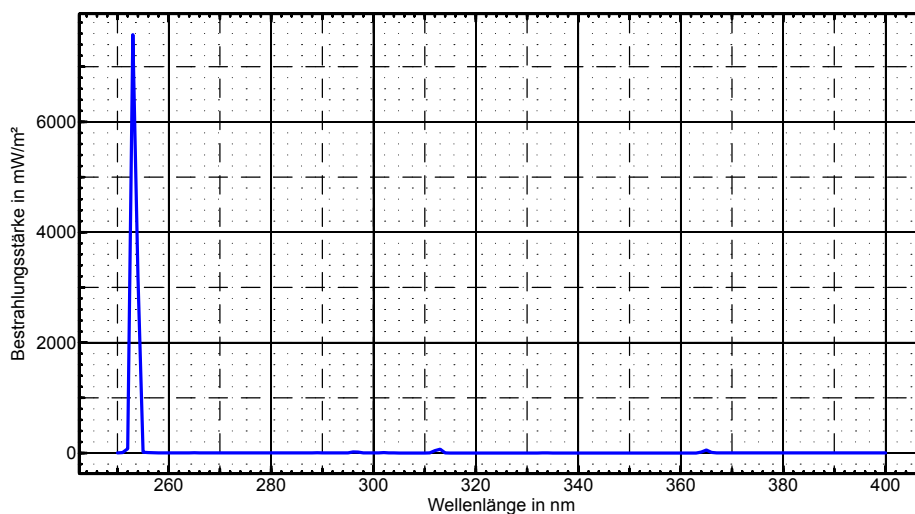


Abb. 3.10 Lineare Darstellung eines Spektrums einer Quecksilberniederdruckgasentladungslampe

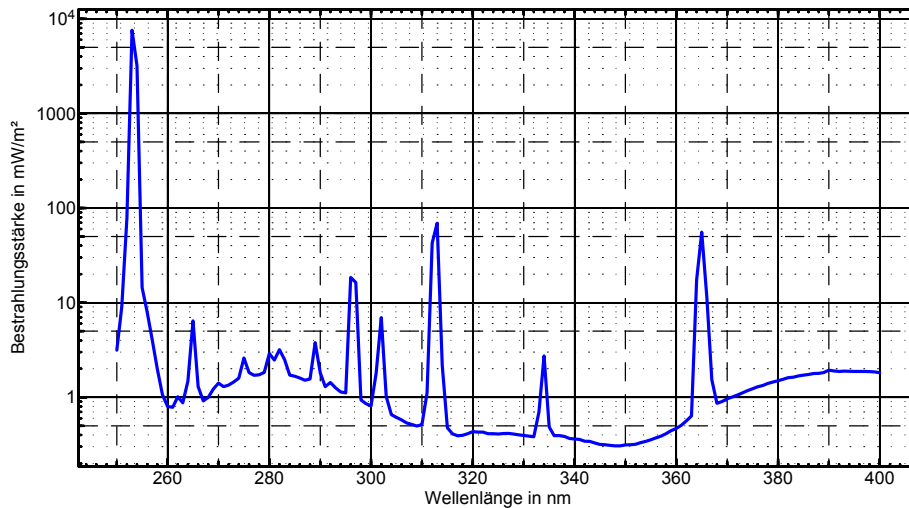


Abb. 3.11 Logarithmische Darstellung eines Spektrums einer Quecksilberniederdruckgasentladungslampe

3.2.5 Schweißlichtbögen

Beim Schweißen tritt Strahlung als unerwünschter Nebeneffekt als eine Art Störstrahlung auf. Die Gefährdung hinsichtlich der Strahlung bezieht sich auf die meist intensiven Anteile der UV-Strahlung und auf die Anteile im sichtbaren und IR-Bereich. Die Schweißlichtbögen beim Elektroschweißen sind von höchster Intensität und können bereits in wenigen Sekunden zu einer Überschreitung der Grenzwerte führen. Die Spektren bei den vielfältigen Verfahren sind abhängig von den Werkstoffen, dem Material der verwendeten Elektrode und dem Einsatz von Schutzgasen.

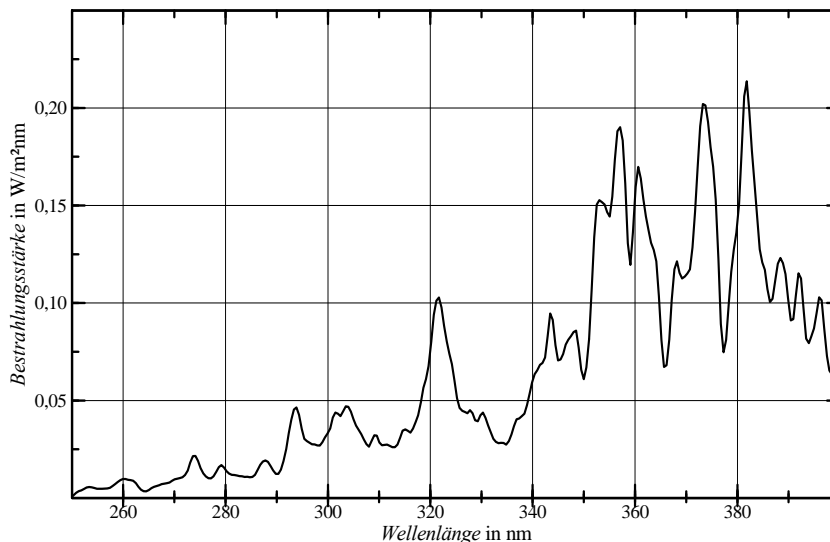


Abb. 3.12 Spektrale Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen von STE 890-Stahl bei einem Strom von 266 A

Die Zusammensetzung der Spektren ist sehr unterschiedlich und zeigt ein meist schwaches Kontinuum mit zahlreichen stark überlagerten Emissionslinien

(s. Abb. 3.12). Die UV-Strahlung kann erheblich sein mit einer hohen Gefahr für die Schädigung von Haut und Auge.

3.2.6 Strahlung bei der Glasbearbeitung

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass bei Glasmachern, nach langjähriger Einwirkung der Strahlung auf das Auge beim Hineinschauen in weiß bis hellrot glühende Glasmassen, eine Trübung der Linse (Grauer Star) auftreten kann. Die Strahlung aus dem Infrarot-Bereich wurde hierfür verantwortlich gemacht. Präventionsmaßnahmen haben bewirkt, dass dieses Krankheitsbild heute arbeitsbedingt kaum noch auftritt.

Neuere Erkenntnisse zeigen, dass bei der Produktion und Verarbeitung von Glas auch UV-Strahlung auftritt. Bei der Beurteilung der Gefährdung von Strahlung nach der OStrV ist dies zu berücksichtigen. Betroffen sind alle heißen Flammen, die im unmittelbaren Arbeitsbereich der Beschäftigten auftreten. Dies sind hauptsächlich Tischbrenner der Glasapparatemacher und Glasbläser, Handbrenner der Quarzglasapparatemacher, Maschinenbrenner an Glasdrehmaschinen und Flampolieranlagen in der Hohlglasindustrie.

Bei den verschiedenen Brennern zur Glasbearbeitung treten Temperaturen von $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $2900\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Durch exemplarische Messungen wurden je nach Arbeitsverfahren zulässige Aufenthaltszeiten im Bereich von 150 s bis 7900 s ermittelt.

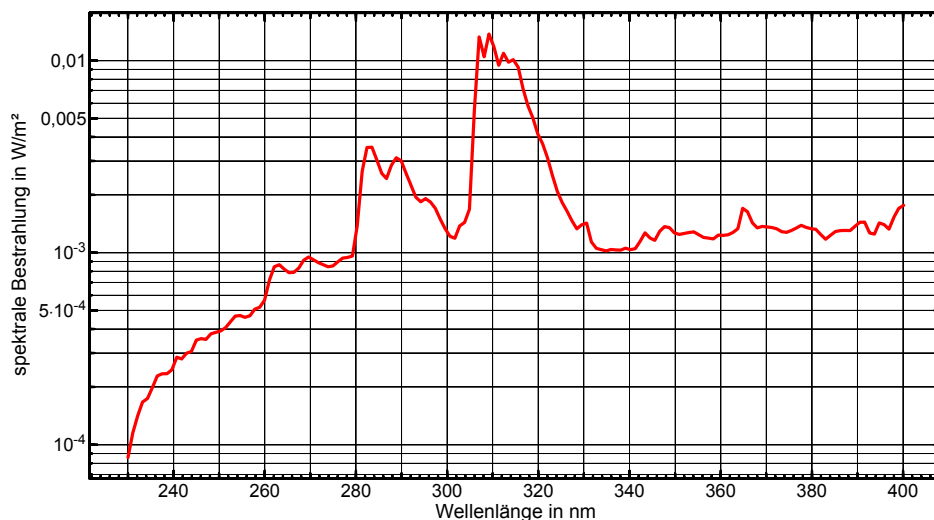


Abb. 3.13 UV-Spektrum eines mit Erdgas betriebenen Tischbrenners

Abbildung 3.13 zeigt das Spektrum eines Tischbrenners, der mit Erdgas betrieben wird. Der Messabstand betrug 30 cm. Der Grenzwert für UV-Strahlung wurde nach 1700 s überschritten [25].

3.3 Biologische Wirkungen

Die Wirkung inkohärenter optischer Strahlung ist im Wesentlichen auf die Augen und die Haut begrenzt. Die inneren Organe sind nicht gefährdet.

Bei den schädigenden biologischen Wirkungen ist zu unterscheiden, ob die Einwirkung der Strahlung auf die Haut oder auf das Auge erfolgt. Weiterhin ist zwischen

akuten und chronischen Schädigungen zu differenzieren. Art und Schwere einer durch optische Strahlung hervorgerufenen Schädigung sind von der Wellenlänge, der Bestrahlungsstärke, gegebenenfalls der Strahldichte sowie der Bestrahlungsdauer abhängig. Die verschiedenen biologischen Effekte werden durch biologische Wirkungsspektren beschrieben [24], d.h. je nach Gefährdung/Wirkungsmechanismus wird die Strahlung bei unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich gewichtet. Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors bilden die biologischen Wirkungsfunktionen die Grundlage für Expositionsgrenzwerte, wie sie in der EU-RL 2006/25/EG über „Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“ festgelegt sind.

In Tabelle 3.3 sind die unterschiedlichen Schädigungsmöglichkeiten für das Auge und für die Haut dargestellt. Als einzige positive Auswirkung auf die Haut ist die Vitamin-D-Bildung bei UV-Strahlung zu nennen.

Von Strahlungsquellen mit einem hohen Blaulichtanteil können, neben den gesundheitlichen Auswirkungen, auch eine zirkadiane (melanopische) Wirkung hervorgerufen werden. Dies bedeutet, dass durch die verursachte Melatoninunterdrückung die biologische Uhr (Tag-und-Nacht-Rhythmus) beeinflusst werden kann. Dieser Effekt wird z. Z. noch erforscht und ist daher nicht Bestandteil dieses Berichtes.

Tab. 3.3 Negative Wirkungen optischer Strahlung auf Auge und Haut

| Spektralbereich | Auge | Haut |
|-------------------------------------|--|--|
| UV-C 100 nm bis 280 nm | Photokeratitis und Photokonjunktivitis (Horn- und Bindehautentzündung) | Erythem (Sonnenbrand), Präkanzerose, Karzinome |
| UV-B 280 nm bis 315 nm | Photokeratitis und Photokonjunktivitis, Kataraktbildung (Grauer Star) | Beschleunigte Prozesse der Hautalterung, Erythem, Präkanzerosen, Karzinome |
| UV-A 315 nm bis 400 nm | Kataraktbildung | Beschleunigte Prozesse der Hautalterung, Erythem, Karzinome |
| Sichtbar (VIS) 380 nm bis 780 nm | Verletzung der Netzhaut | Verbrennungen |
| IR-A 780 nm bis 1400 nm | Linsentrübung, Verletzung der Netzhaut | Verbrennungen |
| IR-B 1400 nm bis 3000 nm | Linsentrübung, Verbrennung der Hornhaut | Verbrennungen |
| IR-C 3000 nm bis 1 mm | Verbrennung der Hornhaut | Verbrennungen |

3.3.1 Auswirkungen auf das Auge

Das am meisten gefährdete Organ beim Umgang mit optischer Strahlung ist das Auge.

3.3.2 Wirkung von UV-Strahlung auf das Auge

Die auf das Auge einwirkende UV-Strahlung wird je nach Wellenlänge von der Hornhaut oder der Augenlinse absorbiert. Dies erfolgt bei Strahlung aus dem UV-A-Bereich hauptsächlich in der Augenlinse (Abb. 3.14).

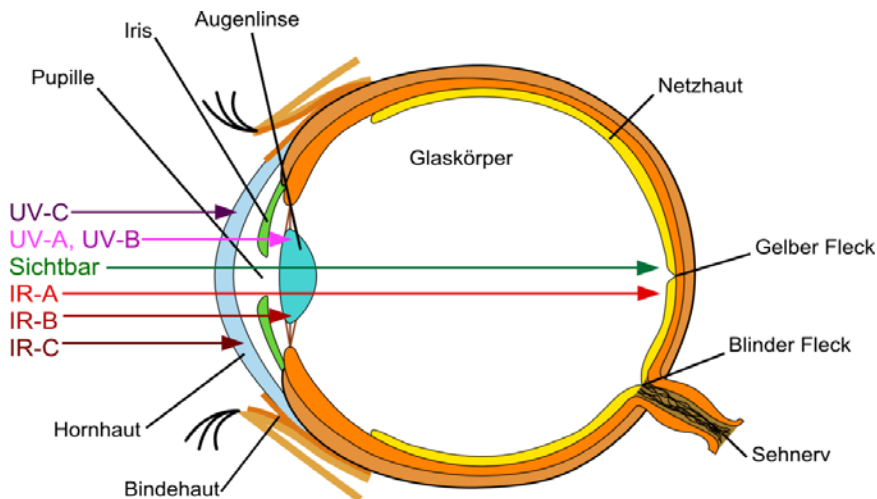


Abb. 3.14 Eindringtiefe optischer Strahlung in das Auge

Durch Strahlung im UV-B- und UV-C-Bereich kann am Auge eine Entzündung der Hornhaut (Photokeratitis) und Bindehaut (Photokonjunktivitis) entstehen. Diese Entzündungen werden auch als Verblitzen der Augen, Schweißblindheit oder Schneeblindheit bezeichnet. In Abbildung 3.15 ist die spektrale Wirksamkeit für die Entzündung der Hornhaut und der Bindehaut beispielhaft dargestellt. Die Symptome treten in der Regel erst fünf bis zehn Stunden nach der Bestrahlung auf und reichen von leichten Augenreizungen bis zu starken Augenschmerzen. Die Entzündungen sind in der Regel nach ein bis drei Tagen wieder abgeklungen [23].

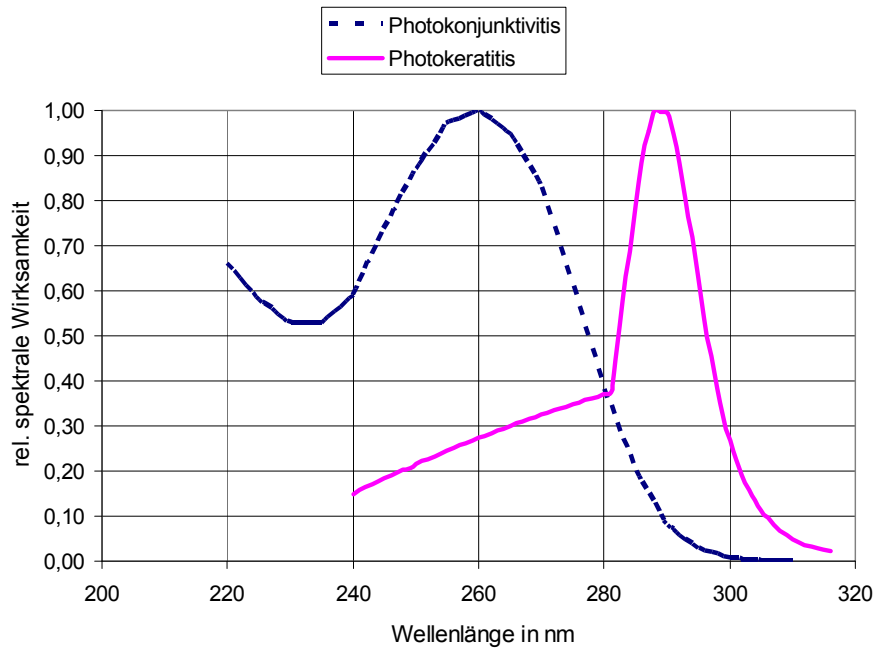


Abb. 3.15 Spektrale Wirksamkeit für die Entzündung der Hornhaut und der Bindehaut

Nach langjähriger Einwirkung von UV-A-Strahlung kann eine Katarakt (Grauer Star) entstehen. Hierbei handelt es sich um eine Trübung der Augenlinse [6].

3.3.3 Wirkung von sichtbarer und IR-Strahlung auf das Auge

Das Sehvermögen ist auf den Spektralbereich 380 nm bis 780 nm begrenzt. Es kann jedoch Strahlung im Bereich von etwa 350 nm bis 1 400 nm bis zur Netzhaut vordringen [27]. Strahlung außerhalb dieses Bereiches wird durch die Hornhaut und die Augenlinse absorbiert. Netzhautschädigungen sind besonders schwerwiegend und können zu erheblichen Beeinträchtigungen des Sehvermögens führen und sind irreversibel.

Im sichtbaren Bereich wird zwischen den thermischen und den photochemischen Netzhautschäden unterschieden.

Die thermische Schädigung dominiert im langwelligen Teil des sichtbaren Spektrums und im IR-Spektralbereich. Sie beruht auf der Überhitzung der Netzhaut durch Absorption der auftreffenden Strahlung. Welche Auswirkung die Temperaturerhöhung auf das Gewebe hat, hängt von der erreichten Temperatur ab. Voraussetzung für eine irreversible Schädigung (z. B. Gerinnung von Eiweiß) ist das Überschreiten einer kritischen Temperatur. Die Schädigung erfolgt in der Regel unmittelbar, d.h. die dafür notwendigen Einwirkzeiten sind sehr kurz. Bei LED sind derzeit die Leistungen nicht ausreichend, um thermische Netzhautschäden hervorrufen zu können [28].

In Abbildung 3.16 ist die relative spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautschädigung dargestellt.

