

## Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung

# TROS Inkohärente Optische Strahlung Teil: Allgemeines

Stand: November 2013  
(GMBI. Nr. 65–67 vom 30.12.13, S. 1302–1366)

## Inhaltsverzeichnis dieses Ausdrucks

Titel .....	3
1 Anwendungsbereich .....	3
2 Verantwortung .....	3
3 Gliederung der TROS IOS .....	4
4 Begriffsbestimmungen und Erläuterungen .....	4
4.1 Ausmaß .....	4
4.2 Bestrahlung H .....	4
4.3 Bestrahlungsstärke E .....	4
4.4 Betriebszustände .....	5
4.4.1 Normalbetrieb .....	5
4.4.2 Wartung .....	5
4.4.3 Service .....	5
4.5 Effektive Strahlungsgrößen .....	5
4.6 Emission .....	6
4.7 Exposition .....	6
4.8 Expositionsgrenzwert (EGW) .....	6
4.9 Expositionsdauer $\Delta t$ .....	6
4.10 Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen .....	6
4.11 Inkohärente optische Strahlung .....	6
4.12 Künstliche Strahlungsquellen .....	7
4.13 Messgesichtsfeld (Empfangswinkel) $\gamma$ .....	7
4.14 Mögliche Gefährdung .....	7
4.15 Optische Strahlung .....	7
4.16 Strahldichte L .....	8
4.17 Tatsächliche Gefährdung .....	9
4.18 Winkelausdehnung $\alpha$ .....	9
5 Beispiele für Expositionen durch inkohärente optische Strahlung aus künstlichen Quellen an Arbeitsplätzen und in der Ausbildung .....	9
Anlage - Biologische Wirkung inkohärenter optischer Strahlung .....	10
1 Schädigungsmöglichkeiten für Auge und Haut .....	10
2 Das Auge .....	11
2.1 Wirkung von UV-Strahlung auf das Auge .....	12
2.2 Wirkung von sichtbarer und IR-Strahlung auf das Auge .....	13
2.3 Indirekte Auswirkungen inkohärenter optischer Strahlung .....	15
3 Die Haut .....	15
3.1 Absorption in Abhängigkeit der Wellenlänge .....	15
3.2 Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut .....	16
3.3 Fototoxische oder fotoallergische Hautreaktionen .....	17
3.4 Wirkung von sichtbarer und IR-Strahlung auf die Haut .....	17
Literaturhinweise .....	18

Die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Inkohärente Optische Strahlung) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitsplatzhygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung wieder.

Sie werden vom **Ausschuss für Betriebssicherheit** unter Beteiligung des Ausschusses für Arbeitsmedizin ermittelt bzw. angepasst und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Gemeinsamen Ministerialblatt bekannt gegeben.

Diese TROS IOS, Teil Allgemeines, konkretisiert im Rahmen ihres Anwendungsbereichs die Anforderungen der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung und der Verordnung zur Arbeitsmedizinischen Vorsorge. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnungen erfüllt sind. Wählt der Arbeitgeber eine andere Lösung, muss er damit mindestens die gleiche Sicherheit und den gleichen Gesundheitsschutz für die Beschäftigten erreichen.

## 1 Anwendungsbereich

(1) Diese Technische Regel mit ihren Teilen (Allgemeines, Beurteilung der Gefährdung durch inkohärente optische Strahlung, Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung sowie Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung) dient dem Schutz vor direkten Gefährdungen der Augen und der Haut der Beschäftigten durch inkohärente optische Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz und behandelt auch den Schutz vor Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen (z. B. vorübergehende Blendung, Brand- und Explosionsgefahr).

(2) Die TROS IOS gilt für inkohärente optische Strahlung künstlicher Quellen im Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 1 mm.

(3) Der Teil Allgemeines der TROS IOS erläutert den Anwendungsbereich der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) und enthält die wesentlichen Begriffe, die bei der Umsetzung der OStrV hinsichtlich inkohärenter optischer Strahlung relevant sind, sowie Angaben zu tatsächlichen oder möglichen Gefährdungen der Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten durch inkohärente optische Strahlung.

(4) Unabhängig von den in dieser TROS IOS beschriebenen Vorgehensweisen sind vom Arbeitgeber die Beschäftigten oder ihre Interessenvertretung, sofern diese vorhanden ist, aufgrund der einschlägigen Vorschriften zu beteiligen.

## 2 Verantwortung

(1) Für die Durchführung der Gefährdungsbeurteilung ist der Arbeitgeber verantwortlich. Sofern er nicht selbst über die erforderlichen Kenntnisse verfügt, muss er sich fachkundig beraten lassen (z. B. durch geeignete Fachkräfte für Arbeitssicherheit oder fachkundige Personen nach § 5 OStrV).

(2) Hinsichtlich der Beteiligungsrechte der betrieblichen Interessenvertretung gelten die Bestimmungen des Betriebsverfassungsgesetzes bzw. der jeweiligen Personalvertretungsgesetze.

### 3 Gliederung der TROS IOS

Die Technische Regel TROS Inkohärente optische Strahlung gliedert sich in folgende Teile:

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

### 4 Begriffsbestimmungen und Erläuterungen

Es gelten die in § 2 OStrV festgelegten Begriffe. Im Folgenden werden zu wichtigen Begriffen nähere Erläuterungen gegeben (alphabetische Aufzählung).

#### 4.1 Ausmaß

Unter dem Ausmaß ist nach § 2 Absatz 9 OStrV die Höhe der Exposition gegenüber inkohärenter optischer Strahlung zu verstehen. Je nach Wellenlängenbereich und zu vermeidender Wirkung (Schutzziel) wird das Ausmaß durch die Strahlungsgrößen Bestrahlungsstärke, Bestrahlung oder Strahldichte ausgedrückt.

#### 4.2 Bestrahlung H

(1) Die Bestrahlung H (oder Energiedichte) ist das Integral der Bestrahlungsstärke E über die Zeit t. Sie ist gegeben durch folgenden Zusammenhang:

$$H = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt$$

Einheit:  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$  (Joule pro Quadratmeter)

(2) Bei Expositionen an Arbeitsplätzen ist über die Expositionsdauer  $\Delta t = t_2 - t_1$  zu integrieren.

#### 4.3 Bestrahlungsstärke E

(1) Die Bestrahlungsstärke E (oder Leistungsdichte) ist die auf eine Fläche fallende Strahlungsleistung dP je Flächeneinheit dA. Sie ist gegeben durch folgenden Zusammenhang:

$$E = \frac{dP}{dA}$$

(2) Bei homogener Verteilung der Strahlungsleistung gilt:

$$E = \frac{P}{A}$$

Einheit:  $W \cdot m^{-2}$  (Watt pro Quadratmeter).

In der Fachliteratur wird die Strahlungsleistung auch mit dem Formelzeichen  $\Phi$  bzw.  $\Phi_e$  bezeichnet.

## 4.4 Betriebszustände

(1) Die Betriebszustände der Quellen für inkohärente optische Strahlung müssen für die Gefährdungsbeurteilung genau definiert werden.