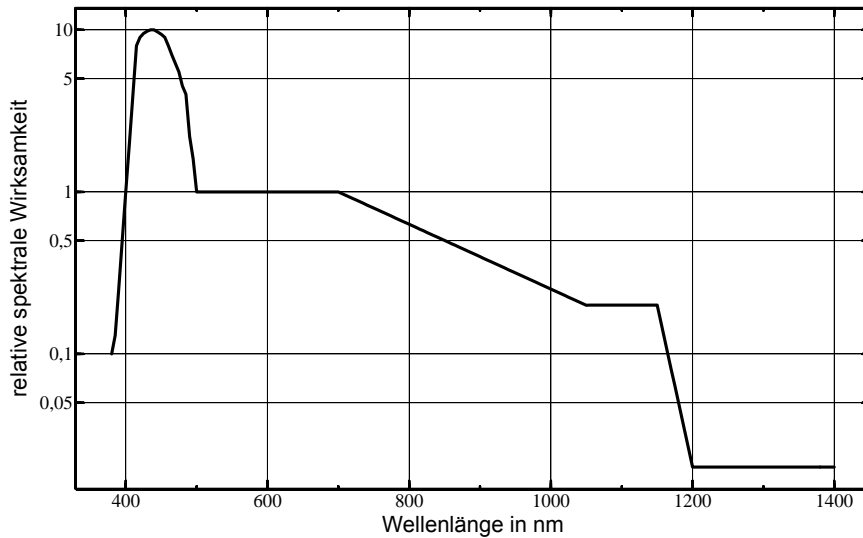


Abb. 3.16 Relative spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautschädigung

Bei der photochemischen Schädigung wird die Energie der einfallenden optischen Strahlung nicht in Wärme, sondern in chemische Reaktionsenergie umgesetzt. Diese Effekte dominieren bei ausreichender Photonenenergie, d. h. vor allem für optische Strahlung im UV- und kurzwelligem sichtbaren Spektralbereich. Das Maximum der Wirksamkeit im Spektralbereich von 300 nm bis 700 nm liegt im blauen Bereich und wird daher auch Blaulichtgefährdung (engl. Blue-Light-Hazard) genannt.

Für eine Schädigung bedarf es gegenüber dem thermischen Wirkmechanismus einer längeren Einwirkdauer (länger als 10 Sekunden). Photochemische Schädigungen können zum Beispiel als Folge nach zu langem Starren in die Sonne oder nach Beobachten eines Schweißplasmas mit dem ungeschützten Auge auftreten. Diese Veränderungen sind kumulativ. In Abbildung 3.17 ist die relative spektrale Wirksamkeit zur photochemischen Netzhautschädigung dargestellt.

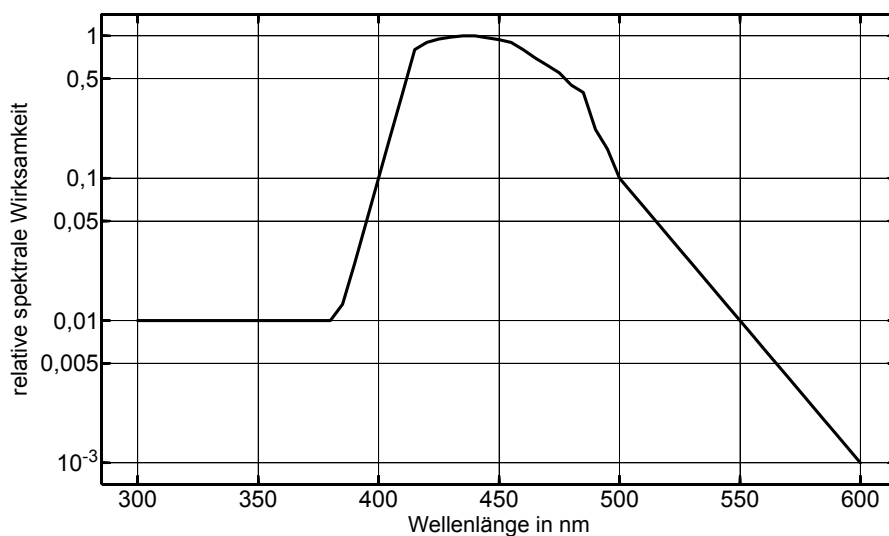


Abb. 3.17 Relative spektrale Wirksamkeit zur photochemischen Netzhautschädigung

Nach einer langjährigen Einwirkung von IR-Strahlung kann eine Linsentrübung (Katarakt) auftreten. Diese Schädigung ist irreversibel und kann zur vollständigen Erblindung führen [30].

3.3.4 Indirekte Auswirkungen inkohärenter optischer Strahlung

Strahlung aus dem sichtbaren Spektralbereich kann unterhalb der Schädigungsgrenze durch eine vorübergehende Blendung ein hohes sekundäres Gefahrenpotenzial besitzen. Nach dem Blick in eine helle, grelle Lichtquelle, z. B. Scheinwerfer oder Projektor, können temporär eingeschränktes Sehvermögen und Nachbilder je nach Situation zu Irritationen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und sogar zu Unfällen führen. Auch Stroboskopeffekte können zu Gefährdungen führen. Beispielsweise können bewegte Maschinenteile dadurch nicht mehr als solche erkannt werden.

Solche indirekten Auswirkungen sind nach der OStrV bei der Beurteilung der Gefährdungen zu berücksichtigen.

3.3.5 Auswirkungen auf die Haut

Das Hautgewebe besteht im Wesentlichen aus Wasser. In Abbildung 3.18 ist das Eindringvermögen von Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge in die Haut dargestellt. Die Pfeilstärke weist auf die Abnahme der Strahlung mit der Tiefe im Gewebe hin. UV-A-Strahlung kann noch einige Millimeter in die Haut eindringen, während UV-C-Strahlung bereits in der Oberhaut absorbiert wird. Die Strahlung aus dem IR-A-Spektralbereich kann sehr tief in die Haut eindringen, während IR-B- und IR-C-Strahlung bereits in der Oberhaut absorbiert wird.

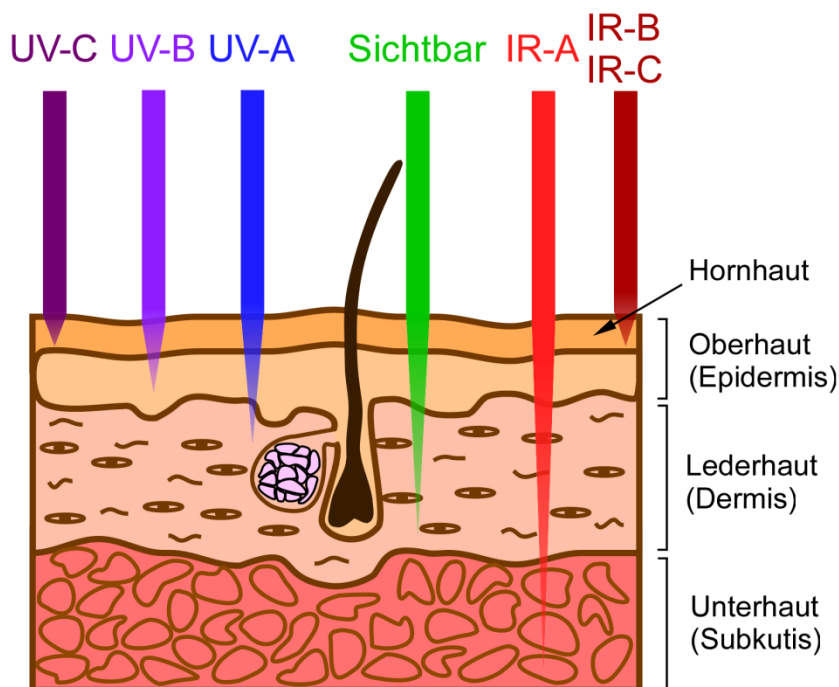


Abb. 3.18 Wellenlängenabhängigkeit des Eindringvermögens von Strahlung in die Haut

3.3.6 Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut

Die wichtigste akute biologische Wirkung der UV-B- und UV-C-Strahlung ist die Erythembildung (Sonnenbrand s. Abbildung 3.19). Die Symptome treten je nach Hauttyp und Höhe der Exposition in der Regel zwei bis acht Stunden nach der Bestrahlung auf und können sich als schwache Rötung der Haut bis hin zur Blasenbildung mit starken Schmerzen zeigen. Nach drei bis vier Tagen ist in der Regel ein Nachlassen der Rötung festzustellen [31].

Die UV-Strahlung ist nach IARC (International Agency for Research on Cancer) als krebserzeugend eingestuft [32]. Wie viel UV-Strahlung die Haut verträgt, ist sehr individuell und von der Wellenlänge abhängig. Die Haut addiert jede Einwirkung von natürlichen und künstlichen UV-Strahlungsquellen, sowohl aus dem beruflichen Bereich als auch jedes Sonnenbad in der Freizeit und jeden Besuch im Solarium.

Hinweis:

Wie bei vielen Krebsarten ist die Früherkennung auch beim Hautkrebs ein wesentlicher Punkt für einen guten Heilungserfolg.

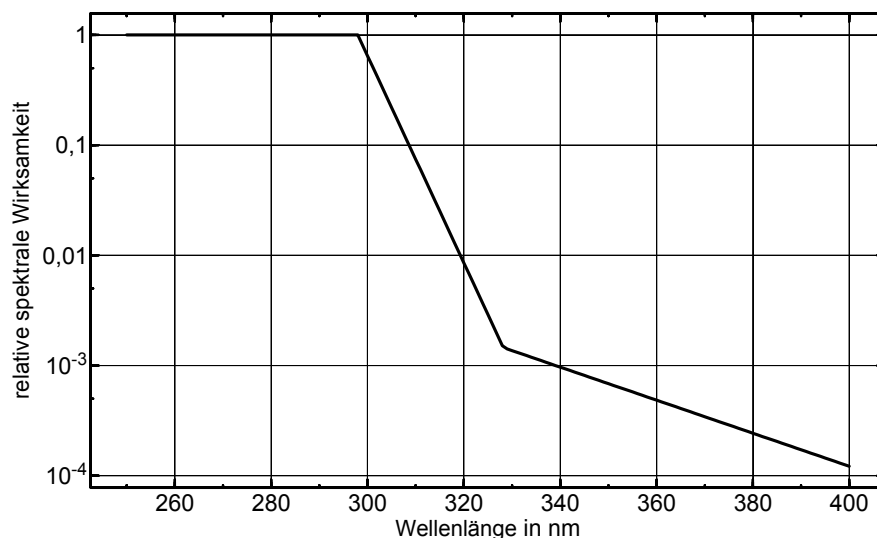


Abb. 3.19 Relative spektrale Wirksamkeit zur Bildung des Erythems [21]

Unter Berücksichtigung der relativen spektralen Wirkungsfunktionen für Auge und Haut (Abbildungen 3.17 und 3.19) werden inkohärente optische Strahlungsquellen im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 400 nm nach einer gemeinsamen Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ (Abb. 3.20) bewertet.

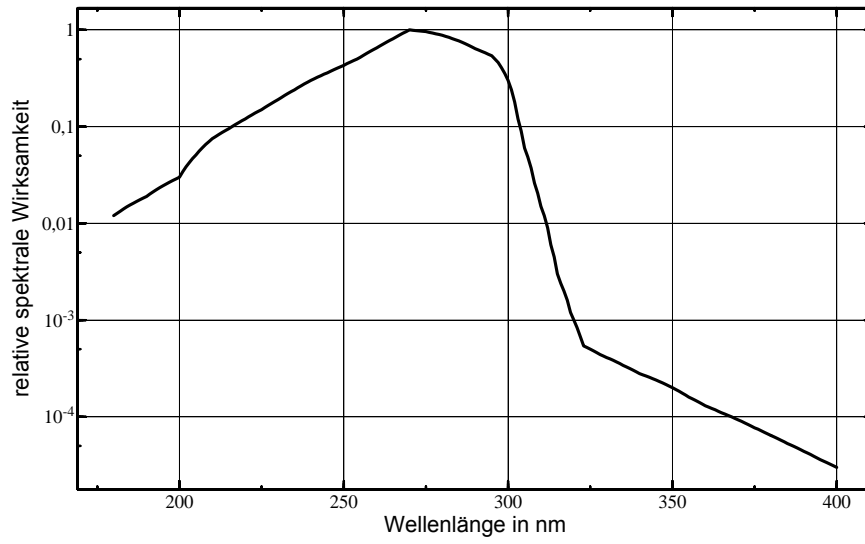


Abb. 3.20 Relative Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ für Auge und Haut

4 Messverfahren und Messgeräte

Um ein geeignetes Messverfahren, die erforderlichen Messgeräte und das Vorgehen bei der Messung festlegen zu können, sind umfangreiche Vorüberlegungen erforderlich. Zunächst ist zu klären, ob eine Arbeitsplatzbewertung oder eine Bewertung von Strahlungsquellen erfolgen soll. Weiterhin ist zu berücksichtigen, welche Art von Strahlungsquelle vorliegt und welche Strahlungsgröße zu bewerten ist. Für welche Messgrößen die Expositionen zu ermitteln sind, ergibt sich aus der Analyse der Arbeitsaufgabe, dem Strahlungsspektrum und aus der Art der Gefährdung. Es ist festzustellen, ob die personenbezogene Exposition mit Hilfe stationärer Messgeräte ermittelt werden kann oder ob Messgeräte eingesetzt werden müssen, die von den Exponierten am Körper getragen werden. Weiterhin ist zu prüfen, ob die Erfassung aller notwendigen Daten mit einem Messgerät erfolgen kann oder die Messung mit mehreren Messgeräten durchgeführt werden muss.

Die Praxis hat gezeigt, dass viele Hersteller in ihren Prospekten Messbereiche und Genauigkeiten angeben, die bei praktischen Messungen nicht bestätigt werden konnten. Es ist zwar wünschenswert mit einem Messgerät einen möglichst großen Spektralbereich abzudecken, jedoch entstehen schnell physikalische Grenzen. So ist z. B. für ein UV-Diodenspektrometer nachteilig, wenn der Anwendungsbereich auf den sichtbaren- und nahen IR-Bereich ausgedehnt ist. Dies geht in der Regel zu Lasten der Messdynamik und einem erhöhten Falschlichtanteil im UV-Bereich.

Je nach Messverfahren und Qualität liegen die Preise zwischen 500 € und über 100.000 €.

Bei den Messverfahren wird im Wesentlichen zwischen dem Spektralverfahren und dem Integralverfahren unterschieden. Das geeignete Messverfahren ist entsprechend dem Einsatzbereich und den Anforderungen an das Messergebnis auszuwählen.

Zusätzlich sind gerätespezifische Anforderungen zu berücksichtigen. Wesentliche Auswahlkriterien sind:

- Eignung für die vorherrschenden Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Staub, elektromagnetische Felder, etc.)
- Messbereich
- Hinreichende Empfindlichkeit
- Empfängerfläche und Apertur angepasst an die Messaufgabe
- Kalibrierung des Systems
- Öffnungswinkel und die Winkelabhängigkeit der Eingangsoptik
- Zeitliche Bewertung der Strahlungsgröße (Mittelungsdauer, Integrationsdauer, Pulsbewertung)
- Bandbreite und Schrittweite
- Streulicht

Die Messunsicherheit ist eine der wichtigsten Anforderungen. Wird für eine Beurteilung der Gefährdung ein Vergleich mit einem Grenzwert benötigt, wird eine Messunsicherheit von $\leq 30\%$ für das Verfahren empfohlen. Dabei ist zu beachten, dass für Messungen im optischen Spektralbereich diese Forderung nur von hochwertigen Ge-

räten erfüllt werden kann. Für Übersichtsmessungen sind die Anforderungen nicht so hoch. Jedoch sollte hierfür eine Messunsicherheit $\leq 50\%$ eingehalten werden [20].

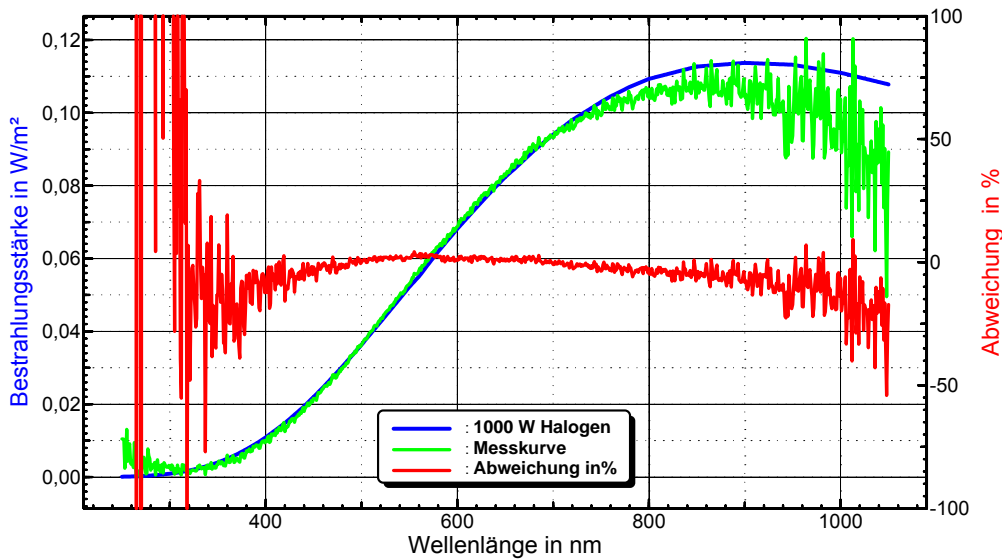


Abb. 4.1 Spektrale Messwertabweichung eines sehr kompakten Array-Spektrometers

Der optimale Einsatzbereich wird meistens erst durch die Vermessung einer Strahlungsquelle mit bekannten Emissionsdaten (s. Abbildung 4.1, blaue Kurve Spektrum einer 100W Halogenlampe) ersichtlich. Die Stärken des in Abb. 4.1 vermessenen Systems liegen im sichtbaren Bereich, während im UV- und nahen infraroten-Bereich das Signal stark verrauscht ist (grüne Kurve). Laut Herstellerangaben soll dieses Gerät aber auch zum Messen von UV-Strahlung geeignet sein, was durch diese Überprüfung nicht bestätigt werden konnte. Mit der roten Kurve wird die hohe Abweichung (größer 50 %) der Messkurve zum Spektrum der Kalibrierlampe gezeigt.

4.1 Spektralverfahren

Das Spektralverfahren ist ein grundlegendes Verfahren, bei dem mit Hilfe eines Spektralradiometers die spektrale Bestrahlungsstärke bzw. die spektrale Strahldichte in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen wird. Für einen Vergleich mit Grenzwerten sind die Rohdaten mit den Wirkungsspektren zu bewerten.

Die wesentlichen Komponenten eines Spektralradiometers sind:

- Eingangsoptik
Streuscheibe (Diffusor), Ulbrichtkugel, Lichtwellenleiter
- Spektralapparat
- Empfänger
Messung einzelner Wellenlängen: PMT-Empfänger, Si- oder InGaS-Detektor
Messung von Spektralbereichen: Photodioden- oder CCD-Array
- Erfassungs- und Auswerteeinheit
Messverstärker mit Anzeigeeinheit oder Computer

Bei den Spektralradiometern sind zwei Ausführungen zu unterscheiden. Befindet sich am Ausgang ein Detektor, z. B. eine Diode oder ein hochempfindlicher Photomultiplier, erfolgt eine Abtastung der Wellenlänge Schritt für Schritt. Soll ein definierter Spektralbereich in kurzer Zeit erfasst werden, wird ein Spektrometer mit einem Photodioden- oder CCD-Array benötigt.

In der Abbildung 4.2 wird ein Spektrometer gezeigt, das je nach Stellung des Klappspiegels Spektralbereiche (Diodenarray) oder einzelne Wellenlängen (Monochromator) messen kann. Mit dem drehbaren Gitterspiegel können die Spektralbereiche bzw. Wellenlängen gewählt werden.

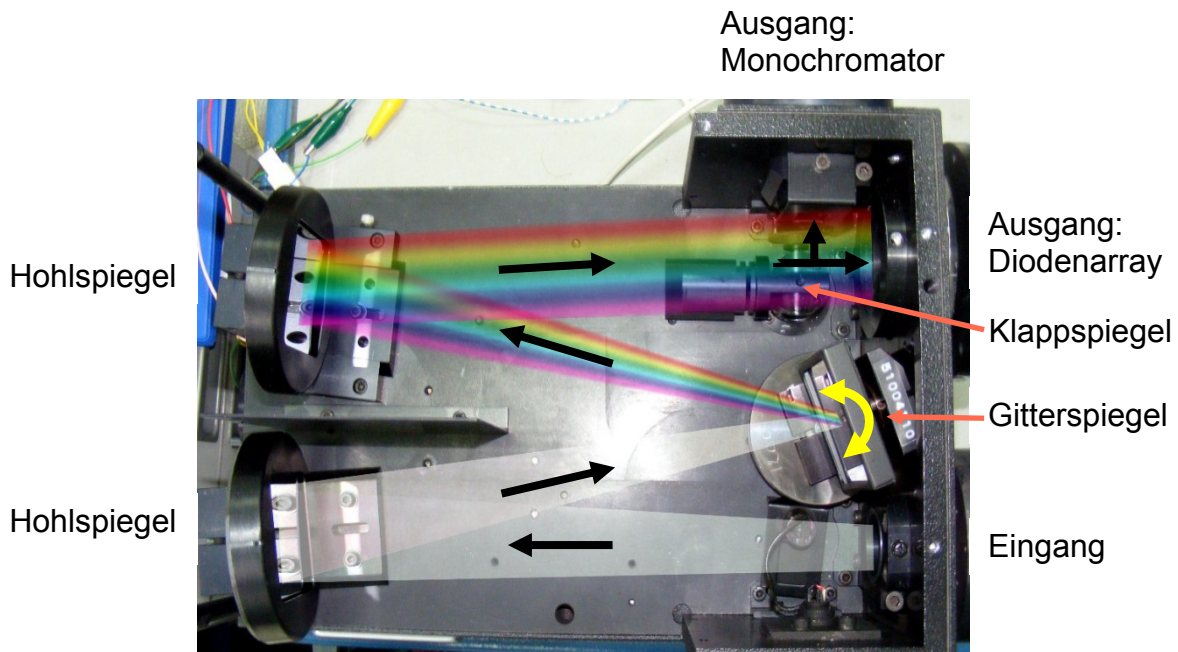


Abb. 4.2 Strahlenverlauf in einem Spektralradiometer

4.1.1 Monochromator mit Detektor zur schrittweisen Abtastung der Wellenlänge

Bei diesem Gerätetyp wird ein vorgegebener Spektralbereich in diskreten Schritten abgetastet. Ein Spektralradiometer kann als Einfach-Monochromator oder als Dop-

pelmonochromator ausgeführt sein. Beim Doppelmonochromator ist ein zweiter Monochromator nachgeschaltet.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Ausführungen liegt bei der Streulichtunterdrückung. Streulicht ist der Strahlungsanteil, der als Falschlicht von außerhalb der Messung gelegenen Wellenlängenbereichen stammt. Während bei einem Einfachmonochromator die Streulichtunterdrückung bei 10^{-4} (entspricht einem Signal-Rausch-Verhältnis von 10^4) liegt, ist sie beim Doppelmonochromator mit 10^{-8} deutlich besser. Insbesondere bei Messungen im UV-Bereich mit geringen Strahlungsanteilen im UV- und hohen Anteilen im sichtbaren und IR-Bereich ist zur Unterdrückung der Falschlichtanteile die Verwendung eines Doppelmonochromators zu empfehlen. Bei Verwendung eines Einfachmonochromators können die Falschlichtanteile zur einer Überbewertung der Exposition führen.

Vorteile:

- Messungen mit hoher Präzision bei zeitlich nicht veränderlichen Bestrahlungsstärken möglich
- genaue Gewichtung bei Bewertung mit Wirkungsspektren

Nachteile:

- lange Messzeit
- nicht für Messung von Quellen mit zeitveränderlichen Bestrahlungsstärken geeignet

4.1.2 Spektralradiometer mit Array-Detektor

Bei diesem Gerätetyp ist in einem Spektrometer ein Gitter in der Regel fest positioniert und die Strahlung wird breitbandig auf ein Feld von Detektoren (z. B. auf einem Fotodioden- oder CCD-Array) abgebildet. Dabei ist jeder Detektor einer bestimmten Wellenlänge zugeordnet. Da bei dem Spektralradiometertyp keine mechanische Abtastbewegung erforderlich ist, kann in sehr kurzer Zeit (Millisekunden) ein komplettes Spektrum aufgenommen werden. Somit ist das Messgerät für die Messung von Quellen mit zeitveränderlichen Bestrahlungsstärken geeignet.

Vorteile:

- schnell, daher geeignet zur Bewertung von Quellen mit zeitveränderlichen Bestrahlungsstärken
- kompaktes System

Nachteile:

- eingeschränkte Messempfindlichkeit
- höhere Falschlichtanteile im Vergleich zum Doppelmonochromator
- je kleiner die Systeme sind, desto höher sind in der Regel die Messunsicherheiten

Mit dem spektralen Verfahren ist neben der Messung der Bestrahlungsstärke die Messung der spektralen Strahldichte möglich. Hierzu ist die Begrenzung des Empfangswinkels („Blickwinkel“) erforderlich. Dies erfolgt durch einen Strahldichtevorsatz

(s. Abbildung 4.3). Durch das Okular des Vorsatzes wird der zu messende Bereich anvisiert.

Anmerkung: Da durch das Okular direkt in die Strahlungsquelle geblickt wird, ist bei starken Quellen auf ausreichenden Augenschutz zu achten.



Abb. 4.3 Monochromator mit Strahldichtevorsatz

4.2 Integralverfahren

Im Gegensatz zum Spektralverfahren wird beim Integralverfahren ein Messergebnis für einen Spektralbereich ermittelt und direkt angezeigt. Die Anpassung an einen definierten Spektralbereich oder an eine Bewertungsfunktion wird durch die Auswahl von geeigneten Filtern und einen Detektor mit selektiver spektraler Empfindlichkeit erreicht. Diese Anpassung durch Filter ist insbesondere bei der Nachbildung von steilen Wirkungskurven schwierig und kann mit einem erhöhten Messfehler verbunden sein.

Die Messgeräte können als stationäre Messgeräte ausgeführt oder aufgrund der möglichen kompakten Ausführung als Personendosimeter am Körper getragen werden.

4.2.1 Integralradiometer mit selektiver Empfindlichkeit

Ein Radiometer mit selektiver spektraler Empfindlichkeit besteht aus (s. Abbildung 4.4):

- Messkopf mit Eingangsoptik
- Filter oder Filterkombination
- Detektor
- Auswerteeinheit mit Anzeige



Abb. 4.4 Integral-Messkopf mit Bedien- und Anzeigeeinheit

Der apparative Aufwand ist beim Integralverfahren wesentlich geringer und die Handhabung sowie Auswertung einfacher als beim Spektralverfahren. Für Übersichtsmessungen am Arbeitsplatz sind sie daher oft besser geeignet.

Bei einigen kommerziellen Messsystemen sind die Messungenauigkeiten jedoch sehr groß. Bei bekannten Strahlungsquellen können systematische Messabweichungen durch einen Korrekturfaktor, der vom Hersteller für verschiedene Strahlungsquellen ermittelt worden ist, verringert werden.

Bei Strahlung im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1400 nm erfolgt eine Abbildung auf der Netzhaut im Auge und es können photochemische und thermische Schädigungen an der Netzhaut auftreten. Zur Beurteilung dieser Strahlung kann ein integrales Messsystem zur Ermittlung der effektiven Strahldichte eingesetzt werden (Abb. 4.5). Über ein fokussierbares Objektiv kann über einen optischen Sucher mit Fadenkreuz der Messort präzise angepeilt und scharf gestellt werden. Durch verschiedene Blenden ist ein Blickfeld von 1,7 mrad, 11 mrad und 100 mrad einstellbar. Mit der Anpassung der Messköpfe an die photochemische und thermische Bewertungsfunktion kann der Messwert direkt abgelesen werden.



Abb. 4.5 Integralmesssystem für Strahldichte

Vorteile:

- direkte Anzeige des Messergebnisses
- Bewertung von Quellen mit zeitveränderlichen Strahlungsgrößen
- kompaktes Messgerät mit leichter Handhabung
- Batteriebetrieb möglich
- kostengünstiger als Spektralmessgeräte

Nachteil:

- Bewertungsfunktionen kann ungenau nachgebildet sein

4.2.2 Personendosimeter

Für Arbeitsbedingungen mit wechselnden Expositionen ist es vorteilhaft, kompakte Integralmessgeräte zu nutzen, die als Personendosimeter ausgeführt sind, d. h. eine personen- bzw. körperarealbezogene Messung erlauben.

Es wird zwischen elektronischen, Polysulfonfilm- und biologischen Dosimetern unterschieden.

Elektronische Dosimeter

Elektronische Datenlogger-Dosimeter entsprechen prinzipiell den oben beschriebenen Integralradiometern. Die Bauform ist jedoch wesentlich kompakter. Dosimeter besitzen ein oder mehrere Sensoren, die an unterschiedliche Bewertungsfunktionen angepasst sind. Typischerweise sind elektronische Dosimeter mit einer Speicherfunktion ausgerüstet, um Expositionswerte zeitbezogen zu ermitteln.

Vorteile:

- Registrierung des Zeitverlaufs der Messgröße
- direkte Auswertung durch Messdatentransfer auf den PC
- wiederverwendbar

Nachteile:

- Bewertungsfunktionen ungenau nachgebildet
- kostenintensiv in Relation zu Filmdosimetern

Fotochemische Filmdosimeter (Polysulfonfilm)

Fotochemische Sensoren sind in der Regel Folien aus fotosensitiven Materialien, die die Änderungen der optischen Dichte des Materials durch die Einwirkung von Strahlung nutzen. Durch eine spezifische Kalibrierung kann eine Anpassung an das Aktionsspektrum des zu untersuchenden biologischen Effektes erreicht werden.

Vorteile:

- personen-/körperarealbezogene Messung
- wenig Gewicht, problemloses Tragen
- Kostengünstig

Nachteile:

- unzureichende Anpassung der relativen spektralen Empfindlichkeit an die Bewertungsfunktion (über Kalibrierfaktoren bei bekannter Quelle erhebliche Verbesserung)
- im langwelligen UV-A-Bereich nicht sensibel
- externe Auswertung
- nicht wiederverwendbar

Biologische Filmdosimeter

Das strahlungsempfindliche Material besteht vornehmlich aus einfachen biologischen Lebensformen (Bakteriensporen, Phagen, Zellen) oder Stoffwechselkomponenten (Pro-Vitamin D). Im biologischen Filmdosimeter werden beispielsweise immobilisierte Sporen des Bakteriums *B. subtilis* verwendet, deren Anzahl unter UV-Exposition dosisabhängig reduziert wird. Aus den messbaren Stoffwechselprodukten lässt sich die Abtötungsrate der Bakterien ermitteln, die ein Maß für die Höhe der UV-Exposition ist.

Vorteile:

- personen-/körperarealbezogene Messung
- wenig Gewicht, problemloses Tragen
- wasserdichte und staubdichte Ausführung verfügbar

Nachteile:

- unzureichende Anpassung der relativen spektralen Empfindlichkeit an die Bewertungsfunktion (über Kalibrierfaktoren bei bekannter Quelle erhebliche Verbesserung)
- nicht wiederverwendbar

4.2.3 Messsystem mit pyroelektrischem Empfänger

Mit einem pyroelektrischen Empfänger kann die Strahlung über einen weiten Spektralbereich gemessen werden. Dazu wird die Strahlung nahezu vollständig absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die Temperaturerhöhung ist proportional zur einfallenden optischen Strahlung.

Typisch für diesen Detektortyp ist eine nahezu lineare Empfindlichkeit im Spektralbereich von 200 nm bis 20 μm . Er misst somit je nach Kalibrierung die absolute Leistung, Bestrahlungsstärke oder Bestrahlung über einen großen Bereich des optischen Spektrums. Durch das Vorschalten von Kanten- oder Bandfiltern lässt sich der Wellenlängenbereich begrenzen.



Abb. 4.6 Pyroelektrisches Messsystem

Vorteile:

- nahezu lineare Empfindlichkeit
- Einsetzbar vom UV- bis in den langwelligen IR-Bereich

Nachteile:

- Klimabedingungen haben einen Einfluss auf das Messsignal
- Kantenfilter zur Begrenzung des Messbereichs stehen nur eingeschränkt zur Verfügung

4.2.4 Bildgebende Verfahren

Bei den bildgebenden Verfahren werden die Strahlraten mit einem besonderen Kamerasystem und einer Computersoftware erfasst und ausgewertet. Vergleichbar mit integralen Messverfahren werden die photobiologischen Wirkungsfunktionen auch hier durch optische Filtersysteme nachgebildet. Anstelle des Detektors wird ein spezielles Kameramodul eingesetzt (s. Abbildung 4.7).



Abb. 4.7 Bildgebendes und computerunterstütztes Messverfahren

Die Kamera ist mit unterschiedlichen Objektiven ausgestattet, so dass sowohl photometrische als auch radiometrische Größen ermittelt werden können.

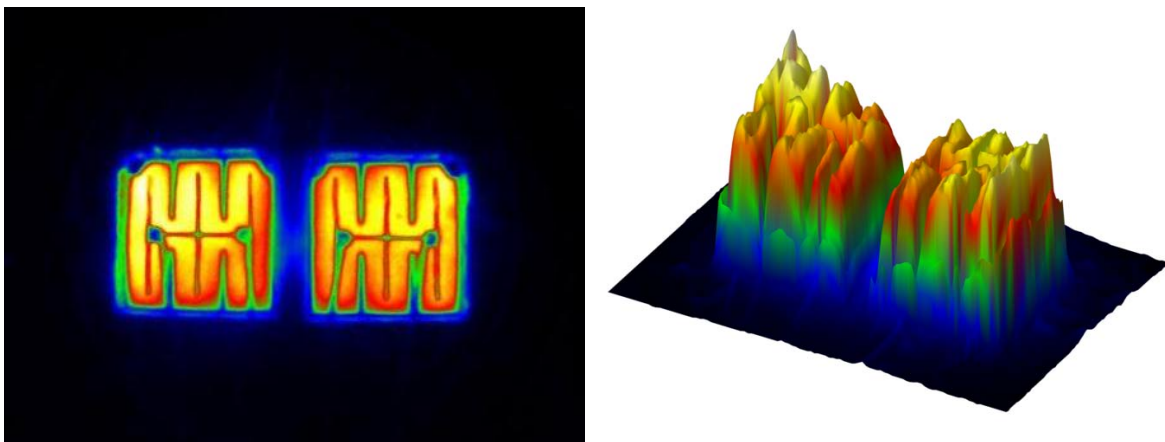


Abb. 4.8 Darstellung der Leuchtdichte einer Duo-LED in der 2-D- und 3-D-Darstellung

Vorteile:

- freie Wählbarkeit des Betrachtungsbereiches
- freie Positionierung von Profilquerschnitten
- erleichterte Suche nach Hotspots (die Bereiche mit der höchsten Emission/Gefährdung)
- erhebliche Zeitersparnis gegenüber einer manuellen Rastervermessung

Nachteil:

- hoher Kostenaufwand für diese Systeme

4.3 Streulichtreduktion bei Array-Spektralradiometern

Dioden- und CCD-Array-Spektrometer bieten den Vorteil einer schnellen spektralen Messung. Die Nachteile bei diesem Messverfahren können in der fehlenden Dynamik im UV-Bereich sowie die Streulichtproblematik sein (s. Abbildung 4.9).

Bei Messungen mit dem Dioden- oder CCD-Array wird immer das komplette Array bestrahlt, auch wenn nur ein kleiner Anteil des Bereiches untersucht werden soll. Da sich die Messdynamik nach dem maximalsten Signal meist außerhalb des UV-Bereiches richtet, ist die Empfindlichkeit für kleinere UV-Anteile sehr gering.

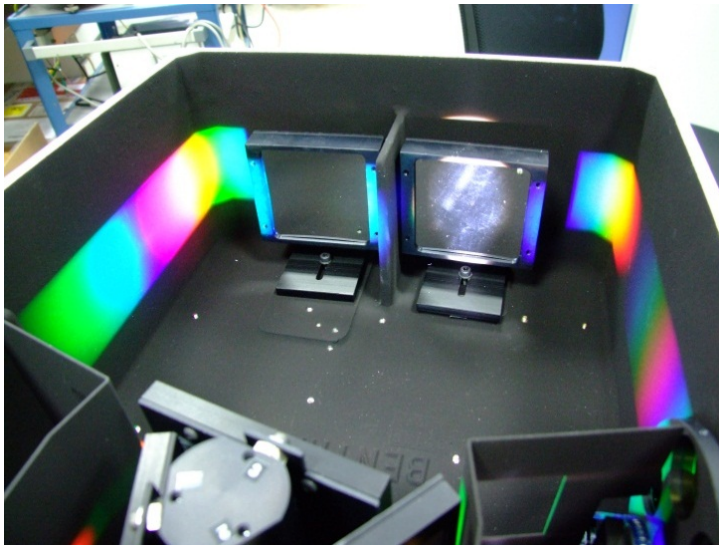


Abb. 4.9 Streulicht in einem Monochromator

Spektrometer, die für Dioden- und CCD-Arrays verwendet werden, haben im Vergleich zu Doppel-Monochromatoren zudem einen erhöhten Streulichtanteil durch vagebundierende Strahlung, die zumeist durch die Lichtbrechung höherer Ordnung entsteht.