(2) Beispiele für Betriebszustände sind Normalbetrieb (bestimmungsgemäßer Betrieb, Gebrauch), Wartung, Service, Errichtung und Außerbetriebnahme.

(3) Für die Gefährdungsbeurteilung muss zwischen Betriebszuständen, die im Vergleich zum Normalbetrieb zu einer Gefährdungserhöhung und Betriebszuständen, die zu keiner Gefährdungserhöhung führen können, unterschieden werden.

### 4.4.1 Normalbetrieb

Betrieb einer Quelle für inkohärente optische Strahlung im gesamten Funktionsbereich, ohne z. B. Wartung und Service.

### 4.4.2 Wartung

Durchführung der Justierungen oder Vorgänge, die in vom Hersteller mit der Quelle für inkohärente optische Strahlung gelieferten Informationen für den Benutzer beschrieben sind und vom Benutzer ausgeführt werden, um die vorgesehene Funktion der Strahlungsquelle sicherzustellen. Normalbetrieb und Service sind hierbei nicht enthalten.

### 4.4.3 Service

Durchführung der Tätigkeit oder Justierarbeiten, die in den Service-Unterlagen des Herstellers beschrieben sind und die in irgendeiner Art die Leistungsfähigkeit der Strahlungsquelle beeinflussen können.

## 4.5 Effektive Strahlungsgrößen

Bei der Anwendung der Expositionsgrenzwerte sind in einigen Wellenlängenbereichen die Strahlungsgrößen mit einer biologischen Wirkungsfunktion zu bewerten. Sie werden dann als effektive Strahlungsgrößen bezeichnet. Zur Unterscheidung wird die Strahlungsgröße mit einem tiefgestellten Index gekennzeichnet, z. B. ist  $E_B$  die effektive Bestrahlungsstärke für die „Blaulichtgefährdung“ (engl. „blue light hazard“) und  $E_{eff}$  die mit der

Wichtungsfunktion  $S(\lambda)$  gewichtete Bestrahlungsstärke im UV-Bereich. Beispiele für Wichtungsfunktionen finden sich im Anhang „Biologische Wirkungen inkohärenter optischer Strahlung“ dieser TROS IOS.

## 4.6 Emission

Emission im Sinne dieser TROS IOS ist das Abstrahlen von Energie in Form inkohärenter optischer Strahlung.

## 4.7 Exposition

Exposition im Sinne dieser TROS IOS ist die Einwirkung von inkohärenter optischer Strahlung auf die Augen oder die Haut.

## 4.8 Expositionsgrenzwert (EGW)

Die Expositionsgrenzwerte nach § 2 Absatz 5 OStrV sind maximal zulässige Werte bei Exposition der Augen oder der Haut gegenüber inkohärenter optischer Strahlung. Diese sind im Abschnitt 5 der TROS IOS, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ aufgeführt.

Hinweis:

Der EGW ist das maximale Ausmaß der inkohärenten optischen Strahlung, dem das Auge oder die Haut ausgesetzt werden kann, ohne dass damit akute Gesundheitsschädigungen gemäß Tabelle A.1 des Anhangs dieser TROS verbunden sind. Zum Schutz vor langfristigen Schädigungen durch die kanzerogene Wirkung von UV-Strahlung ist das Minimierungsgebot nach § 7 OStrV besonders zu beachten.

## 4.9 Expositionsdauer $\Delta t$

Die Expositionsdauer  $\Delta t$  ist – im Unterschied zur täglichen Arbeitszeit – die tatsächliche Dauer der Einwirkung inkohärenter optischer Strahlung auf die Augen oder die Haut während der Arbeitszeit.

## 4.10 Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen

Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen sind alle negativen Auswirkungen von inkohärenter optischer Strahlung auf die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten, die nicht durch die Expositionsgrenzwerte für die Augen und die Haut abgedeckt sind. Dazu gehören z. B. vorübergehende Blendung, Brand- und Explosionsgefahr, Entstehung von Gefahrstoffen sowie alle möglichen Auswirkungen, die sich durch das Zusammenwirken inkohärenter optischer Strahlung und fotosensibilisierender chemischer Stoffe am Arbeitsplatz ergeben können.

## 4.11 Inkohärente optische Strahlung

Inkohärente optische Strahlung im Sinne der OStrV ist optische Strahlung aus künstlichen Quellen, die im Unterschied zu Laserstrahlung ohne feste Phasenbeziehung der elektromagnetischen Wellen ist. Sie wird z. B.

von folgenden Strahlungsquellen emittiert: Glühlampen, Leuchtstofflampen, LED, Gasstrahlern, Metall- und Glasschmelzen, Schweißlichtbögen.

Hinweis:

Wenn in dieser TROS IOS der Begriff inkohärente optische Strahlung verwendet wird, bezieht sich dieser nur auf die Emission aus künstlichen optischen Strahlungsquellen. Bei Bündelung von Strahlung natürlicher Quellen (beispielsweise bei Solarkraftwerken) findet diese TROS IOS hingegen auch Anwendung.

## 4.12 Künstliche Strahlungsquellen

Künstliche Strahlungsquellen im Sinne der OStrV sind vom Menschen gemachte Quellen optischer Strahlung. Dazu gehören z. B. Lampen zur Beleuchtung, Scheinwerfer, Lampen und LED für Anzeigen, Elektro- und Gasschweißgeräte, Öfen zur Erwärmung, Öfen zum Schmelzen von Metall und von Glas, Lampen zur Entkeimung sowie zur Lack- und Kunststofftrocknung, Blitzlampen zur Ausleuchtung sowie Blitzlampen zur kosmetischen und medizinischen Behandlung.

## 4.13 Messgesichtsfeld (Empfangswinkel) $\gamma$

Der ebene Winkel, innerhalb dessen ein Empfänger (optisches Messgerät) auf optische Strahlung anspricht, wird manchmal auch mit Gesichtsfeld, Akzeptanzwinkel oder FOV (von *field of view*) bezeichnet. Der Empfangswinkel  $\gamma$  kann durch Messblenden eingestellt werden. Die in der Expositionsgrenzwerteliste (Abschnitt 5 der TROS IOS, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“) verwendete Einheit für  $\gamma$  ist Milliradian (mrad).

## 4.14 Mögliche Gefährdung

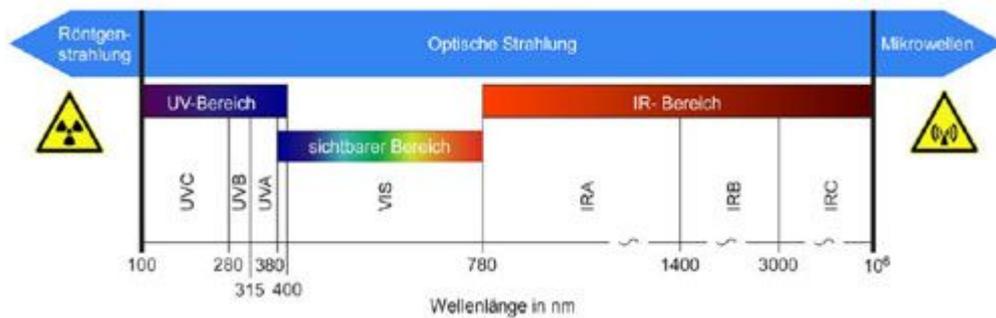
(1) Eine mögliche Gefährdung nach § 1 Absatz 1 OStrV liegt vor, wenn eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte nach Abschnitt 5 der TROS IOS, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ durch inkohärente optische Strahlung nicht ausgeschlossen werden kann.