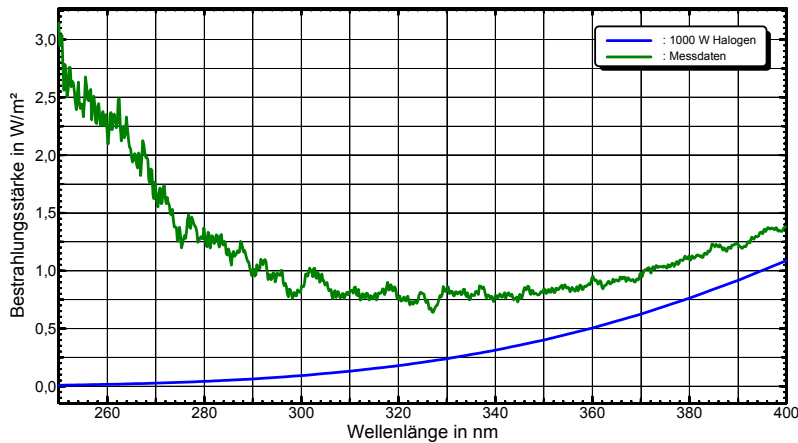


Abb. 4.10 Auswirkungen des Streulichtes auf die Messdaten eines Array-Spektrometers

In Abbildung 4.10 ist mit der grünen Kurve die Abweichung der Messkurve zu einem Spektrum einer kalibrierten Strahlungsquelle dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im ultravioletten Bereich der Streulichtanteil mit kürzer werdender Wellenlänge stärker auswirkt. Zur Verringerung dieses Problems gibt es mehrere Ansätze. Beispielhaft werden hier zwei aufgeführt:

4.3.1 Subtraktionsverfahren

Für die Bestimmung der spektralen Bestrahlungsstärke im ultravioletten Bereich werden bei diesem Verfahren zwei Messungen benötigt. Die erste Messung erfolgt ohne Zusatzfilter. Bei der zweiten Messung wird ein Kantenfilter in den Strahlengang gebracht, welches alle Signale unterhalb von 400 nm herausfiltert. Die Signale, die bei der zweiten Messung dann noch in diesem Bereich zu erkennen sind, werden durch das Streulicht hervorgerufen. Subtrahiert man diese Signale von der ersten Messung, verbessert sich das Messergebnis für den UV-Bereich erheblich.

4.3.2 Bandpassfilterung

Gute Ergebnisse zur Streulichtunterdrückung im UV-Bereich lassen sich durch den Einsatz eines Bandpassfilters erzielen (s. Abbildung 4.11). Wellenlängen außerhalb des Bandpassbereiches werden vom Filter absorbiert und können daher nicht mehr als Streulicht die Messung beeinflussen. Der Messbereich wird hierdurch auf den Durchlassbereich des Filters beschränkt.

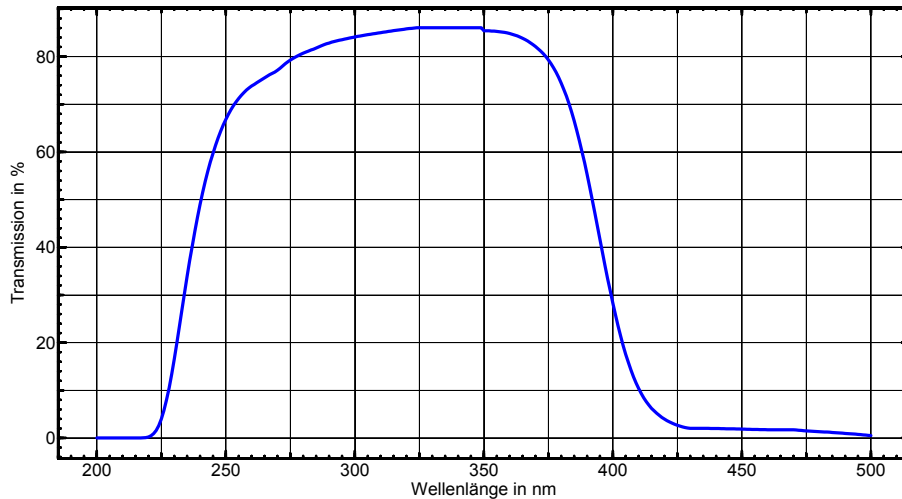


Abb. 4.11 Spektrale Transmission eines Bandpass-Filters

Bei der Verwendung des Filters ist wegen der herabgesetzten Empfindlichkeit im Messbereich jedoch eine neue Kalibrierung erforderlich.

Besonders auffällig ist der Streulichtanteil bei Transmissionsmessungen, da hierfür zwei Messungen (mit und ohne Probe) benötigt werden und aus beiden Spektren die Transmission berechnet wird. Mit der roten Kurve kann der erheblichen Einfluss durch Falschlicht gezeigt werden, der in der Größenordnung des eigentlichen Messsignals sein kann (s. Abb. 4.12).

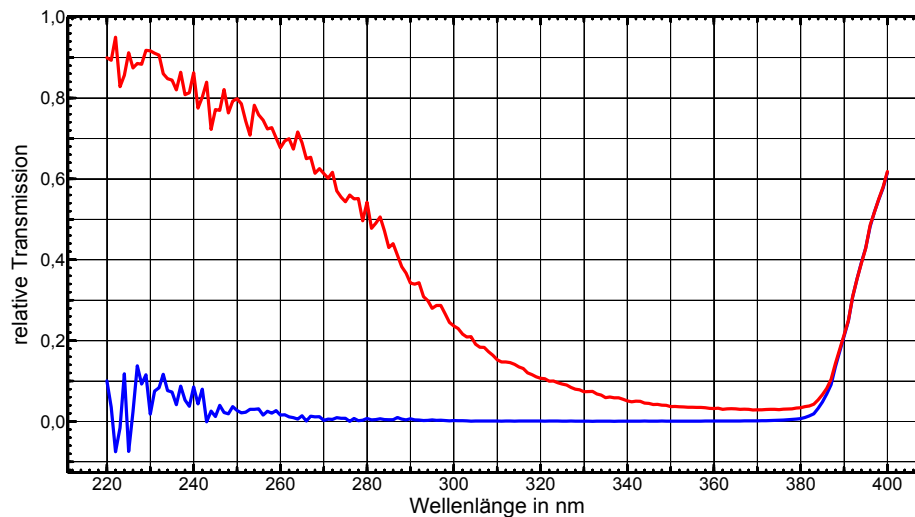


Abb. 4.12 Vermessung eines Kantenfilters ohne und mit Streulichtreduktion

Insbesondere bei der Transmissionsmessung von weißen Textilien haben sich Bandpassfilter bewährt, da die Textilien durch UV-Strahlung fluoreszieren und somit das Ergebnis verfälschen können.

5 Kalibrierung

Eine Kalibrierung kann über zwei unterschiedliche Verfahren erfolgen. Zum einen kann dies über einen Vergleich mit einem Detektor mit bekannter Empfindlichkeit und zum anderen durch einen Vergleich mit einer Kalibrierlampe mit bekannter Emission erfolgen. Zur Kalibrierung von Empfängern wird häufiger das zweite Verfahren genutzt und wird hier im Näheren beschrieben.

Dabei wird zunächst bei der Kalibrierung mit dem zu kalibrierenden Messgerät eine Referenzquelle vermessen. Die Messdaten werden mit den Sollwerten der Referenzquelle verglichen. So lassen sich Abweichungen bestimmen und gegebenenfalls Korrekturen durchführen. Eine gute Kalibrierung eines Messgerätes ist eine Voraussetzung für eine genaue Messung.

Die Kalibrierung sollte in regelmäßigen Abständen wiederholt werden, um den Qualitätsstandard zu erhalten. Die Gültigkeitsdauer der Kalibrierung ist im Kalibrierzeugnis festgehalten.

Von Herstellern und Prüflaboren wird ein Kalibrierservice angeboten. Integralmessgeräte müssen in der Regel vom Hersteller kalibriert werden, da bei bekannter zu vermessender Strahlungsquelle über einen Korrekturfaktor die Genauigkeit des Messsystems verbessert werden kann. Bei Spektralradiometern kann die Kalibrierung mit dem erforderlichen Wissen und geeigneter Ausrüstung auch selbst durchgeführt werden (s. Abb. 5.1).

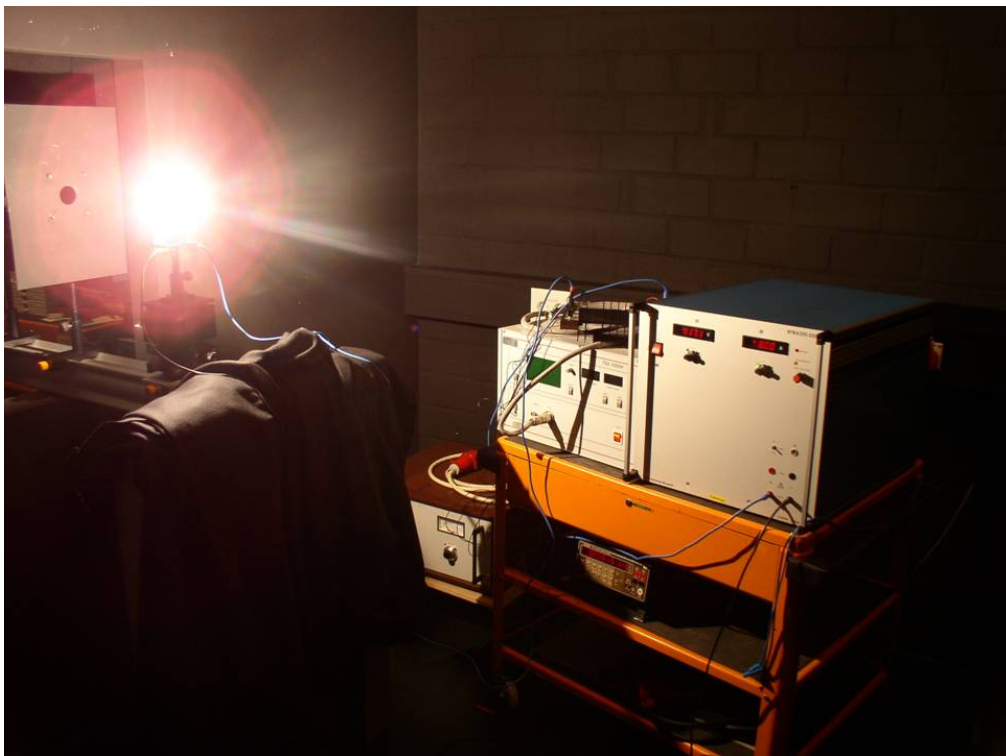


Abb. 5.1 1000 W Halogen-Kalibrierlampe mit Netzteil und Steuergerät

Die Kalibrierung eines Spektralradiometers erfolgt in zwei Schritten, der Wellenlängen- und der Absolutkalibrierung. Die Durchführung wird im Folgenden beschrieben.

5.1 Kalibrierung der Wellenlänge

Bei spektralen Messverfahren muss zunächst eine Wellenlängenkalibrierung durchgeführt werden.

5.1.1 Kalibrierquellen

Für die unterschiedlichen Messgrößen gibt es diverse Strahlungsquellen zur Kalibrierung. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf ein nationales bzw. internationales Normal rückführbar sind.

Normalerweise werden für die Kalibrierung der Wellenlänge Linienstrahler, wie z. B. Quecksilberdampf-Lampen, verwendet.

Quecksilberdampf-Niederdrucklampen emittieren mehrere Spektrallinien und können über einen größeren Bereich eingesetzt werden (s. Abb. 5.2).

Laser oder Natriumdampf-Lampen erzeugen nur eine diskrete Linie oder wenige Linien und können sinnvoll den Wellenlängenbereich ergänzen.

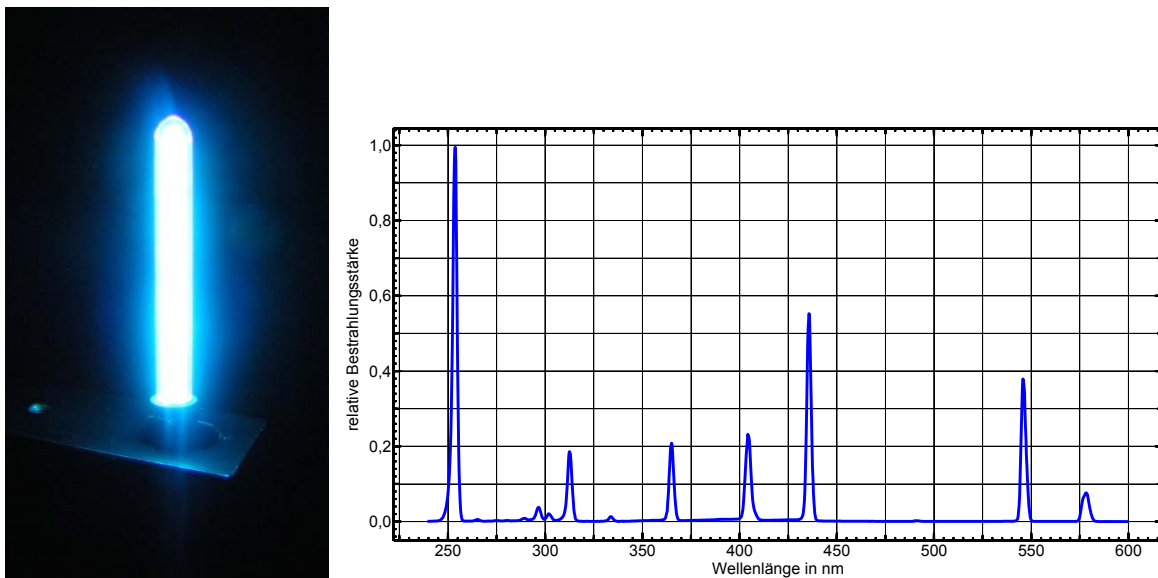


Abb. 5.2 Quecksilberdampf-Niederdrucklampe (Hg) mit Linienspektrum

Es gibt auch Wellenlängen-Kalibrierverfahren, bei denen durch Reflektion an einer speziellen Oberfläche einzelne Spektrallinien absorbiert werden (s. Abb. 5.3). Die Kalibrierquelle besteht dann aus einer Lichtquelle, die für den Wellenlängenbereich geeignet ist, und einem definierten absorbierenden Medium (Reflektions-Standard). Aus der Differenz zwischen direktem und reflektiertem Strahl lässt sich Absorptionsspektrum bestimmen.

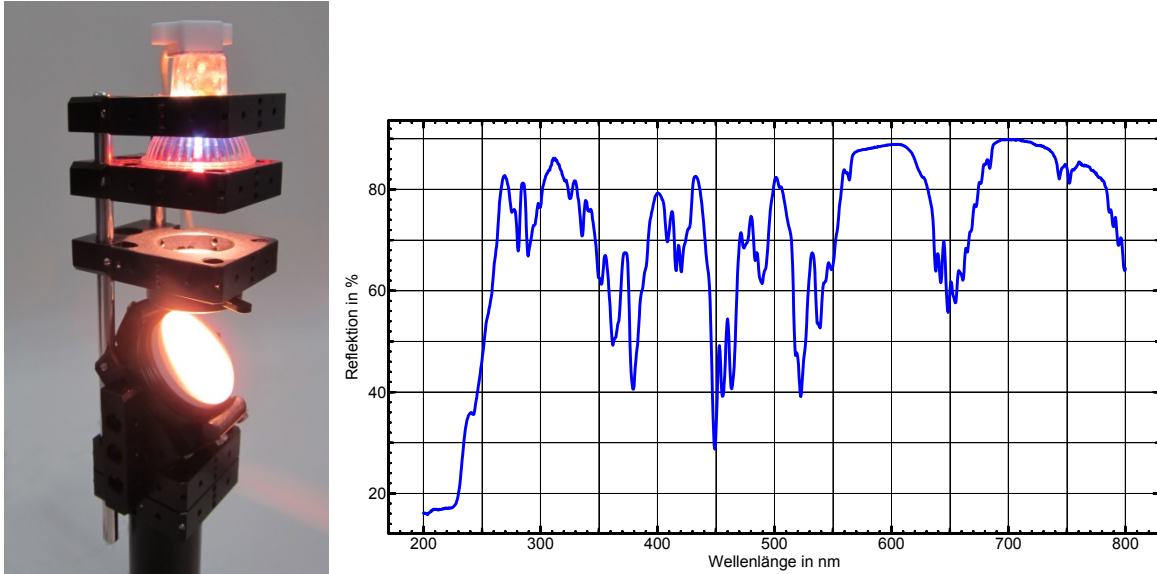


Abb. 5.3 Wellenlängen-Absorptionsnormal mit Spektrum

5.1.2 Zeitpunkt/Kalibrierintervall

Bei Monochromatoren mit motorgetriebenen Gitterspiegeln empfiehlt es sich, neben der regelmäßigen Kontrolle auch nach jedem größeren Transport oder einer Erschütterung eine Überprüfung der Wellenlänge vorzunehmen.

5.1.3 Durchführung einer Wellenlängenkalibrierung

Bei der Ausrichtung zur Wellenlängenkalibrierung ist keine besondere Sorgfalt zu beachten, da nur die Wellenlänge der einzelnen Peaks kontrolliert werden muss. Der Messkopf ist vor der Strahlungsquelle zu montieren und vor einfallendem Fremdlicht zu schützen. Der Abstand zur Quelle ist so zu wählen, dass sich ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis ergibt.

Anhand der gemessenen Spektren können die Wellenlängen der Emissions- bzw. Absorptionslinien bestimmt und mit den Soll-Werten verglichen werden. So kann die Wellenlängengenauigkeit des spektralen Messsystems bestimmt und gegebenenfalls korrigiert werden.

5.2 Kalibrierung von Bestrahlungsstärke und Strahldichte

Für die Kalibrierung von Bestrahlungsstärke und Strahldichte werden unterschiedliche Kalibrierquellen benötigt.

Die Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 250 nm – 2500 nm wird in der Regel mit Halogen-Lampen (s. Abb. 5.4) kalibriert. Da diese einen relativ geringen Anteil an UV-Strahlung haben, empfiehlt es sich, Halogen-Lampen mit hoher Leistung zu verwenden. Üblich ist eine 1000 W, deren Kalibrierdaten für einen Abstand von 70 cm Abstand (freier Strahlengang) ermittelt wurden. Bei eingehausten Lampen

mit z. B. 100 W werden die niedrigeren Bestrahlungswerte durch eine kürzeren Abstand (z. B. 20 cm) zum Teil kompensiert.

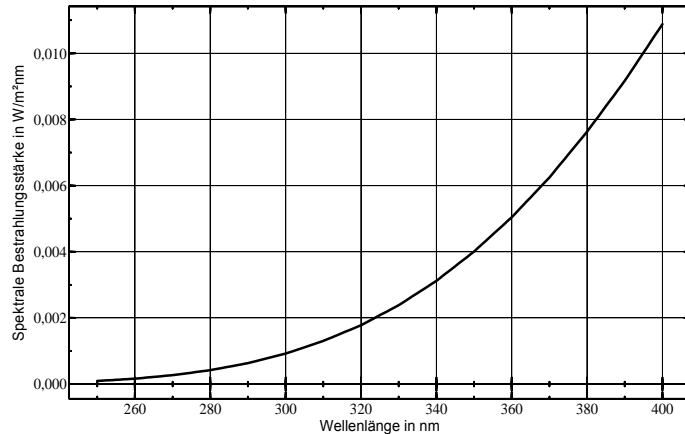


Abb. 5.4 Halogen-Lampe mit Spektrum

Speziell für den UV-Bereich haben Deuterium-Lampen (Abb. 5.5) sehr gute Eigenschaften, da die Emissionen überwiegend in diesem Bereich liegt. Das Maximum der Strahlung liegt im kurzwelligen UV unterhalb von 200 nm und hat einen fallenden Verlauf bis ca. 400 nm. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Lampe mit einem stabilisierten Vorschaltgerät betrieben wird. Deuterium-Lampen mit einfachen Vorschaltgeräten sind nicht konstant und eignen sich daher nicht für eine Kalibrierung.

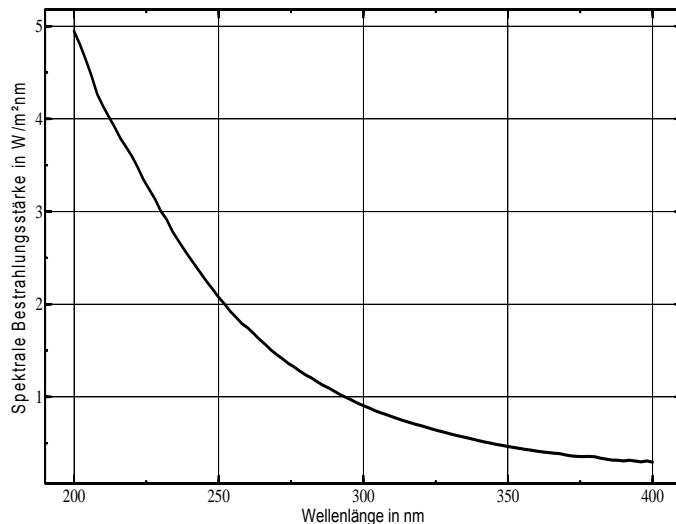


Abb. 5.5 Deuterium-Lampe mit Spektrum

Ist eine Kalibrierung über einen weiten Spektralbereich (UV bis IR) erforderlich, sind Kalibriersysteme einzusetzen, die sowohl eine Halogen- als auch eine Deuterium-Lampe beinhalten.

5.2.1 Kalibrierquellen für die Strahldichte

Zur Kalibrierung der Strahldichte wird eine definierte, homogen leuchtende oder reflektierende Fläche verwendet, welche nicht zu klein sein darf, damit bei unterschied-

lichen Raumwinkeln (meist 1,7 mrad, 11 mrad, 100 mrad) kalibriert werden kann (siehe Kap. 3.1.4).

Um eine homogene Strahldichte zu erzeugen, kann eine Ulbrichtkugel verwendet werden. Die Kugel ist von innen weiß beschichtet, so dass eintreffende Strahlung vielfach reflektiert wird und dadurch die Innenseite der Kugel gleichmäßig beleuchtet ist. Am Austritt der Kugel ist eine Streuscheibe positioniert, deren Fläche eine gleichmäßige Strahlungsverteilung besitzt.

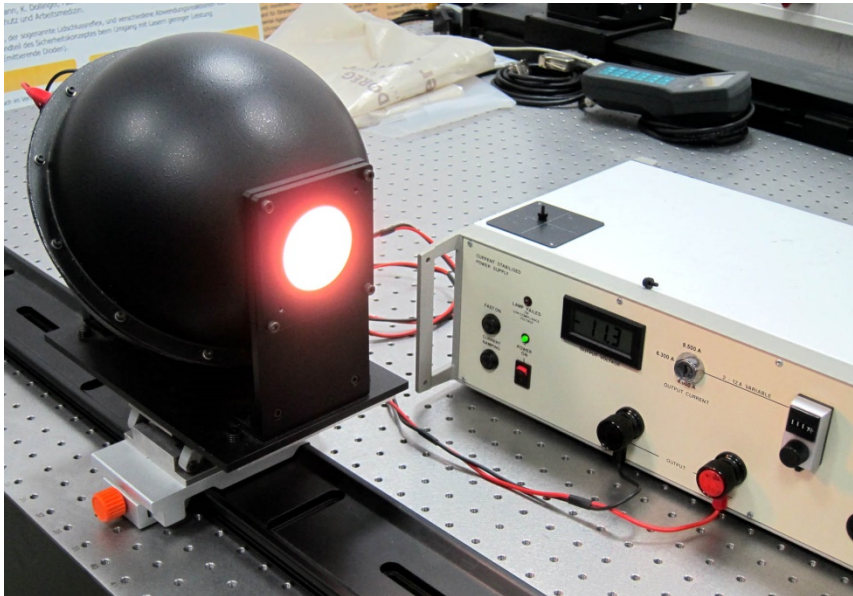


Abb. 5.6 Strahldichtenormal mit Netzteil

Je nach Bedarf können innerhalb und außerhalb der Ulbrichtkugel unterschiedliche Strahlungsquellen positioniert sein. Hierzu können beispielsweise Halogen-Lampen, Laser für monochromatisches Licht oder mit Lasern erzeugte Plasmaentladungen verwendet werden. Das letztere Verfahren ist zwar aufwendiger, dafür hat das Spektrum sehr hohe, gleichmäßige Strahlungsanteile vom UV- bis IR-Bereich. In Abbildung 5.6 ist in der Kugel eine 50 Watt Halogen-Lampe verbaut.

Werden nur kleinere homogen leuchtende Flächen benötigt, z.B. bei bildgebenden Verfahren (siehe Kap. 4.2.7), können auch besondere Glühlampen verwendet werden (s. Abb. 5.7). Bei einer konstanten Stromstärke (hier 16,9 A bei 9,0 V) emittiert der Glühfaden eine gleichmäßige definierte Strahldichte.



Abb. 5.7 Strahldichtenormal mit Glühfaden

5.2.2 Durchführung einer spektralen Kalibrierung

Für die Reproduzierbarkeit von Kalibrierungen ist die Ausrichtung vom Messkopf zur Strahlenquelle enorm wichtig. Hierzu wird eine optische Bank mit entsprechenden Feinverstellungen verwendet (Abb. 5.8). Mit einem bidirektionalen Laser (Abb. 5.9), der zur Ausrichtung zwischen Messkopf und Quelle montiert wird, kann man am einfachsten überprüfen, ob sich beide Komponenten auf einer optischen Achse befinden. Hält man nun einen Spiegel vor den Messkopf bzw. vor die Justierhilfe der Lampe, kann man anhand der Reflektion feststellen, ob Kopf und Lampe senkrecht zueinander stehen.

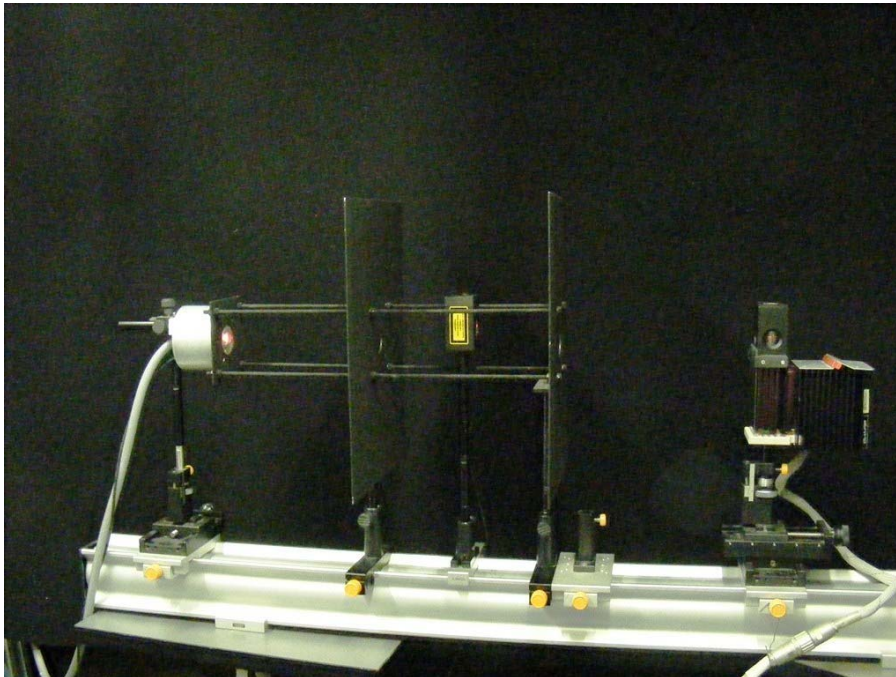


Abb. 5.8 Kalibrierplatz mit Lochblenden

Vor der Kalibrierung werden alle reflektierenden Teile mit schwarzem Filztuch abgedeckt. Durch Lochblenden kann zusätzlich der Streulichtanteil verringert werden, was die Qualität der Kalibrierung erhöht.



Abb. 5.9 Bidirektionaler Justierlaser

Ein bidirektionaler Justierlaser lässt sich aus einem Laser mit geringer Leistung, einem Strahlteiler und einem Spiegel selbst herstellen. Dabei tritt der Laserstrahl in einen Strahlteiler und ein Teil des Strahls wird abgelenkt. Der andere Anteil, der gerade durchgelassen wird, wird nun vom Spiegel reflektiert und anschließend zur anderen Seite abgelenkt. So erhält man zwei Strahlen, die auf gleicher Höhe der optischen Achse liegen (Abb. 5.10).

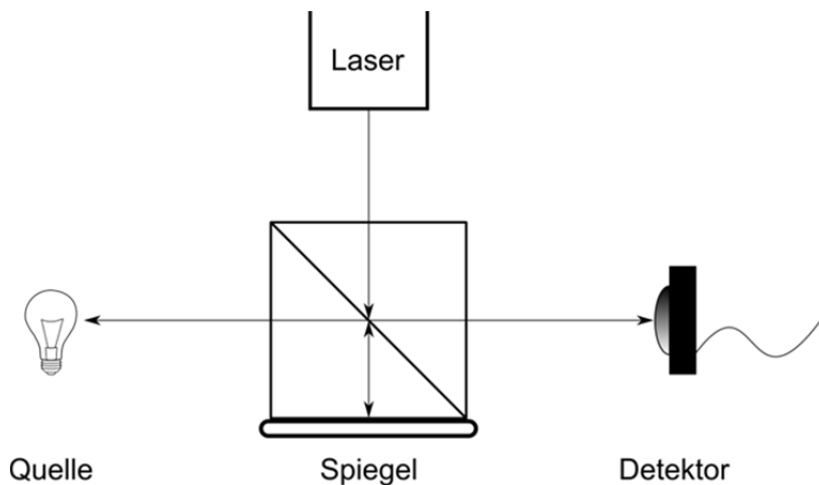


Abb. 5.10 Schematischer Aufbau eines bidirektionalen Justierlasers

5.2.3 Distanz zwischen Messkopf und Kalibrierlampe

Ein weiterer wichtiger Bestandteil einer Kalibrierung ist die genaue Einstellung des Abstandes zwischen Quelle und Detektor. Bei der Verwendung eines Bandmaßes

oder eines Gliedermaßstabes (Zollstock) kann der Abstand durch Ungenauigkeit des Abstandsmessers oder durch Parallaxefehler variieren. Dies führt bei jeder neuen Kalibrierung zu anderen Abständen, wodurch der entstehende Messfehler dynamisch wird und sich daher später nicht mehr korrigieren lässt.

Es empfiehlt sich daher, ein festes Längenmaß zu verwenden, das z. B. aus einem auf passende Länge gebrachtes Metallprofil bestehen kann. Fehler, die durch kleine Abweichungen des Längenmaßstabes hervorgerufen werden, sind immer konstant (statisch) und können später noch korrigiert werden.

5.2.4 Durchführung und Überprüfung einer Absolutkalibrierung

Nach der Überprüfung der Wellenlängengenauigkeit bzw. Wellenlängenkalibrierung kann die Absolutkalibrierung durchgeführt werden. Der Vorgang ist für die spektrale Strahlendichte und Bestrahlungsstärke gleich.

Zunächst wird das Spektrum der Kalibrierlampe (Abb. 5.12) ohne jegliche Korrektur aufgenommen. Durch mehrfache Messungen und der darauffolgenden Mittelung werden Ausreißer und das Rauschen des Signals gemindert. Die Anzahl der Wiederholungsmessungen sollte mindestens drei sein bei gutem Signal/Rauschverhältnis und kann bei schwachem Signal 20 und mehr sein.

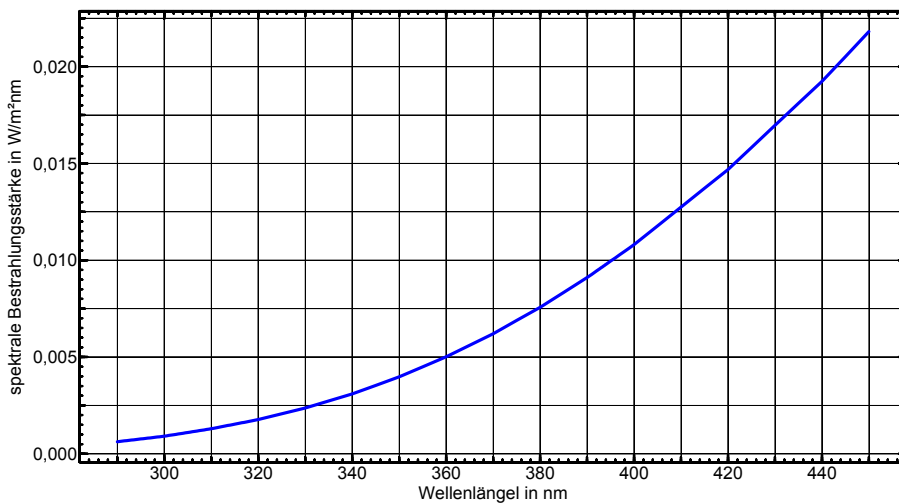


Abb. 5.11 Spektrum der Halogen-Kalibrierlampe

In Abb. 5.12 sind die Rohdaten ohne Korrektur dargestellt, wobei der spektrale Verlauf bestimmt wird durch die Eigenschaften des Empfängers, der Gitter oder Prismen und durch alle weiteren optischen Komponenten (Spiegel, Linsen).

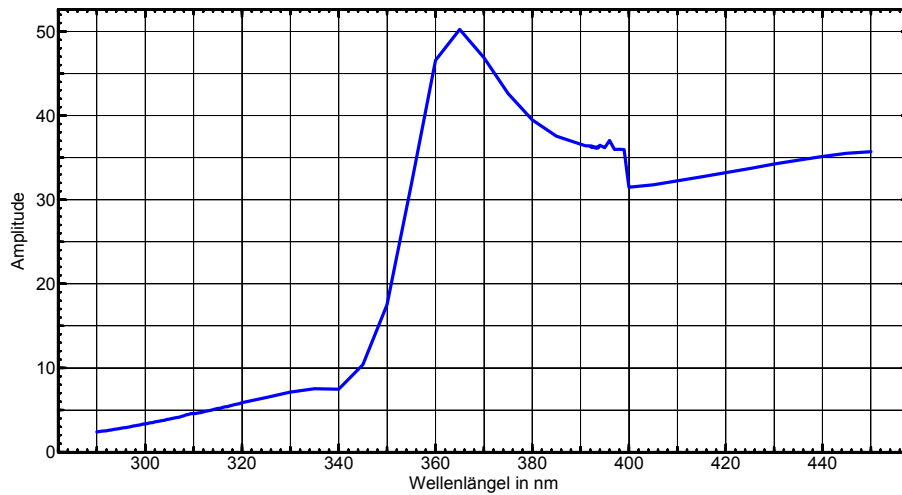


Abb. 5.12 Gemessenes Spektrum einer Halogen-Kalibrierlampe ohne Korrektur

Mit den gemessenen Rohdaten und den Daten der Kalibrierlampe wird die Kalibrierkurve berechnet und im Messgerät hinterlegt (Abb. 5.13). Alle künftigen Messungen werden nun automatisch mit der Kalibrierkurve korrigiert.

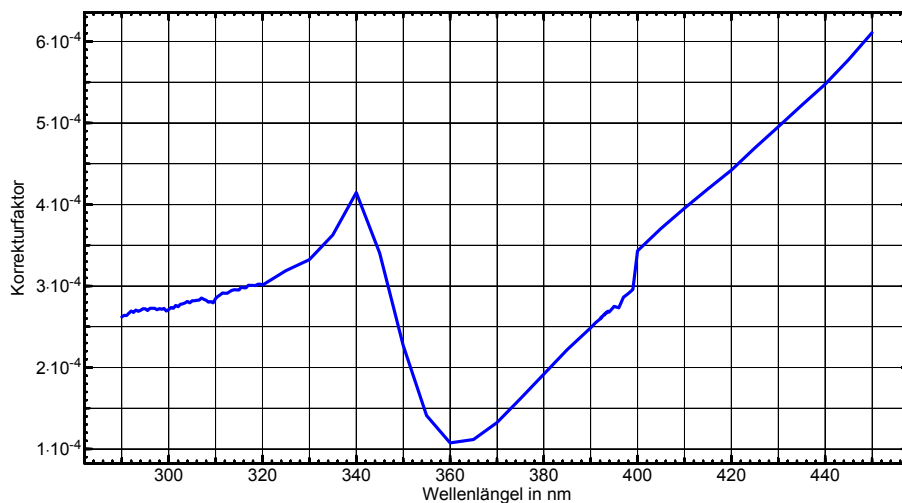


Abb. 5.13 Berechnete Kalibrierkurve

Zur Überprüfung der Kalibrierung wird die Kalibrierlampe nun mit berücksichtigter Korrektur erneut vermessen und die Abweichung zu den Soll-Werten berechnet (Abb. 5.14).