(2) Das gilt z. B. für Beschäftigte in der Nähe von Schweißarbeitsplätzen (z. B. auf Verkehrswegen), bei der Entkeimung mit UV-Strahlung, bei der Oberflächenrissprüfung mit UV-Strahlung oder Blaulicht, beim Aufenthalt in der Nähe starker Strahlungsquellen (Gebäudebeleuchtung, Projektionsgeräte („Beamer“), Scheinwerfer, bei Schmelzöfen (Metall oder Glas) oder bei der Anwendung intensiv gepulster Lampen. Dies gilt auch bei der Wartung und Instandhaltung solcher Einrichtungen.

## 4.15 Optische Strahlung

(1) Optische Strahlung nach § 2 Absatz 1 OStrV ist jede elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 1 mm. Das Spektrum der optischen Strahlung wird unterteilt in ultraviolette (UV-)Strahlung, sichtbare (VIS-)Strahlung und infrarote (IR-)Strahlung (siehe Abbildung 1).

Abb. 1 Spektralbereiche der optischen Strahlung



(2) In der OStrV wurde für die langwellige Grenze des UV-A-Bereiches der Wert von 400 nm aus den Basis-Dokumenten der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP, englisch für Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung) übernommen. In anderen Dokumenten (z. B. in einigen Normen) wird diese Grenze entweder mit 380 nm oder mit 400 nm angegeben. Diese Unterscheidung bei der Angabe von unterschiedlichen Wellenlängenbereichen spielt jedoch bei der Anwendung der OStrV keine Rolle. Die Expositionsgrenzwerte sind hinsichtlich der Wellenlängengrenzen eindeutig definiert.

## 4.16 Strahldichte L

(1) Die Strahldichte L nach § 2 Absatz 8 OStrV ist der Strahlungsfluss oder die Strahlungsleistung P je Raumwinkel  $\Omega$  je Fläche A  $\cos \varepsilon$ . Dies gilt bei homogener Verteilung der Strahlungsleistung (Abbildung 2). Die Strahldichte L ist dann gegeben durch folgenden Zusammenhang:

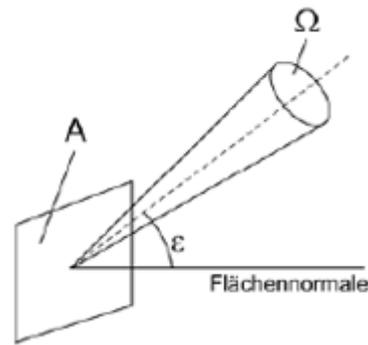
$$L = \frac{P}{\Omega \cdot A \cdot \cos \varepsilon}$$

Einheit:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$   
(Watt pro Quadratmeter und Steradian)

(2) Durch  $\cos \varepsilon$  wird das Kosinusetz berücksichtigt, da bei der Ermittlung der Strahldichte die projizierte Fläche einzusetzen ist, d. h. die Fläche, die bei Betrachtung der Fläche unter einem Winkel  $\varepsilon$  gegenüber der Flächennormalen mit dem Kosinus von  $\varepsilon$  abnimmt. Bei  $\varepsilon = 0$  gilt:

$$L = \frac{P}{\Omega \cdot A}$$

Abb. 2 Strahldichte L unter einem Winkel  $\varepsilon$



## 4.17 Tatsächliche Gefährdung

Eine tatsächliche Gefährdung nach § 1 Absatz 1 OStrV liegt vor, wenn die Exposition durch inkohärente optische Strahlung so hoch ist, dass die Expositionsgrenzwerte ohne die Anwendung von Maßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung nach § 7 OStrV überschritten werden. Das gilt z. B. für das Elektroschweißen, das Gasschweißen, die UV-Desinfektion und die UV-Sterilisation. Eine tatsächliche Gefährdung kann auch eine Gefährdung durch indirekte Auswirkungen sein (z. B. als Folge einer vorübergehenden Blendung, Brand- oder Explosionsgefahr).

## 4.18 Winkelausdehnung $\alpha$

(1) Der Winkel, unter dem die Quelle von einem Raumpunkt aus erscheint, wird definiert durch:

$$\alpha = \frac{D}{r}$$

(2) Dabei ist r der Abstand zur Quelle. Der Durchmesser D der Quelle wird wie folgt bestimmt:

1. durch den Kreisdurchmesser, wenn die Strahlungsquelle rund ist,
2. durch den arithmetischen Mittelwert aus der längsten und kürzesten Abmessung, wenn die Strahlungsquelle rechteckig ist.

Dabei ist die größte Winkelausdehnung  $\alpha_{\max}$  auf 100 mrad und die kleinste Winkelausdehnung  $\alpha_{\min}$  auf 1,7 mrad begrenzt.

## 5 Beispiele für Expositionen durch inkohärente optische Strahlung aus künstlichen Quellen an Arbeitsplätzen und in der Ausbildung

(1) Inkohärente optische Strahlung wird zur Prozessabwicklung erzeugt (z. B. bei der UV-Härtung von Lacken oder Farben) oder kann während eines Arbeitsprozesses als unerwünschtes Nebenprodukt (z. B. beim Schweißen) entstehen. Dies gilt sowohl für UV-Strahlung als auch für sichtbare und IR-Strahlung. Exposition gegenüber inkohärenter optischer Strahlung kann gemäß der Gefährdung eingeteilt werden. Quellen besitzen ein hohes Gefährdungspotenzial, wenn die Expositionsgrenzwerte bereits nach kurzer Zeit überschritten werden. Werden die Expositionsgrenzwerte weit unterschritten, dann kann die Quelle hinsichtlich direkter Gefährdungen

als ungefährlich eingestuft werden. Näheres zur Einstufung der Gefährdung und Beispiele dafür sind in der TROS IOS, Teil 1 „Beurteilung der Gefährdung durch inkohärente optische Strahlung“ beschrieben.

(2) Beim Schweißen entsteht in hohem Maße inkohärente optische Strahlung als unerwünschtes Nebenprodukt. Zu den verschiedenen Schweißverfahren lässt sich eine Abstufung der Gefährdung machen. Beim Elektroschweißen ist die Bestrahlungsstärke besonders hoch (bis zum 1500-fachen der Sonnenstrahlung), während beim Autogenschweißen mit einer geringeren Gefährdung zu rechnen ist. Neben der aktiven Tätigkeit können beim Schweißen auch Beschäftigte, die sich im Strahlungsfeld aufhalten, durch direkte Strahlung oder Reflexionen gefährdet sein. Ebenso können Beschäftigte gefährdet sein, die sich auf Verkehrswegen in der Nähe des Schweißarbeitsplatzes aufhalten oder bewegen.