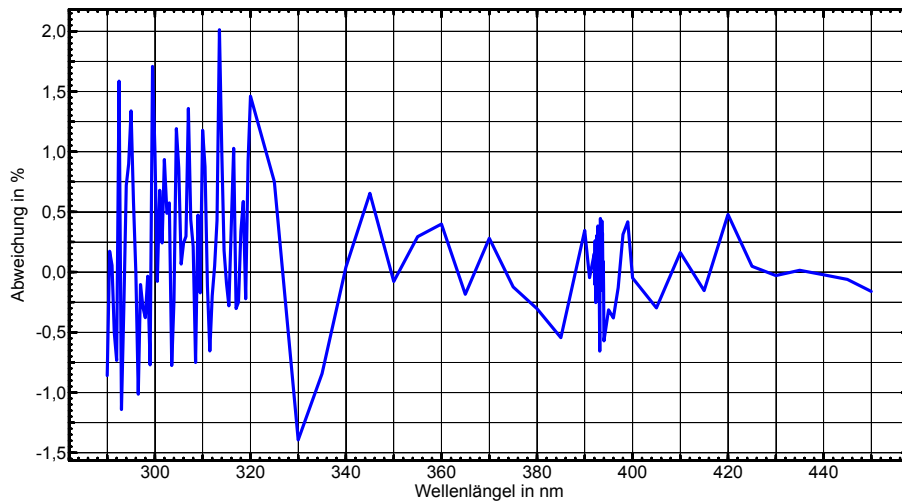


Abb. 5.14 Berechnete Messabweichung

Bei der hier durchgeführten Kalibrierung ergab sich eine Messwertabweichung von +2 % und -1,5 %. Weiterhin ist in Abb. 5.14 zu erkennen, dass die Abweichungen mit steigender Wellenlänge geringer werden. Dies liegt im Wesentlichen am Spektrum der Halogen-Kalibrierlampe, die mit zunehmender Wellenlänge ein stärkeres Signal hat und an der zunehmenden Empfindlichkeit des Empfängers. Für den ultravioletten Bereich ist zur Kalibrierung der Einsatz einer Deuterium-Kalibrierlampe sinnvoll.

6 Bewertung optischer Strahlung am Arbeitsplatz

In der Arbeitswelt kann optische Strahlung sehr unterschiedlich auftreten, ob als „Nutzstrahlung“ (Lackrocknung, Materialprüfung) oder als Nebenprodukt von Arbeitsprozessen (Schweißen, Trennen von Starkstromleitungen).

Um die Gefährdung am Arbeitsplatz durch optische Strahlung unter möglichst realen Bedingungen zu bestimmen, sind zunächst die Expositionsbedingungen zu ermitteln. Hierbei sind neben den Strahlungsquellen auch sämtliche Tätigkeiten und Zeiten zu berücksichtigen, bei denen Personen exponiert sein können. Hieraus lässt sich eine Messstrategie ableiten, um alle notwendigen Parameter zu erfassen und zu bewerten. Bei der Durchführung von Arbeitsplatzmessungen sollten insbesondere folgende Punkte berücksichtigt werden:

Zielsetzung der Messung festlegen:

- Einhaltung von Grenzwerten am Arbeitsplatz,
- Ermittlung der maximalen Expositionsdauer,
- Einrichten von Sicherheitsbereichen.

Ermittlung der Expositionsbedingungen:

- Liegen Angaben über die Strahlungsquelle vor?
Art, Anzahl und Ort der Leuchtquelle(n), Lampendaten
- Umgebungsbedingungen, insbesondere mögliche Reflektionen
- Aufenthaltsorte und Expositionszeiten während der Arbeitsschicht
- Persönliche Schutzausrüstung vorhanden und in Anwendung?

Planung:

Auswahl des Messgerätetyps:

- Spektralverfahren (genaueste Messung),
- Integralverfahren, (Übersichtsmessung bis Grenzwertvergleich),
- Personendosimeter (Dosismessung, elektronisch auch zeitauflösend).

Festlegen von:

- Messort bzw. Messorten,
- Messrichtung,
- Messdauer, Mittelungsdauer.

Durchführung der Messung

Auswertung der Messergebnisse:

- bei spektralen Messverfahren:
 - Bewertung mit biologischen Wirkungsfunktionen,
 - Berechnung von Teil- bzw. Gesamtintegralen.

- Grenzwertüberschreitung
- Ermittlung der Expositionsdauer
- Ermittlung von Schutzbereichen

Festlegung der Bedingungen für Wiederholungsmessungen:

- Zeiträume festlegen
- Veränderung der Expositionsbedingungen

Messprotokoll erstellen:

Ein Beispiel für ein Protokoll finden Sie im Anhang.

Beispiel Schweißarbeitsplatz:

Professionelle Schweißer sind so gekleidet, dass weder Augen noch Haut von der UV-Strahlung exponiert werden (Abb. 6.1). Schweißhelfer und Zulieferer können sich unter Umständen nicht ausreichend geschützt im Expositionsbereich aufhalten. Da die Expositionszeiten über einen 8-h-Arbeitstag kumulativ sind, d.h. Einzelexpositionen werden aufaddiert, können auch bei diesen „Nebenakteuren“ die Grenzwerte überschritten werden. In diesem Beispiel soll gezeigt werden, dass die UV-Expositionen beim Schweißen sehr hoch und die Grenzwerte nach kürzester Zeit überschritten werden können. Schutzmaßnahmen sind zwingend notwendig um Augen- und Hautschäden zu vermeiden.



Abb. 6.1 Messung an einem Schweißer-Arbeitsplatz

Die UV-Expositionsmessungen wurden in einer Position eines Schweißhelfers durchgeführt (Abstand 60 cm vom Schweißbogen) Der Schweißer selbst ist näher am Schweißbogen (Abstand ca. 50 cm vom Schweißbogen) und die Expositionswerte sind noch höher. Die spektralen Messungen wurden unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Tab. 6.1 Verwendete Schweißparameter

| Lfd. Nr. | Schweißverfahren | Spannung in V | Strom in A | Gas | Elektrode/ Draht in mm |
|----------|------------------|---------------|------------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | MAG | 22 | 170 | 18 % Ar+ 82 % CO ₂ | Ø 1,0 |
| 2 | MAG | 24 | 220 | 18 % Ar+ 82 % CO ₂ | Ø 1,2 |

Die Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke wurden mit einem kalibrierten Array-Spektrometer durchgeführt. Das Messsystem CAS 140 CT-154 der Firma Instrument Systems besteht aus einem Einfachmonochromator und einem gekühlten CCD-Flächensensor mit 1024*128 Pixel. Die Kalibrierung des Spektrometers ist rückführbar auf einen PTB-Standard.

Messparameter:

Spektrale Bandbreite = 3,7 nm

Messabstand = 0,8 m

Betrachtungswinkel = ca. 45°

In den Abb. 6.2 und 6.3 sind die gemessenen Spektren im UV-Spektralbereich unter Berücksichtigung der in der Tab. 6.1 aufgeführten Parameter dargestellt. Im Vergleich kann eine deutlich höhere spektrale Bestrahlungsstärke bei dem Verfahren mit dem höheren Schweißstrom festgestellt werden.

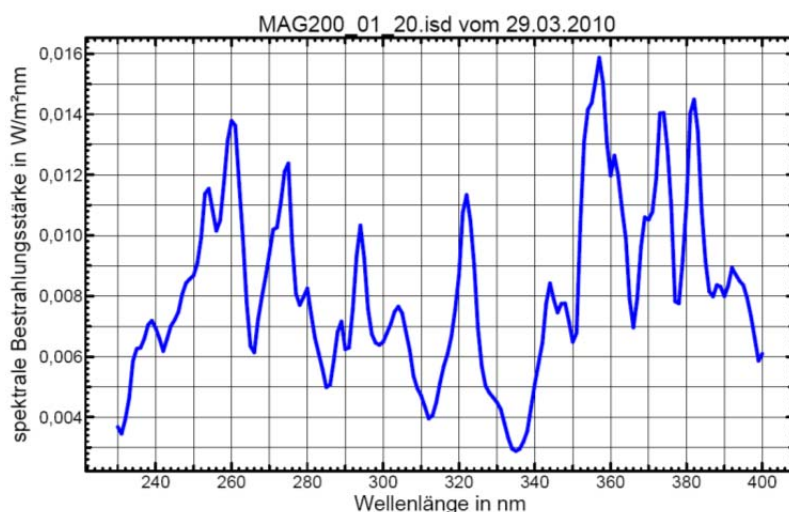


Abb. 6.2 Spektrale Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen bei einem Strom von 170 A

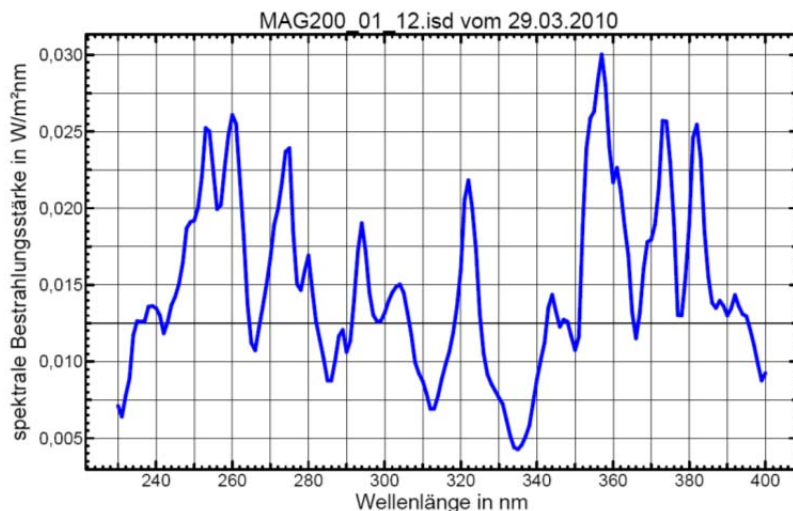


Abb. 6.3 Spektrale Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen bei einem Strom von 220 A

Die gemessenen Spektren sind für den Vergleich mit den Grenzwerten entsprechend aufzubereiten. Für den UV-A Bereich wird eine Integration von 315 bis 400 nm vorgenommen bzw. die Spektren werden mit biologischen Funktionen ($S_{(\lambda)}$ und Erythem) bewertet und für den Bereich 250 bis 400 nm integriert.

In der folgenden Tabelle werden anhand der Messergebnisse und Grenzwerte die maximalen Expositionszeiten ermittelt.

Tab. 6.2 Messwerte und berechnete maximale Bestrahlungsdauer

| | | | Bewertungsfunktionen und Grenzwerte | | |
|----------|-----------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Lfd. Nr. | Verfahren | | UV-A | $S_{(\lambda)}$ | Erythem |
| | | Grenzwert | 10.000 J/m ² | 30 J/m ² | 250 J/m ² |
| 1 | MAG 170 A | Messwert | 0,65 – 0,74 W/m ² | 0,31 – 0,36 W/m ² | 0,4 - 0,46 W/m ² |
| | | Zulässige Bestrahlungsdauer | 15.500 - 13604 s | 96 – 83 s | 629 -548 s |
| 2 | MAG 220 A | Messwert | 1,02 – 1,28 W/m ² | 0,47 – 0,69 W/m ² | 0,6 – 0,87 W/m ² |
| | | Zulässige Bestrahlungsdauer | 9819 - 7842 s | 64 - 44 s | 420 - 287 s |

Die Messungen ergaben, dass an diesem Arbeitsplatz für einen Schweißhelfer unter den o. g. Bedingungen die Grenzwerte, die für einen 8 h-Arbeitstag gelten, innerhalb von ca. 10 Minuten überschritten werden. Hier wird die Notwendigkeit von PSA auch

für Schweißhelfer deutlich. Bei nicht ausreichender PSA können akute und langfristige Schäden an Haut und Auge nicht ausgeschlossen werden.

Beispiel: Arbeitsplatz für Glasbläser

Bei vielen Arbeitsplätzen ist es offensichtlich, dass ein erhöhtes UV-Risiko zu erwarten ist. Bei Glasbläsern ging man lange Zeit davon aus, dass von den verwendeten Brennern eine Gefährdung insbesondere durch infrarote Strahlung besteht (Abb. 6.4). Messungen zeigten, dass die Exposition durch UV-Strahlung nicht zu vernachlässigen ist.



Abb. 6.4 Glasbläserei für technische Anwendungen

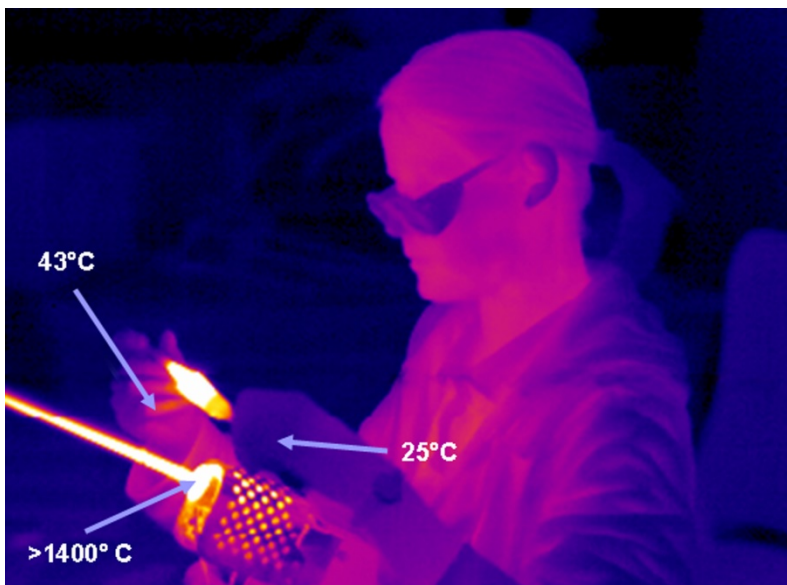


Abb. 6.5 Aufnahme mit einer Wärmebildkamera eines Glasbläser-Arbeitsplatzes

In Abb. 6.5 ist in dem Wärmebild zu erkennen, dass bei dem eingesetzten Tischbrenner eine Flammentemperatur von über 1400°C auftreten kann. Der Grad der Gefährdung wird durch den Abstand zur Quelle bestimmt. Bei der Verarbeitung von Glas können das Gesicht, die Hände und die Unterarme der UV-Strahlung ausgesetzt sein, wobei die Hände in einem Abstand von kleiner 20 cm sehr nah an der Flamme und somit stark gefährdet sind. An Arbeitsplätzen zur Glasbearbeitung kann der UV-Grenzwert für einen achtstündigen Arbeitstag bereits nach 3–30 Minuten überschritten werden [25]. Bei einem Tischbrenner sind Technische Schutzmaßnahmen schwierig anzuwenden. Ein spezielles Abschirmglas am Brenner kann die Strahlung auf das Gesicht und auf die Augen verhindern.

Zum Schutz der Augen vor UV- und IR-Strahlung können Schutzbrillen und Kopfschilde eingesetzt werden, die auch über einen ausreichenden Blendschutz vor starker sichtbarer Strahlung verfügen sollten. Die Haut wird am besten durch Kleidung geschützt. Die Hände können für filigrane Tätigkeiten durch dünne Handschuhe oder Handschuhe ohne Fingerkuppen geschützt werden. Welche Maßnahmen notwendig sind, sollte durch eine Beurteilung der Gefährdung ermittelt werden.

Beispiel: Arbeitnehmer im Freien

Die über 200.000 Neuerkrankungen an Hautkrebs pro Jahr (mit steigender Tendenz) sind nicht alle auf ein Übermaß an solarer UV-Strahlung zurückzuführen. Doch sollte bei den ca. 2.500.000 Arbeitnehmern, die mehr als 80 % ihrer beruflichen Tätigkeiten im Freien ausüben, auf den Schutz vor zu viel Sonnenstrahlung geachtet werden. Dass eine überhöhte UV-Strahlenexposition erhebliche Risiken für die Hautgesundheit birgt, ist eine zunehmend verbreitete Erkenntnis. Abb. 6.6 zeigt unsachgemäß gekleidete Arbeiter und weist darauf hin, dass sich dieses Bewusstsein wenig im betrieblichen Arbeitsablauf widerspiegelt.



Abb. 6.6 Unsachgemäße Kleidung auf einer Baustelle

In einem Projekt, das von der BAuA gefördert worden ist, konnte für die Bevölkerung Deutschlands eine mittlere UV-Jahresexposition von 130 SED (Standarderythemdosis) pro Jahr ermittelt, während für ständig im Freien Beschäftigte eine Erhöhung der UV-Jahresexposition auf 300 bis 500 % nachgewiesen wurde [36].

Um abzuschätzen, ob ein Schutz vor der Sonnenstrahlung notwendig ist, müssen keine eigenen Messungen durchgeführt werden. Für eine Bewertung des gesundheitlichen Risikos durch solare UV-Strahlung ist der UV-Index sehr hilfreich. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), das Umweltbundesamt und weitere assoziierte Institutionen, u. a. die BAuA, betreiben ein bundesweites Messnetz, dessen Daten zentral beim BfS erfasst und ausgewertet werden (Abb. 6.7).

Auf den nachstehenden Internet-Seiten können Informationen zum UV-Index und Prognosen abgerufen werden. Weiterhin werden nützliche Tipps zum richtigen Umgang mit der Sonne bereitgestellt.

- www.bfs.de/uv/
- www.wetteronline.de/uv
- www.dwd.de über: Biowetter und UV-Index
- www.meteovista.de über: Sonnenstärke
- www.wetterkontor.de über: UV-Index
- www.proplanta.de/Agrar-Wetter/Deutschland über: UV-Index



Abb. 6.7 Standorte des Solaren UV-Messnetzes in Deutschland

7 Bewertung optischer Strahlungsquellen

Für die Bewertung optischer Strahlungsquellen sind nach der DIN EN 62471 „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ mehrere Faktoren zu berücksichtigen:

- Welcher Bereich ist betroffen
 - Oberfläche der Haut oder der Hornhaut
 - Netzhaut
- Art der Strahlung:
 - Ultraviolette,
 - sichtbare oder
 - infrarote Strahlung
- Expositionsdauer
- Größe der Strahlungsquelle

In Anlehnung an die o.g. Norm wird je nach Art der Gefährdung zwischen den Strahlungsgrößen, d.h. zwischen Strahldichte und Bestrahlungsstärke unterschieden. Die Strahldichtemessungen werden für die Gefährdungen der Netzhaut und die Bestrahlungsmessungen für die Gefährdungen der Haut verwendet. Ausnahme ist die Blaulichtgefährdung durch kleine Quellen. Hier kann alternativ eine Messung der Bestrahlungsstärke durchgeführt werden.

Tab. 7.1 Gefährdung Strahldichte

| Organ | Gefährdung | Bewertungsfunktion | Wellenlängenbereich [nm] |
|-------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| Auge | Blaulicht | $B(\lambda)$ | 300-700 |
| | Netzhaut thermisch | $R(\lambda)$ | 380-1400 |
| | Netzhaut thermisch IR | $R(\lambda)$ | 780-1400 |

Tab. 7.2 Gefährdung Bestrahlungsstärke

| Organ | Gefährdung | Bewertungsfunktion | Wellenlängenbereich [nm] |
|---------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Auge und Haut | Aktinisches UV | $S(\lambda)$ | 200-400 |
| Auge | UV-A | | 315-400 |
| | Blaulicht, nur kleine Quellen | $B(\lambda)$ | 300-700 |
| | IR | | 780-3000 |
| Haut | thermisch | | 380-3000 |

7.1 Bestimmung der scheinbaren Quellgröße

Die scheinbare Quellgröße ist prinzipiell der leuchtende Teil einer Strahlungsquelle. Dieser Teil wird im Auge über die Linse auf die Netzhaut projiziert. Je größer eine Strahlungsquelle, desto größer ist ihr Abbild auf der Netzhaut, d.h. die eingebrachte Energie verteilt sich über eine größere Fläche.

Die Winkelausdehnung α (siehe Abb. 7.3) gibt das Verhältnis von scheinbarer Quellgröße G zum Abstand vom Auge r wieder. Um die Winkelausdehnung α zu bestimmen, muss die Quellgröße daher zuvor bekannt sein. Bei der Ermittlung der scheinbaren Quellgröße wird von den Bereichen ausgegangen, die mindestens 50 % der maximalen Strahlungsintensität haben. Bei einer länglichen Quelle müssen die maximale und minimale Ausdehnung der Quelle und daraus ein arithmetisches Mittel bestimmt werden. Beispielhaft sollen hier zwei Verfahren vorgestellt werden.

Verfahren 1: Ausmessen der Projektion

Eine grobe Abschätzung der scheinbaren Quellgröße ist mit Hilfe einer Sammellinse möglich, indem eine vergrößerte Projektion eine Abmessung erleichtert (Abb. 7.1). Hierzu wird die Linse zwischen Quelle und Projektionsfläche verschoben, bis eine scharfe Abbildung zu erkennen ist. Der hellste Bereich ist abzuschätzen, wobei nur die Bereiche betrachtet werden, deren Helligkeit mind. 50 % dieses Wertes entsprechen. Mit den Maßen des hellsten Bereiches (50 % Schwellwert) und der Abstandsformel (Abb. 7.2) lässt sich die Größe der scheinbaren Quelle berechnen.

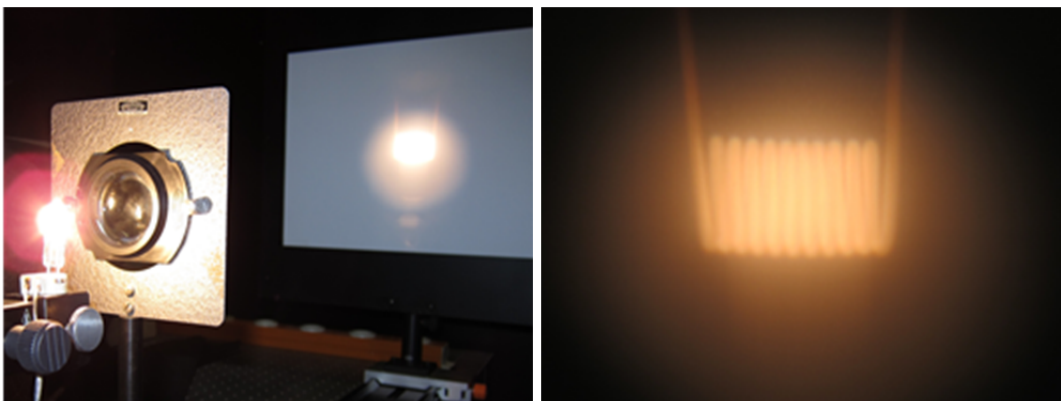


Abb. 7.1 Projektion einer Glühwendel

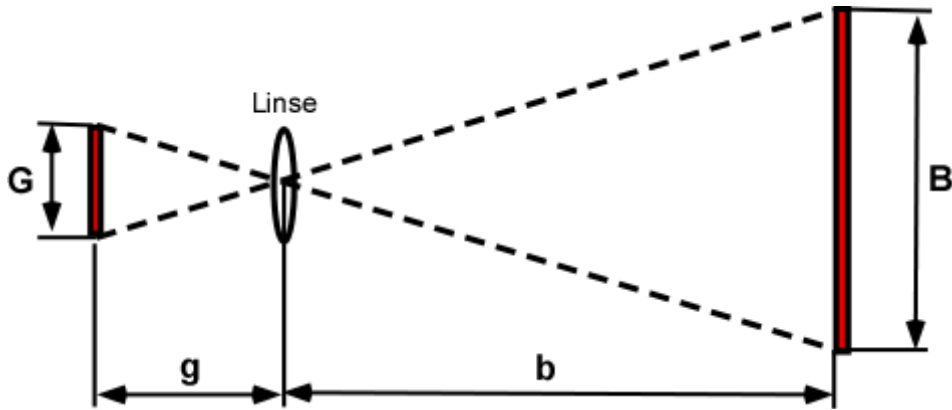


Abb. 7.2 Grafische Darstellung zur Abstandsformel

Abstandsformel:

$$G = \frac{g \cdot B}{b}$$

Hierbei ist: G: Größe der scheinbaren Quelle
 g: Abstand zwischen Quelle und Linse
 B: Abbildungsgröße
 b: Abstand zwischen Linse und Abbildung

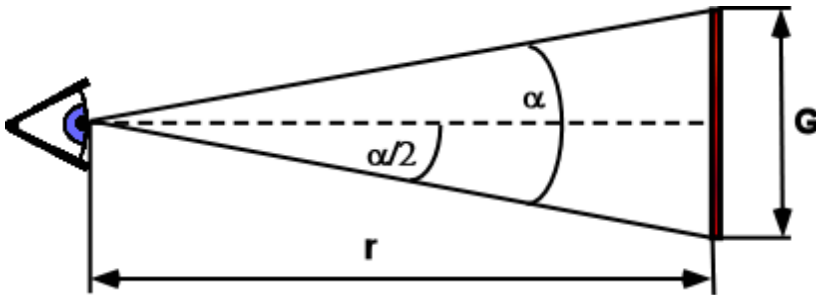


Abb. 7.3 Bestimmung der Winkelausdehnung α

Die Winkelausdehnung α ergibt sich dann nach

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{G}{2r}$$

$$\text{mit } \alpha = 2 \tan^{-1} \frac{G}{2r}$$

Die Winkelausdehnung α kann für kleine Quellen mit dem Verhältnis der Größe der Scheinbaren Quelle G zum Messabstand r mit $\alpha = G/r$ vereinfacht bestimmt werden. So entspricht die Quellgröße von 2,2 mm auf einem Messabstand von 200 mm einem Betrachtungswinkel von 0,011 rad bzw. 11 mrad. Eine Quellgröße von 20 mm bei dem gleichen Abstand entspricht 0,1 rad (100 mrad).

Verfahren 2: Das computerunterstützte Kamerasystem

Für dieses Verfahren werden eine Kamera, ein genaues Referenzmaß und eine spezielle Auswertesoftware benötigt. Nacheinander werden ein bekanntes Rasterfeld und eine Strahlungsquelle mit der gleichen Brennweite bei gleichem Abstand digital fotografiert (Abb. 7.4). Mit Hilfe der Software kann ein Schwellwert von 50 % vorgeben und anhand des Längenmaßes die Quelle vermessen werden (Abb. 7.5). Als Längenmaßstab können Rastermaßnormale (teuer) oder die Skalierung einer Schieblehre (praktikabel und preiswert) verwendet werden.

Der Vorteil:

- hohe Genauigkeit
- Vorgaben der Norm umsetzbar

Nachteil:

- hohe Kosten für Hard- und Software

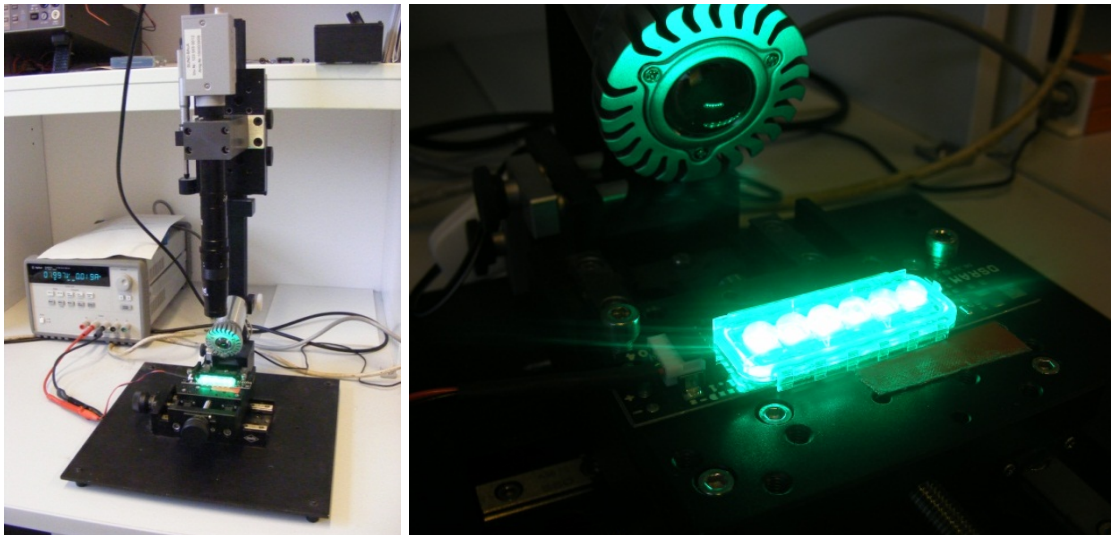


Abb. 7.4 Kamerasystem mit Feinjustierung

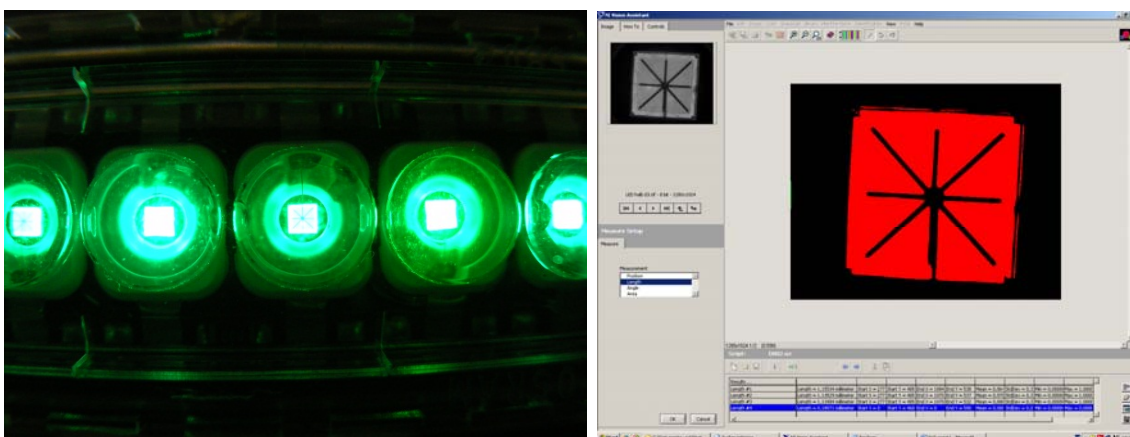


Abb. 7.5 Aufnahme einer LED und Auswertung mit Software

7.2 Einhaltung von Grenzwerten nach DIN EN 62471

Grenzwerte werden zeitabhängig in unterschiedlichen Einheiten angegeben, als Bestrahlungsstärke E oder als Werte der Bestrahlung H . Anhand der Bestrahlungswerte können mit den Messergebnissen, die als Bestrahlungsstärke vorliegen, über die einfache Beziehung $H=E \cdot t_{\text{exp}}$ die jeweiligen maximalen Expositionsdauern bestimmt werden.

Bei der Strahlendichte ist der Empfangswinkel des Messgerätes, mit dem die Messung durchgeführt wird, in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu berücksichtigen (siehe Tab 7.4).

Tab. 7.3 Grenzwerte Strahldichte

| Bezeichnung der Gefährdung | Wellenlängenbereich in nm | Expositionsdauer in s | Empfangswinkel in rad | Grenzwert/-dosis |
|---|---------------------------|---|--|---|
| Blaulicht | 300 – 700 | 0,25 – 10 10 – 100 100 – 10 000 ≥ 10 000 | $0,011 \cdot \sqrt{(t/10)}$ 0,011 $0,0011 \cdot \sqrt{t}$ 0,1 | $10^6 \text{ J/m}^2\text{sr}$ $10^6 \text{ J/m}^2\text{sr}$ $10^6 \text{ J/m}^2\text{sr}$ $100 \text{ W/m}^2\text{sr}$ |
| Netzhaut thermisch | 380 – 1 400 | < 0,25 0,25 – 10 | 0,0017 $0,011 \cdot \sqrt{(t/10)}$ | $50\,000/(\alpha t^{0,25}) \text{ W/m}^2\text{sr}$ |
| Netzhaut thermisch (schwacher visueller Reiz) | 780 – 1 400 | > 10 | 0,011 | $6\,000/\alpha \text{ W/m}^2\text{sr}$ |

Tab. 7.4 Grenzwerte Bestrahlungsstärke

| Bezeichnung der Gefährdung | Wellenlängenbereich in nm | Expositionsdauer in s | Empfangswinkel in rad | Grenzwert |
|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|--|--|
| Aktinisches UV Haut & Auge | 200 – 400 | < 30 000 | 1,4 (80°) | 30 J/m ² |
| Auge UV-A | 315 – 400 | ≤ 1 000 > 1 000 | 1,4 (80°) | 10 000 J/m ² 10 W/m ² |
| Blaulicht für kleine Quellen | 300 – 700 | ≤ 100 > 100 | < 0,011 (in diesem Fall Winkel- kelausdehnung) | 100 J/m ² 1,0 W/m ² |
| Auge IR | 780 – 3 000 | ≤ 1 000 > 1 000 | 1,4 (80°) | 18 000/t ^{0,75} W/m ² 100 W/m ² |
| Haut thermisch | 380 – 3 000 | < 10 | 2π sr | 20 000/t ^{0,75} W/m ² |

7.2.1 Einteilung in Risikogruppen nach DIN EN 62471

Strahlungsquellen werden, gemäß der OStrV, in Risikogruppen eingeteilt. Für jede Gruppe ist je nach Gefährdung eine eigene Zeitbasis (und der zugehörige Empfangswinkel) vorgegeben. Bei Überschreitung der Grenzwerte wird die Strahlungsquelle in die nächsthöhere Gruppe eingeteilt. Übersteigt der gemessene Wert den Grenzwert der Gruppe „Mittleres Risiko“, wird diese Strahlungsquelle der nach oben offenen Gruppe „Hohes Risiko“ zugeordnet. Die Messungen werden nach DIN EN 62471 in einem Abstand von 200 mm durchgeführt und die Ergebnisse sind dazu gedacht, Strahlungsquellen untereinander zu vergleichen. In der Praxis ist dieser Abstand eher unüblich und bei einer Beurteilung der Gefährdung nach OStrV sind die Abstände der tatsächlichen Arbeitsbedingungen zu berücksichtigen.