(3) Tätigkeiten, bei denen Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung auftreten können, sind beispielsweise das Arbeiten an einer Glas- oder Metallschmelze, am Hochofen, bei der UV- oder IR-Trocknung von Lacken und Farben, bei der Anwendung von Gasflammen, bei der Verarbeitung von Klebern (sowohl UV- als auch IR-härtend), bei der zerstörungsfreien UV-Rissprüfung von Metallteilen, beim Sichtbarmachen von Markierungen, bei der Beleuchtung in der Bildverarbeitung (z. B. Qualitätsprüfung bei der Materialherstellung), bei der Entkeimung durch UV-Strahlung und bei der Prüfung von Elektronikbauteilen. Weiterhin kann es bei Tätigkeiten im Bereich der Kunst und der Unterhaltung durch Scheinwerfer, Lichteffekte, Einstelllicht und Blitzlicht zu einer Gefährdung durch UV- und sichtbare Strahlung kommen.

(4) Strahlungsquellen, die unter bestimmten Bedingungen keine Gefährdung darstellen, sind zum Beispiel deckenmontierte Projektionsgeräte („Beamer“) oder Schwarzlichtstrahler, sofern eine direkte Exposition ausgeschlossen werden kann.

(5) Als Strahlungsquellen, die kein Gefährdungspotenzial im Sinne der OStrV aufweisen, gelten beispielsweise handelsübliche Deckenleuchten, Allgemeinbeleuchtung in Arbeitsstätten, Computer- oder andere Bildschirme, Anzeigelampen oder Kontrollleuchten. Dies gilt beim Normalbetrieb. Wartung und Service sind u. U. gesondert zu betrachten.

## **Anlage**

### **Biologische Wirkung inkohärenter optischer Strahlung**

#### **1 Schädigungsmöglichkeiten für Auge und Haut**

(1) Die Wirkung inkohärenter optischer Strahlung ist im Wesentlichen auf die Augen und die Haut begrenzt. Die inneren Organe werden nicht gefährdet.

(2) 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 ist neben der Abhängigkeit von der Wellenlänge auch von der Bestrahlungsstärke, gegebenenfalls der Strahldichte, der Bestrahlungsdauer sowie der bestrahlten Fläche und den optischen Eigenschaften des Gewebes abhängig. Die verschiedenen biologischen Wirkungen werden durch Wirkungsfunktionen beschrieben (1). Unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors bilden die Wirkungsfunktionen die Grundlage für Expositionsgrenzwerte, wie sie im Abschnitt 5 der TROS IOS, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ festgelegt sind.

(3) In Tabelle A.1 sind die unterschiedlichen Schädigungsmöglichkeiten für das Auge und für die Haut dargestellt. Bei der biologischen Wirkung gibt es nach dem heutigen Stand der Wissenschaft keinen Unterschied zwischen der kohärenten und inkohärenten Strahlung (2). Die grundlegenden biologischen Wirkungsmechanismen sind die thermische Wirkung (durch Absorption der Strahlung im Gewebe entsteht Wärme), die fotochemische und fotobiologische Wirkung (hauptsächlich durch kurzwellige optische Strahlung werden chemische Reaktionen ausgelöst) und die fotomechanische Wirkung (kurze Impulse können Schockwellen im Gewebe hervorrufen).

(4) Eine Reihe chemischer Verbindungen und Medikamente kann das biologische Gewebe für die fotochemische Wirkung von optischer Strahlung sensibilisieren. Dadurch können heftige biologische Reaktionen, so genannte „fototoxische“ Reaktionen, auftreten (siehe Abschnitt 3).

(5) Eine lange andauernde Bestrahlung durch IR-Strahlung, die unter den Expositionsgrenzwerten für die IR-Strahlung liegt, kann dennoch eine Gefährdung für die Beschäftigten durch indirekte Auswirkungen darstellen. Es kann durch diese Bestrahlung zu einer Erhöhung der Körpertemperatur kommen, die mit akuten gesundheitlichen Auswirkungen (Beanspruchung des Herz-Kreislaufsystems, Thrombosegefahr, Flüssigkeitsverlust und Nachlassen der Aufmerksamkeit) verbunden sein kann. Dieser Aspekt ist unter anderem bei Hitzearbeitsplätzen zu beachten.

Tab. A.1 Einige Auswirkungen von optischer Strahlung auf Auge und Haut (7)

Wellenlängenbereich	Auge	Haut
UV-C	Photokeratitis Photokonjunktivitis	Erythem Präkanzerosen Karzinome
UV-B	Photokeratitis Photokonjunktivitis Katarakt	Verstärkte Pigmentierung (Spätpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Erythem Präkanzerosen Karzinome
UV-A	Katarakt	Bräunung (Sofortpigmentierung) Beschleunigte Prozesse der Hautalterung Verbrennung der Haut Karzinome
Sichtbare Strahlung (VIS)	Fotochemische und Fotothermische Schädigung der Netzhaut	Fotosensitive Reaktionen Thermische Schädigung der Haut
IR-A	Katarakt Thermische Schädigung der Netzhaut	Thermische Schädigung der Haut
IR-B	Katarakt Thermische Schädigung der Hornhaut	Thermische Schädigung der Haut
IR-C	Thermische Schädigung der Hornhaut	Thermische Schädigung der Haut

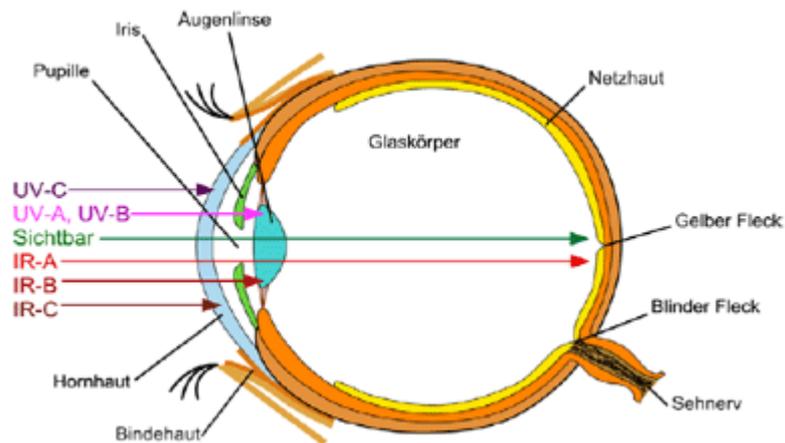
## 2 Das Auge

(1) Das am meisten gefährdete Organ beim Umgang mit optischer Strahlung ist das Auge (Abbildung A.1). Die Hornhaut (*Cornea*), die selbst etwa 75 % Wasser enthält, ist nach außen nur durch eine wenige Mikrometer dicke Tränenflüssigkeitsschicht gegen die Luft geschützt. An die Hornhaut schließt sich die vordere Augenkammer an, die mit Kammerwasser gefüllt ist. Vor der Augenlinse befindet sich kreisförmig die Regenbogenhaut (*Iris*). Die Öffnung der Regenbogenhaut wird Pupille genannt. Der Pupillendurchmesser ändert sich je nach Beleuchtungsstärke (gemeinhin als „Helligkeit“ bezeichnet), und bestimmt damit, wieviel sichtbare und nahe infrarote optische Strahlung ins Auge eintreten kann. Der Pupillendurchmesser kann dabei von 1,5 mm bis ca. 8 mm variieren. Der Raum hinter der Iris bis zur Linse wird hintere Augenkammer genannt.