Tab. 7.5 Einteilung von Strahlungsquellen in Risikogruppen

| Risiko | Bewertungs-funktion | Symbol | Emissionsgrenzwerte | | | Einheiten |
|--|---------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| | | | Risikofrei (Zeitbasis) | Geringes Risiko (Zeitbasis) | Mittleres Risiko (Zeitbasis) | |
| Aktinisches UV | $SUV(\lambda)$ | E_s | 0,001 (30000 s) | 0,003 (10000 s) | 0,03 (1000 s) | W/m ² |
| Nahes UV | | E_{UVA} | 10 (1000 s) | 33 (300 s) | 100 (100 s) | W/m ² |
| Blaulicht | $B(\lambda)$ | L_B | 100 (10000 s) | 10 000 (100 s) | 4 000 000 (0,25 s) | W/m ² sr |
| Blaulicht, kleine Quelle | $B(\lambda)$ | E_B | 1,0 * | 1,0 | 400 | W/m ² |
| Netzhaut thermisch | $R(\lambda)$ | L_R | 28 000/ α (10 s) | 28 000/ α (10 s) | 71 000/ α (0,25 s) | W/m ² sr |
| Netzhaut thermisch, schwacher visueller Reiz ** | $R(\lambda)$ | L_{IR} | 6 000/ α (1000 s) | 6 000/ α (100 s) | 6 000/ α (10 s) | W/m ² sr |
| IR Strah- lung, Auge | | E_{IR} | 100 | 570 | 3 200 | W/m ² |
| <p>* Eine kleine Quelle wird definiert als eine Quelle mit einer Winkelausdehnung von $\alpha < 0,011$ Radiant. Das Sichtfeld zur Mittelung bei der Messung ist 0,1 Radiant bei 10 000 s.</p> <p>** Beinhaltet die Beurteilung von Quellen, die nicht für den Allgemeingebrauch gelten</p> | | | | | | |

Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG), ABI. EG L 114 vom 27. 4. 2006, S. 38 – 59, http://bb.osha.de/docs/RL_2006_25_EG_Opt_DE.pdf
- [2] Richtlinie Bericht über den vom Vermittlungsausschuss gebilligten gemeinsamen Entwurf einer Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates betreffend Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (optische Strahlung aus künstlichen Quellen) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG, Europäisches Parlament, Plenarsitzungsdokument, A6-0026/2006 vom 6.2.2006)
- [3] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG), vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), zuletzt durch Artikel 15 Absatz 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009 (BGBl. I S. 160) geändert
- [4] Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV) vom 12. August 2004 (BGBl. I S. 2179); zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960) geändert
- [5] Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“ BGV A1, www.bgw-online.de
- [6] Reidenbach, Hans-Dieter; Brose, Martin; Ott, Günter; Siekmann, Harald: Praxis-Handbuch optische Strahlung: Gesetzesgrundlagen, praktische Umsetzung und betriebliche Hilfen, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [7] Licht und Schatten - Schutz vor Sonnenstrahlung für Beschäftigte im Freien, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2007 www.baua.de/dok/696146
- [8] Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung 2011 <http://bookshop.europa.eu/de/ein-unverbindlicher-leitfaden-zur-richtlinie-2006-25-eg-ueber-kuenstliche-optische-strahlung-pbKE3010384/;pgid=y8dIS7GU>
- [9] Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen vom 19. Juli 2010. BGBl. I (2010) Nr. 38 vom 26. Juli 2010 www.gesetze-im-internet.de/ostrv/index.html
- [10] DIN EN 62471; VDE 0837-471:2009-03, Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (IEC 62471:2006, modifiziert); Deutsche Fassung EN 62471:2008
- [11] DIN EN 12198-1:2000-10, „Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung, Teil1: Allgemeine Leitsätze“

- [12] DIN EN 12198-1:2003-04, „Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung, Teil 2: Messverfahren für die Strahlenemission“
- [13] DIN EN 12198-1:2003-04, „Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung, Teil 3: Verminderung der Strahlung durch Abschwächung oder Abschirmung“
- [14] DIN EN 14255-1: 2005-05, „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung, Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung“
- [15] DIN EN 14255-2: 2006-03, „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung - Teil 2: Sichtbare und infrarote Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz“
- [16] World Health Organization, Global Solar UV-Index-A Practical Guide, WHO/SDE/OEH/02.2
- [17] DIN EN 14255-3: 2008-06, „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung, Teil 3: Von der Sonne emittierte UV- Strahlung“
- [18] DIN EN 14255-4: 2007-02, „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung - Teil 4: Terminologie und Größen für Messungen von UV-, sichtbaren und IR-Strahlungs-Expositionen“
- [19] DIN 5031-11: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 11: Radiometer zur Messung aktinischer Strahlungsgrößen - Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung, 2011-04
- [20] Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - TROS Inkohärente Optische Strahlung
Ausgabe: November 2013
- [21] DIN 5031-7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche, 1984-01
- [22] Nachhaltiger Schutz der Bevölkerung vor UV-Strahlung, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet auf der 217. Sitzung der SSK am 20./21.09.2007, veröffentlicht im BAnz Nr. 12 vom 23.01.2008
- [23] Sutter, E.: Schutz vor optischer Strahlung, VDE Schriftenreihe 104, VDE Verlag GmbH (2008)
- [24] DIN 5031-10:2000-03, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren (wird z. Z. überarbeitet)
- [25] Gefährdungen durch optische Strahlung bei der Arbeit mit Brennern zur Glasbearbeitung und geeignete Schutzmaßnahmen, SD 53, BGETM

- [26] Augenärzte informieren: Staroperation und Intraokularlinse, Berufsverband der Augenärzte Deutschlands e.V. (BVA), 2009
www.augeninfo.de/patinfo/catop.pdf
- [27] van Norren, D.; Gorgels, T.G.M.F.: The Action Spectrum of Photochemical Damage to the Retina: A Review of Monochromatic Threshold Data. *Photochemistry and Photobiology* 87, 747-753 (2011)
- [28] Udovičić, L., Mainusch, F., Janßen, M., Nowack, D., Ott, G.: Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED). 1. Auflage Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2013. ISBN: 978-3-88261-726-9, 195 Seiten, Projektnummer: F 2115
- [29] Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3µm). *Health Physics* 73 (3): 539-554; 1997
- [30] Exposure to artificial UV radiation and skin cancer views and expert opinions of an IARC Working Group that met in Lyon, France 27–29 June 2005, IARC Working Group Reports, Vol. 1
- [31] Knuschke, P., Unverricht, I., Aschoff, R., Cuevas, M., Janßen, M., Koch, E., Krüger, A., Ott, G., Thiele, A.: Untersuchung des Eigenschutzes der Haut gegen solare UV-Strahlung bei Arbeitnehmern im Freien. 1. Auflage, Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2010. ISBN: 978-3-88261-121-2, Projektnummer: F 1986
- [32] Exposure to artificial UV radiation and skin cancer/views and expert opinions of an IARC Working Group that met in Lyon, France 27–29 June 2005, IARC Working Group Reports, Vol. 1
- [33] Schutz des Menschen vor den Gefahren durch UV-Strahlung in Solarien. Wissenschaftliche Begründung zur gleichnamigen Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 172. Sitzung der SSK am 8. Juni 2007
- [34] DGUV Grundsätze für die arbeitsmedizinische Vorsorge, Grundsatz G17 „Künstliche optische Strahlung“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, DGUV 2012, Arbeit und Soziales, Ausgabe 10/2012
- [35] Siekmann, H.: Probleme mit der Gefährdungsbeurteilung bei Expositionen durch künstliche optische Strahlung; *Technische Sicherheit*, Bd. 2 (2012), Nr. 1/2, S. 43-46
- [36] Knuschke P, Unverricht I, Ott G, Janßen M (2007): Personenbezogene Messung der UV-Exposition von Arbeitnehmern im Freien. 1. Auflage. Dortmund. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Projektnummer: F 1777. ISBN: 978-3-88261-060-4.
www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Optische-Strahlung/Optische-Strahlung.html (Abrufdatum: 25.05.2012).

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------------|--|----|
| Tab. 2.1 | Festlegung der Risikogruppen nach DIN EN 62471 | 14 |
| Tab. 2.2 | Sicherheitsklassifizierung von Maschinen nach EN 12198-1 | 15 |
| Tab. 3.1 | Einteilung der optischen Strahlung | 18 |
| Tab. 3.2 | Gegenüberstellung der radiometrischen und photometrischen Strahlungsgrößen | 19 |
| Tab. 3.3 | Negative Wirkungen optischer Strahlung auf Auge und Haut | 30 |
| Tab. 6.1 | Verwendete Schweißparameter | 62 |
| Tab. 6.2 | Messwerte und berechnete maximale Bestrahlungsdauer | 63 |
| Tab. 7.1 | Gefährdung Strahldichte | 67 |
| Tab. 7.2 | Gefährdung Bestrahlungsstärke | 67 |
| Tab. 7.3 | Grenzwerte Strahldichte | 71 |
| Tab. 7.4 | Grenzwerte Bestrahlungsstärke | 72 |
| Tab. 7.5 | Einteilung von Strahlungsquellen in Risikogruppen | 73 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------------|---|----|
| Abb. 2.1 | Deckblatt EU-Richtlinie 2006/25/EG | 8 |
| Abb. 2.2 | Deckblatt Arbeitsstättenverordnung | 10 |
| Abb. 2.3 | Deckblatt Leitfaden zur EU-Richtlinie | 11 |
| Abb. 2.4 | Deckblatt Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung | 11 |
| Abb. 3.1 | Spektralbereiche der optischen Strahlung | 17 |
| Abb. 3.2 | Schematische Darstellung der Strahldichte | 21 |
| Abb. 3.3 | Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ des menschlichen Auges | 22 |
| Abb. 3.4 | Planck'sches Strahlungsspektrum | 22 |
| Abb. 3.5 | Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung | 24 |
| Abb. 3.6 | Halogenglühlampen mit Spektrum | 25 |
| Abb. 3.7 | Spektrum einer RGB-LED | 25 |
| Abb. 3.8 | Spektrum einer weißen LED | 26 |
| Abb. 3.9 | Quecksilberniederdruckgasentladungslampe, ausgeführt als Hand-Desinfektions-Lampe | 27 |
| Abb. 3.10 | Lineare Darstellung eines Spektrums einer Quecksilber-niederdruckgasentladungslampe | 27 |
| Abb. 3.11 | Logarithmische Darstellung eines Spektrums einer Quecksilber-niederdruckgasentladungslampe | 28 |
| Abb. 3.12 | Spektrale Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen von STE 890-Stahl bei einem Strom von 266 A | 28 |
| Abb. 3.13 | UV-Spektrum eines mit Erdgas betriebenen Tischbrenners | 29 |
| Abb. 3.14 | Eindringtiefe optischer Strahlung in das Auge | 31 |
| Abb. 3.15 | Spektrale Wirksamkeit für die Entzündung der Hornhaut und der Bindehaut | 32 |
| Abb. 3.16 | Relative spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautschädigung | 33 |
| Abb. 3.17 | Relative spektrale Wirksamkeit zur photochemischen Netzhautschädigung | 33 |
| Abb. 3.18 | Wellenlängenabhängigkeit des Eindringvermögens von Strahlung in die Haut | 34 |
| Abb. 3.19 | Relative spektrale Wirksamkeit zur Bildung des Erythems [21] | 35 |
| Abb. 3.20 | Relative Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ für Auge und Haut | 36 |
| Abb. 4.1 | Spektrale Messwertabweichung eines sehr kompakten Array-Spektrometers | 38 |
| Abb. 4.2 | Strahlenverlauf in einem Spektralradiometer | 39 |
| Abb. 4.3 | Monochromator mit Strahldichtevorsatz | 41 |
| Abb. 4.4 | Integral-Messkopf mit Bedien- und Anzeigeeinheit | 42 |
| Abb. 4.5 | Integralmesssystem für Strahldichte | 43 |
| Abb. 4.6 | Pyroelektrisches Messsystem | 45 |
| Abb. 4.7 | Bildgebendes und computerunterstütztes Messverfahren | 46 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Abb. 4.8 | Darstellung der Leuchtdichte einer Duo-LED in der 2-D- und 3-D-Darstellung | 46 |
| Abb. 4.9 | Streulicht in einem Monochromator | 47 |
| Abb. 4.10 | Auswirkungen des Streulichtes auf die Messdaten eines Array-Spektrometers | 48 |
| Abb. 4.11 | Spektrale Transmission eines Bandpass-Filters | 49 |
| Abb. 4.12 | Vermessung eines Kantenfilters ohne und mit Streulichtreduktion | 49 |
| Abb. 5.1 | 1000 W Halogen-Kalibrierlampe mit Netzteil und Steuergerät | 50 |
| Abb. 5.2 | Quecksilberdampf-Niederdrucklampe (Hg) mit Linienspektrum | 51 |
| Abb. 5.3 | Wellenlängen-Absorptionsnormal mit Spektrum | 52 |
| Abb. 5.4 | Halogen-Lampe mit Spektrum | 53 |
| Abb. 5.5 | Deuterium-Lampe mit Spektrum | 53 |
| Abb. 5.6 | Strahldichtenormal mit Netzteil | 54 |
| Abb. 5.7 | Strahldichtenormal mit Glühfaden | 55 |
| Abb. 5.8 | Kalibrierplatz mit Lochblenden | 55 |
| Abb. 5.9 | Bidirektionaler Justierlaser | 56 |
| Abb. 5.10 | Schematischer Aufbau eines bidirektionalen Justierlasers | 56 |
| Abb. 5.11 | Spektrum der Halogen-Kalibrierlampe | 57 |
| Abb. 5.12 | Gemessenes Spektrum einer Halogen-Kalibrierlampe ohne Korrektur | 58 |
| Abb. 5.13 | Berechnete Kalibrierkurve | 58 |
| Abb. 5.14 | Berechnete Messabweichung | 59 |
| Abb. 6.1 | Messung an einem Schweißer-Arbeitsplatz | 61 |
| Abb. 6.2 | Spektrale Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen bei einem Strom von 170 A | 62 |
| Abb. 6.3 | Spektrale Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen bei einem Strom von 220 A | 63 |
| Abb. 6.4 | Glasbläserei für technische Anwendungen | 64 |
| Abb. 6.5 | Aufnahme mit einer Wärmebildkamera eines Glasbläser-Arbeitsplatzes | 64 |
| Abb. 6.6 | Unsachgemäße Kleidung auf einer Baustelle | 65 |
| Abb. 6.7 | Standorte des Solaren UV-Messnetzes in Deutschland | 66 |
| Abb. 7.1 | Projektion einer Glühwendel | 68 |
| Abb. 7.2 | Grafische Darstellung zur Abstandsformel | 69 |
| Abb. 7.3 | Bestimmung der Winkelausdehnung α | 69 |
| Abb. 7.4 | Kamerasystem mit Feinjustierung | 70 |
| Abb. 7.5 | Aufnahme einer LED und Auswertung mit Software | 70 |

Anhang

Anhang 1 Expositionsgrenzwerte für inkohärent optische Strahlung nach OStrV [9]

| Kennbuchstabe | Wellenlänge in nm | Expositionsgrenzwert | Zeitbasis | Winkel | Körperteil | Gefährdung(en) |
|--|---|---|---|---|---|---|
| a) | 180–400 (UV-A, UV-B, UV-C) | $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ | 8 h | | Auge: Hornhaut Bindehaut Linse | Photokeratitis Konjunktivitis |
| | | | | | Haut | Kataraktogenese Erythem Elastose Hautkrebs |
| b) | 315–400 (UV-A) | $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ | 8 h | | Auge: Linse | Kataraktogenese |
| c) | 300–700 (Blaulicht) siehe Fußnote 1 | $L_B = \frac{10^6}{t} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | $t \leq 10000 \text{ s}$ | bei $\alpha \geq 11 \text{ mrad}$ | Auge: Netzhaut | Photoretinitis |
| $L_B = 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | | $t > 10000 \text{ s}$ | | | | |
| e) | | $E_B = \frac{100}{t} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ | $t \leq 10000 \text{ s}$ | bei $\alpha < 11 \text{ mrad}$ siehe Fußnote 2 | | |
| f) | | $E_B = 0,01 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ | $t > 10000 \text{ s}$ | | | |
| g) | 380–1400 (Sichtbar, IR-A) | $L_R = \frac{28 \cdot 10^7}{C_\alpha} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | $t > 10 \text{ s}$ | | Auge: Netzhaut | Netzhautverbrennung |
| h) | | $L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | $10 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s}$ | | | |
| i) | | $L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ | $t < 10 \mu\text{s}$ | | | |

| Kennbuchstabe | Wellenlänge in nm | Expositionsgrenzwert | Zeitbasis | Winkel | Körperteil | Gefährdung(en) |
|------------------|---|---|---|---|-----------------------------|--|
| j) | 780–1400 (IR-A) | $L_{IR} = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ | $t > 10 \text{ s}$ | $C_\alpha = 11$ bei $\alpha \leq 11 \text{ mrad}$ $C_\alpha = \alpha$ bei $11 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$ $C_\alpha = 100$ bei $\alpha > 100 \text{ mrad}$ (Messgesichtsfeld $\gamma_m = 11 \text{ mrad}$) | Auge: Netzhaut | Netzhautverbrennung |
| k) | | $L_{IR} = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ | $10 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s}$ | | | |
| l) | | $L_{IR} = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ | $t < 10 \mu\text{s}$ | | | |
| m) | 780–3000 (IR-A, IR-B) | $E_{IR} = 18000 \cdot t^{-0,75} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ | $t \leq 1000 \text{ s}$ | | Auge: Hornhaut, Linse | Hornhautverbrennung Kataraktogenese |
| n) | | $H = 3 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ | $t > 1000 \text{ s}$ | | | |
| o ₁) | 380–10 ⁻⁶ (Sichtbar, IR-A, IR-B) | $H_{Haut} = 20000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ | $t < 10 \text{ s}$ | | Haut | Verbrennung |
| o ₂) | 380–10 ⁻⁶ (Sichtbar, IR-A, IR-B) | $E_{Haut} = 7700 \cdot t^{-0,34} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ | $10 \text{ s} \leq t \leq 1000 \text{ s}$ | | | |

Fußnote 1: Der Bereich von 300 bis 700nm deckt Teile der UV-B-Strahlung, die gesamte UV-A-Strahlung und den größten Teil der sichtbaren Strahlung ab; die damit verbundene Gefährdung wird gemeinhin als Gefährdung durch "Blaulicht" bezeichnet. Blaulicht deckt jedoch streng genommen nur den Bereich von ca. 400 bis 490nm ab.

Fußnote 2: Bei stetiger Fixierung von sehr kleinen Quellen mit einem Öffnungswinkel von weniger als 11 mrad kann L_B in E_B umgewandelt werden. Dies ist normalerweise nur bei optalmischen Instrumenten oder einer Augenstabilisierung während einer Betäubung der Fall. Die maximale "Starrzeit" errechnet sich anhand der Formel $t_{max} = 100/E_B$, wobei E_B in W/m^2 ausgedrückt wird. Wegen der Augenbewegungen bei normalen visuellen Anforderungen werden 100s hierbei nicht überschritten.

Anhang 2 Messprotokoll ⁴

- Allgemeine Angaben:

Betreiber:

Bearbeiter:

Anschrift:

Bemessene Anlage/Gerät

Hersteller und Baujahr:

Ort und Datum:

Inventarnummer:

Angaben zur Strahlungsquelle:

Hersteller:

Leistung:

Typ:

Emissionsdaten:

Betriebsart:

Spektrum bekannt?

Einhausung:

Optische Komponenten:

Arbeitsablauf (repräsentative und kritische Aufenthaltsorte, effektive Expositionsdauer, Kontroll- und Wartungstätigkeiten):

⁴ **Ratgeber zur Gefährdungsbeurteilung. Handbuch für Arbeitsschutzfachleute**
 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2012.
 ISBN: 978-3-88261-717-7

- Messungen:

Verwendete Messgeräte:

Typ:

Messaufnehmer:

Seriennummer:

Kalibrierung:

Messorte und Messpunkte (Beschreibung, Lageplan oder -skizze):

Messwerte (Bestrahlungsstärke, Durchschnitts- und Maximalwerte):

Besonderheiten (Einfluss weiterer UV-Quellen, örtliche und zeitliche Varianz der Werte):

Angaben zur Messunsicherheit und zur Repräsentanz der Messergebnisse:

- Grenzwerte:

Grenzwertsituation (Rechtsvorschriften, Richtlinien, Norm):

Grenzwerte für die maximal zulässige Expositionszeit:

- Auswertung:

Vergleich der Messwerte mit den Grenzwerten für die maximal zulässige Bestrahlung:

Ermittlung der maximal zulässigen Expositionszeit:

Zusammenfassende Darstellung der Gefährdungssituation (ggf. pro- und retrospektiv):

- Empfehlungen

Technische und organisatorische Gestaltungsmaßnahmen

Persönliche Schutzmaßnahmen

Warnhinweise, Einweisung und Unterweisung

Datum/Unterschrift