(2) Die Linse ist mit einer elastischen Kapsel und einem weichen Kern in der Lage, ihre Form und damit die Brechkraft zu ändern (Akkommodation). Zwischen der Linse und der Netzhaut (*Retina*) befindet sich der Glaskörper, der zu etwa 98 % aus Wasser sowie einem Netz von Kollagenfasern besteht und eine gallertartige Struktur hat.

(3) In der Netzhaut, wo die Photorezeptoren liegen, werden die Lichtreize zu elektrischen Signalen verarbeitet, die durch den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet werden. An der Einmündung des Sehnervs und der Blutgefäße in die Netzhaut befinden sich weder Zapfen noch Stäbchen, sodass ein Sehen dort nicht möglich ist. Diese Stelle wird deshalb als „Blinder Fleck“ bezeichnet.

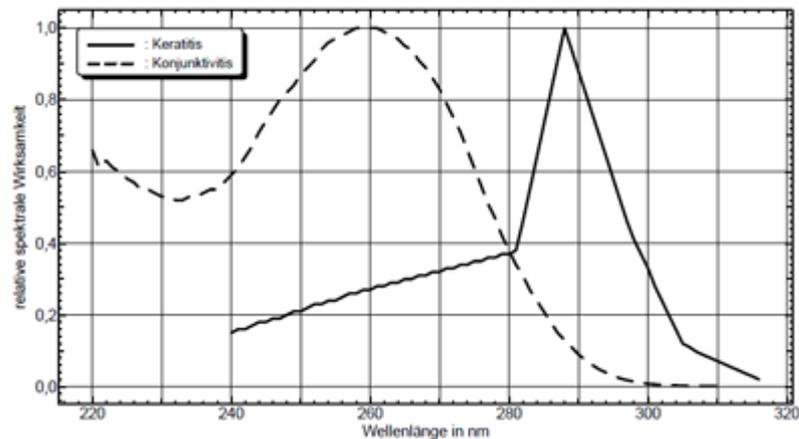
Abb. A.1 Aufbau des Auges



## 2.1 Wirkung von UV-Strahlung auf das Auge

(1) Die auf das Auge einwirkende UV-Strahlung wird je nach Wellenlänge von der Hornhaut oder der Augenlinse absorbiert. Bei Strahlung im UV-A-Bereich erfolgt dies hauptsächlich in der Augenlinse. Durch UV-B- und UV-C-Strahlung kann am Auge eine Entzündung der Hornhaut (Photokeratitis) und Bindehaut (Photokonjunktivitis) entstehen, die auch als Verblitzen der Augen, Schweißblende oder Schneeblindheit bezeichnet wird. In Abbildung A.2 ist die spektrale Wirksamkeit (Darstellung der Wichtungsfunktion, die einer biologischen Wirkung entsprechen soll) 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 nach ein bis drei Tagen wieder abgeklungen.

Abb. A.2 Die Wirkung optischer Strahlung auf verschiedene Teile des Auges ist wellenlängenabhängig. Die Abbildung zeigt die relative spektrale Wirksamkeit zur Entstehung der Photokeratitis und Photokonjunktivitis (1).



(2) Nach langjähriger Einwirkung von UV-A-Strahlung kann ein Katarakt (Grauer Star) entstehen. Da sich die Wirkung der UV-A-Strahlung über Jahrzehnte kumuliert, kann es zu einer Trübung der Augenlinse kommen. Die Linse kann sich im Gegensatz zu den meisten anderen menschlichen Geweben nicht erneuern und muss bei starker Einbuße der Sehfähigkeit durch eine künstliche Linse ersetzt werden. In Deutschland werden ca. 600 000 Staroperationen pro Jahr durchgeführt, die zum Teil auf eine zu hohe Lebensdosis an UV-A-Strahlung zurückzuführen sind (aktuelle Zahlen findet man unter (5)).

## 2.2 Wirkung von sichtbarer und IR-Strahlung auf das Auge

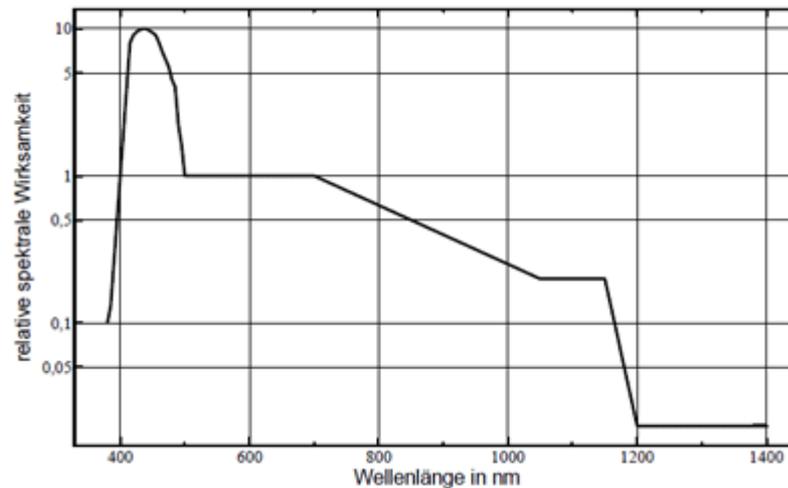
(1) Strahlung im Bereich von etwa 300 nm bis 1400 nm kann bis zur Netzhaut vordringen (8). Das Sehvermögen ist auf den Spektralbereich 380 nm bis 780 nm begrenzt und diese für den Menschen sichtbare Strahlung wird als Licht bezeichnet. Strahlung gelangt durch die Hornhaut, die Augenlinse und den Glaskörper und wird auf der Netzhaut abgebildet. Netzhautschädigungen sind besonders schwerwiegend und können zu erheblichen Beeinträchtigungen des Sehvermögens führen. Schäden können durch intensive optische Strahlungsquellen hervorgerufen werden.

(2) Kleinere Schädigungen der Netzhaut bleiben meist unbemerkt, soweit sie außerhalb des Flecks des schärfsten Sehens liegen. Größere geschädigte Stellen können jedoch zu Ausfällen im Gesichtsfeld führen. Bei einer Schädigung an der Stelle des schärfsten Sehens kann das Scharfsehen und das Farbsehvermögen stark verringert werden. Wird gar der Blinde Fleck getroffen, droht die völlige Erblindung, da dort alle Sehnerven gebündelt und in das Gehirn geleitet werden. Im Hinblick auf eine potenzielle Netzhautschädigung muss besonders berücksichtigt werden, dass darüber hinaus auch optische Strahlung im IR-A-Spektralbereich bis 1400 nm von der Augenlinse auf die Netzhaut fokussiert wird. Obwohl sie nicht wahrgenommen werden kann, weil die Netzhaut für diese Wellenlängen keine Rezeptoren besitzt, kann sie dort Schädigungen hervorrufen. Eine Netzhautschädigung ist irreversibel.

(3) Im sichtbaren Bereich wird zwischen den thermischen und den fotochemischen Netzhautschäden unterschieden.

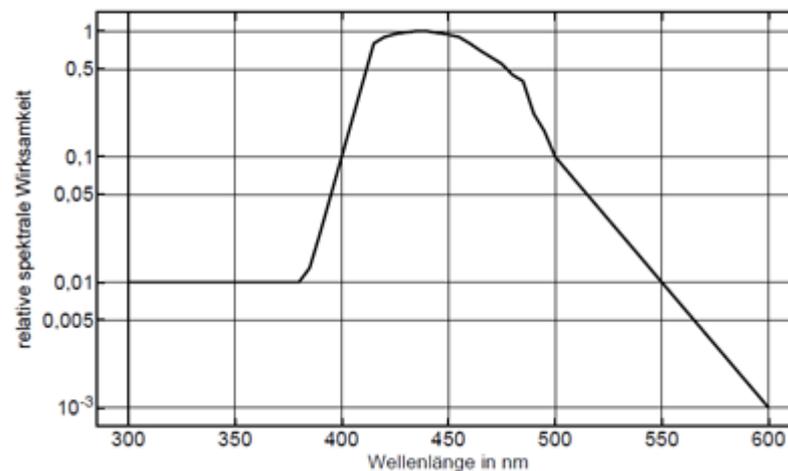
(4) **Thermische Effekte** dominieren im langwelligen Teil des sichtbaren Spektrums und im IR-Spektralbereich: Die im Gewebe enthaltenen Moleküle führen verstärkt Schwingungen aus, die eine Erhitzung des Gewebes bewirken. Die entstehende Wärme wird auf das umliegende Gewebe übertragen. Bleibt die Temperatur des Gewebes auch bei länger dauernder Exposition unterhalb eines Schwellenwertes, so ist keine Schädigung zu befürchten. Erst bei Überschreitung dieses Wertes kann aufgrund einer lokalen Temperaturüberhöhung ein Schaden entstehen. In Abbildung A.3 ist die relative spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautschädigung dargestellt.

Abb. A.3 Relative spektrale Wirksamkeit zur thermischen Netzhautschädigung



(5) Beim **fotchemischen Effekt** 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 kurzwelligigen sichtbaren Spektralbereich. Bei der fotochemischen Wirkung kann die Absorption zu Schädigungen auf molekularer Ebene führen. Diese Veränderungen sind kumulativ. In Abbildung A.4 ist die relative spektrale Wirksamkeit zur fotochemischen Netzhautschädigung dargestellt.

Abb. A.4 Relative spektrale Wirksamkeit zur fotochemischen Netzhautschädigung



(6) Strahlung im Spektralbereich von 300 nm bis 700 nm kann zu fotochemischen Schädigungen im Auge führen (9). Dieser Bereich beinhaltet Teile der UV-B-Strahlung, die gesamte UV-A-Strahlung und den größten Teil der sichtbaren Strahlung. Die damit verbundene Gefährdung, dessen Maximum im blauen Bereich liegt, wird als „Blaulichtgefährdung“ bezeichnet und kann zu einer dauerhaften Beeinträchtigung des Sehens führen.

(7) Auch eine **langjährige Einwirkung** von **IR-Strahlung** kann zu einer Linsentrübung (Katarakt) führen. Diese Schädigung ist irreversibel und kann zur vollständigen Erblindung führen. Eine getrübe Augenlinse kann heute operativ durch eine künstliche Linse ersetzt werden. Ein Beispiel für Tätigkeiten, bei denen nach langjähriger Einwirkung von IR-Strahlung eine Linsentrübung auftreten kann, ist die Arbeit von Glasmachern an Glasschmelzöfen. Im IR-Spektralbereich oberhalb einer Wellenlänge von etwa 2500 nm ist nur noch die Hornhaut betroffen (10).

## 2.3 Indirekte Auswirkungen inkohärenter optischer Strahlung

(1) Unterhalb der Schädigungsgrenze kann Strahlung aus dem sichtbaren Spektralbereich durch ihre vorübergehende **Blendwirkung** ein hohes sekundäres Gefahrenpotenzial besitzen. Nach dem Blick in helle, grelle Lichtquellen, z. B. Scheinwerfer oder Projektoren, können temporär eingeschränktes Sehvermögen und Nachbilder je nach Situation zu Irritationen, Belästigungen, Beeinträchtigungen und sogar zu Unfällen führen. Grad und Abklingzeit der Blendeffekte sind nicht einfach quantifizierbar. Die Blendwirkung hängt jedoch maßgeblich vom Helligkeitsunterschied zwischen Blendquelle und Umgebung, von der ausgeübten Tätigkeit und von den Expositionsparametern wie Bestrahlungsstärke, Wellenlänge und Expositionsdauer ab.

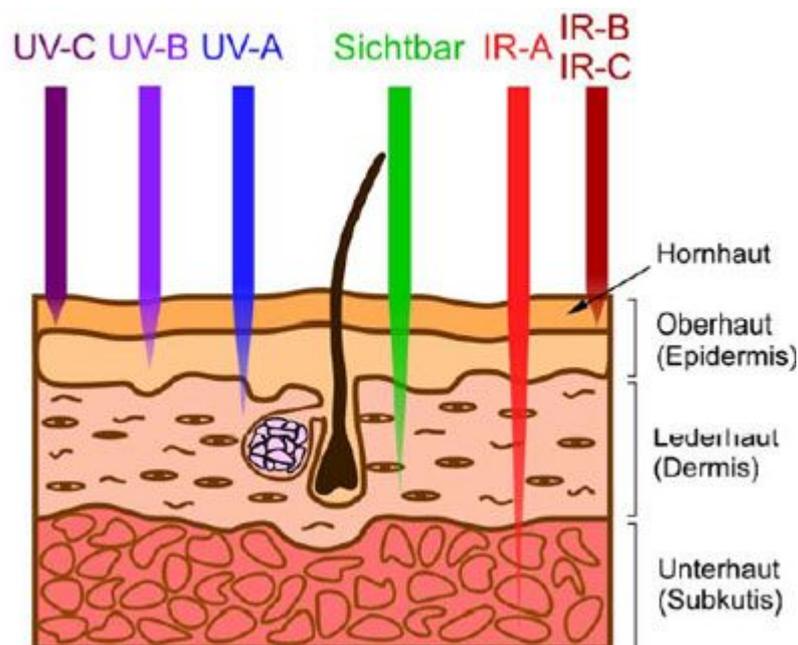
(2) Auch Stroboskopeffekte können zu Gefährdungen durch indirekte Auswirkungen im Sinne der OStrV führen. Beispielsweise können bewegte Maschinenteile dadurch nicht mehr als solche erkannt werden.

## 3 Die Haut

### 3.1 Absorption in Abhängigkeit der Wellenlänge

(1) Ein wesentlicher Bestandteil des Hautgewebes ist Wasser. Bei der Haut, wie auch bei allen anderen biologischen Geweben, ist eine starke Zunahme der Absorption bei kürzeren Wellenlängen festzustellen (Abbildung A.5). 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. A.5 Eindringvermögen verschiedener Wellenlängen in die Haut. Die Pfeilstärke weist auf die Abnahme der Strahlung mit der Tiefe im Gewebe hin.



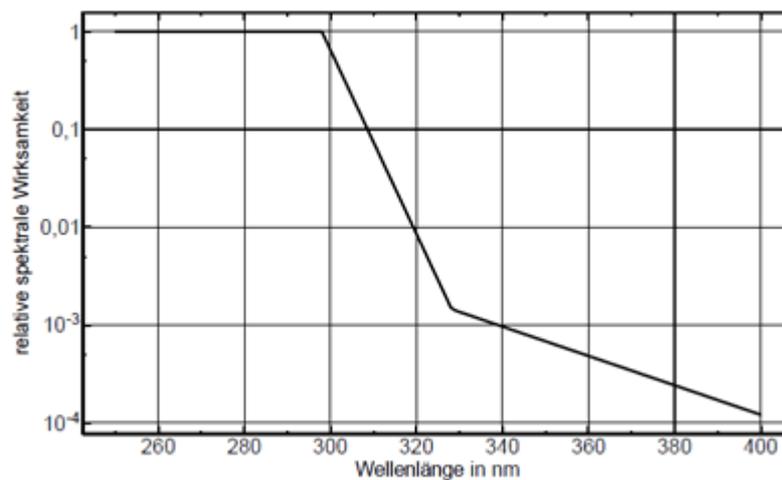
(2) UV-A-Strahlung bewirkt in der Haut eine Sofortpigmentierung (Bräunung) ohne vorherige Erythembildung (Rötung der Haut, Sonnenbrand). Eine weitere Wirkung der UV-A-Strahlung ist die vermehrte Bildung von Hornhaut (Lichtschwiele). Diese Verdickung der Hornhaut und die stärkere Pigmentierung liefern für den Schutz

vor inkohärenter optischer Strahlung keinen relevanten Beitrag (3) und werden daher bei der Gefährdungsbeurteilung nicht berücksichtigt.

## 3.2 Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut

(1) Die wichtigste akute biologische Wirkung der UV-B- und UV-C-Strahlung ist die Erythembildung („Sonnenbrand“). Sie kann durch künstliche oder natürliche UV-Strahlung hervorgerufen werden. Die Symptome treten in der Regel zwei bis acht Stunden nach Überschreiten einer individuellen Schwellenbestrahlung 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, wobei sich die Wahrscheinlichkeit für eine langfristige Schädigung im Verlauf des Lebens erhöht.

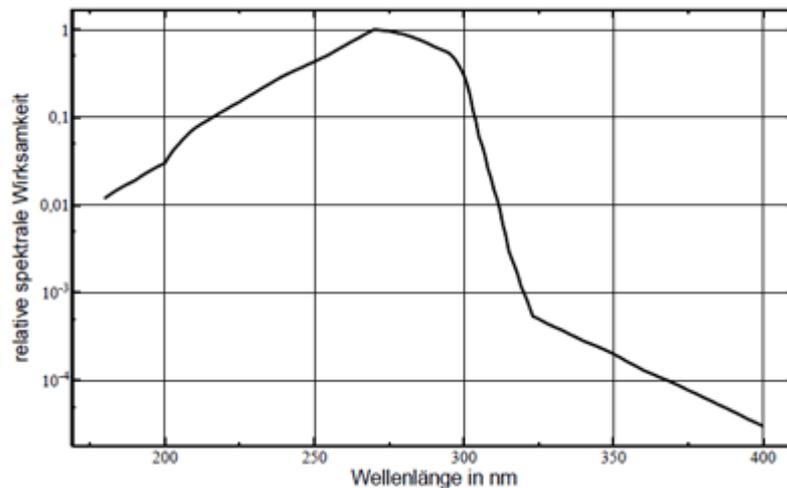
Abb. A.6 Relative spektrale Wirksamkeit zur Bildung des Erythems nach dem Stand der Technik (1)



(2) Die Wichtungsfunktion für die Bildung des Erythems zeigt für den Wellenlängenbereich von 250 nm bis 297 nm ein Maximum und fällt in dem Bereich von 300 nm bis 328 nm etwa um den Faktor 1000 steil ab (Abbildung A. 6). Die Erythemwirksamkeit im UV-A-Bereich ist im Vergleich zum Großteil der UV-B-Strahlung wesentlich schwächer (um den Faktor 1000 bis 10 000). Diese Werte gelten für eine gesunde, nicht vorgebräunte Haut und können für Personen mit erhöhter Fotosensitivität nicht herangezogen werden.

(3) Unter Berücksichtigung der relativen spektralen Wirkungsfunktionen für Auge und Haut (Abbildungen A.2 und A.6) ist in Anhang 2 der TROS IOS, Teil 2 „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung“ eine relative Wichtungsfunktion  $S(\lambda)$  (Abbildung A.7) angegeben. Inkohärente optische Strahlungsquellen werden im Wellenlängenbereich von 100 nm bis 400 nm nach dieser Wichtungsfunktion gemeinsam für Haut und Auge bewertet.

Abb. A.7 Relative Wichtungsfunktion  $S(\lambda)$  für Auge und Haut



(4) Nach langjähriger Einwirkung von UV-Strahlung, vornehmlich aus dem UV-A-Bereich, kann als chronische Schädigung eine vorzeitige Hautalterung (Elastose) auftreten. Diese fotoinduzierte Bindegewebsveränderung ist durch eine faltige Lederhaut und mangelnde Hautelastizität gekennzeichnet.

(5) Die UV-Strahlung ist nach der International Agency for Research on Cancer (IARC, englisch für Internationale Krebsforschungsagentur) als krebserzeugend eingestuft (11). Wieviel 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 oder jeden Besuch im Solarium. Wer sich häufig der UV-Strahlung aussetzt, hat ein erhöhtes Risiko für Schädigungen des Erbgutes der Zellen in der Haut. Diese Zellen (deren Schädigung auch unterhalb der Rötung der Haut möglich ist) können dann zur Entstehung von Hautkrebs beitragen.

Hinweis:

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

### 3.3 Fototoxische oder fotoallergische Hautreaktionen

Eine weitere akute Wirkung der UV-Strahlung können fototoxische oder fotoallergische Hautreaktionen sein. Bei der fototoxischen Hautreaktion werden durch bestimmte Substanzen im Körper oder an der Hautoberfläche (z. B. Kosmetika oder Medikamente) unter Einwirkung von UV-Strahlung Entzündungen ausgelöst. Bei der fotoallergischen Hautreaktion wird eine Substanz durch UV-Strahlung chemisch aktiviert und umgewandelt und kann so eine Sensibilisierung der Haut hervorrufen. In beiden Fällen besteht dann eine besondere Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung (z. B. am Arbeitsplatz durch Teer, Pech oder bestimmte pflanzliche Stoffe). In einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission sowie im DGUV-Grundsatz G17 werden fototoxische und fotoallergische Substanzen aufgeführt [(4), (12)].

### 3.4 Wirkung von sichtbarer und IR-Strahlung auf die Haut

(1) Sichtbare optische Strahlung kann bei entsprechendem Ausmaß zu einer gefährdenden Hauterwärmung führen und auch fotosensitive Reaktionen hervorrufen.

(2) Die Photonenenergie von sichtbarer und IR-Strahlung ist zu gering (kleiner als 3,26 eV), um ionisierend zu wirken. Strahlung mit Wellenlängen bis ca. 550 nm kann jedoch einige kovalente Molekülbindungen aufbrechen;

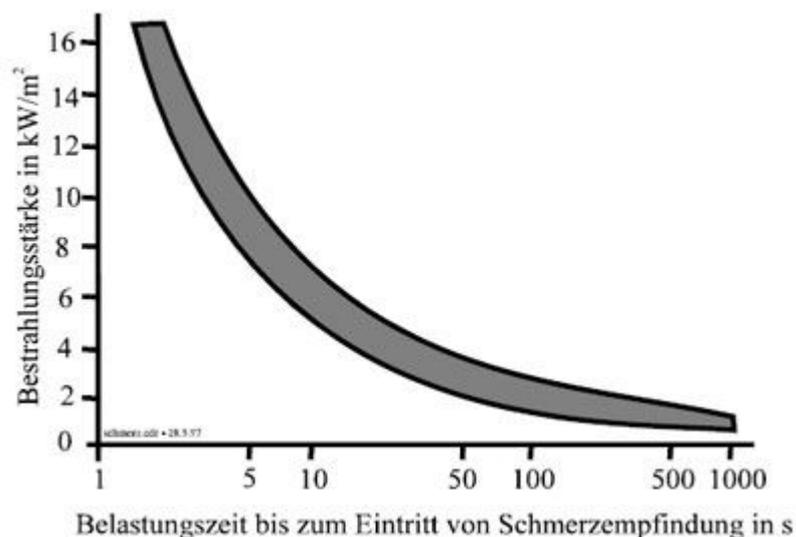
bei Wellenlängen bis ca. 660 nm ist das Aufbrechen von chemischen Bindungen möglich. Insbesondere für größere Wellenlängen ist der wesentliche Wirkmechanismus neben diesen fotochemischen Prozessen die Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärme. Deren Wirkung beruht auf einer entsprechenden Temperaturerhöhung. Das Eindringvermögen der Strahlung ins Gewebe und der Ort der Umwandlung in Wärme hängen stark von der Wellenlänge ab. In Abbildung A.5 wird dies an Hand des unterschiedlichen Eindringvermögens in der Haut schematisch dargestellt, in Abbildung A.1 für das Auge. Von den einzelnen Schichten der Haut und des Auges wird immer nur ein Teil der einfallenden Strahlung absorbiert.

(3) Bestrahlungsstärken im sichtbaren Spektralbereich können, wie bei der Infrarotstrahlung, zu mehr oder weniger starker Hauterwärmung führen. Über dadurch verursachte Hautschäden wurde bisher wenig bekannt.

(4) Durch Licht, vermutlich auch durch UV-A-Strahlung, kann eine Lichtdermatose, vielfach „Lichtallergie“ genannt, ausgelöst werden. Dabei scheint ein körpereigenes Allergen aktiviert zu werden, was sich in einer Art Nesselsucht äußert, bei der Jucken, Brennen, Rötung und Quaddeln auftreten können.

(5) Bei Einwirkung hoher Bestrahlungsstärken von IR-Strahlung auf die Haut kann es zur Verbrennung der Haut kommen. IR-Strahlung dringt in Abhängigkeit von der Wellenlänge unterschiedlich weit in die Haut ein (siehe Abbildung A.5). Strahlung mit einer Wellenlänge von 1000 nm wird überwiegend bis in etwa 1 mm Tiefe in der Haut absorbiert, längerwellige Strahlung bereits in der Epidermis, d. h. in einigen 10 µm Tiefe, also in der aus abgestorbenen Zellen bestehenden Hornhaut.

Abb. A.8 Schmerzgrenze der unbedeckten Haut in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke (13)



(6) Insbesondere bei größeren Wellenlängen (z. B. 10 µm) führt dies bei hoher Bestrahlungsstärke zu starker lokaler Erwärmung. Wegen der beteiligten Wärmetransportvorgänge ist die Bestrahlungsstärke, die zu einer Verbrennung führt, von der Dauer der Einwirkung abhängig. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung A.8 dargestellt. Dabei ist in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer diejenige Bestrahlungsstärke aufgezeichnet, die zu einer Schmerzempfindung führt; dies bildet das Vorstadium zu einer Verbrennung. So führt z. B. eine Bestrahlungsstärke von etwa 7 kW/m<sup>2</sup> bis 10 kW/m<sup>2</sup> nach etwa 5 s zu einer Schmerzempfindung und kurz darauf zur Verbrennung. Aber schon Bestrahlungsstärken von ca. 1,5 kW/m<sup>2</sup> führen bei längerer Bestrahlung (über 10 min) zu Schmerzempfindungen.

## Literaturhinweise

(1)

- DIN 5031-10:2000-03, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren (wird z. Z. überarbeitet)
- (2) Sutter, E.: Schutz vor optischer Strahlung, VDE Schriftenreihe 104, VDE Verlag GmbH (2008)
- (3) Licht und Schatten – Schutz vor Sonnenstrahlung für Beschäftigte im Freien, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, ISBN 978-388261-570-8
- (4) 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
- (5) Augenärzte informieren: Staroperation und Intraokularlinse, Berufsverband der Augenärzte Deutschlands e.V. (BVA), 2009  
<http://www.augeninfo.de/patinfo/catop.pdf>
- (6) RICHTLINIE 2006/25/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES 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)
- (7) Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung, Europäische Kommission, Generaldirektion Beschäftigung, Soziales und Integration, ISBN 978-92-79-16045-5, EU 2011
- (8) Boettner, E.A.; Wolter, J.R.: Invest. Ophthalmol. 6 (1), 776 (1962)
- (9) 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)
- (10) Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3µm). Health Physics 73 (3): 539-554; 1997
- (11) 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
- (12) DGUV Grundsätze für die arbeitsmedizinische Vorsorge, Grundsatz G17 „Künstliche optische Strahlung“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, DGUV 2012, Arbeit und Soziales, Ausgabe 10/2012
- (13) Bux, K.: „Klima am Arbeitsplatz: Stand arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschungen“; F 1987; Bundesanstalt für Arbeitsschutz; Dortmund 2006