

Fachverband für Strahlenschutz e.V.

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



Leitfaden „Sonnenstrahlung“

Vorwort und Impressum

Eines der Hauptziele der Arbeit des Arbeitskreises "Nichtionisierende Strahlung" (AKNIR) des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. (FS) ist es, Unterlagen in Form von Leitfäden für die in diesem Arbeitskreis fachlich abgedeckten Themengebiete zu erstellen. Darin werden die physikalischen Grundlagen und der derzeitige wissenschaftliche Erkenntnisstand über die biologischen Wirkungen der einzelnen Teilbereiche vermittelt. Darüber hinaus werden die zulässigen Expositionswerte und durchzuführende Schutzmaßnahmen aufgeführt.

Die Leitfäden sollen sowohl den im Arbeitsschutz tätigen Experten als auch jedermann die notwendigen Hilfestellungen geben, um sich über das jeweilige Thema sachlich zu informieren, eventuell die notwendigen Maßnahmen zu ergreifen, aber auch die mitunter von anderer Seite geschürten Ängste in der Öffentlichkeit vor nichtionisierender Strahlung durch sachliche Informationen zu relativieren, und zwar auf der Grundlage des Standes von Wissenschaft und Technik.

Der Leitfaden „Sonnenstrahlung“ wurde vom Arbeitskreis Nichtionisierende Strahlung des Fachverbandes für Strahlenschutz e. V. (Mitgliedsgesellschaft der International Radiation Protection Association (IRPA) für die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz) erarbeitet. Dem Arbeitskreis gehören Experten auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlung aus den Niederlanden, Österreich, Schweiz und Deutschland an.

Der Arbeitskreis Nichtionisierende Strahlung hat außerdem Leitfäden zu folgenden Themen erstellt:

- Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen
- Sichtbare und infrarote Strahlung
- Laserstrahlung
- Lichteinwirkungen auf die Nachbarschaft
- Elektromagnetische Felder
- Infraschall
- Ultraschall

Verfasser:

Jutta Brix
Martin Brose
Manige Fartasch
Werner Horak
Hermann Jossen
Emmerich Kitz
Peter Knuschke

Stand: 13.12.2012

Günter Ott
Jörg Reichrath
Hans-Dieter Reidenbach
Heinz R. Schmid
Harald Siekmann
Manfred Steinmetz
Thomas Völker

Redaktion und Bezug:

Prof. a. D. Dr. Hans-Dieter Reidenbach, FH Köln, Sekretär des AK NIR
FH Köln - Forschungsbereich Medizintechnik und Nichtionisierende Strahlung
Betzdorfer Str. 2
50679 Köln

Telefon: +49 221 - 8275 2003 ,
E-Mail: hans.reidenbach@fh-koeln.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Grundlagen zur Sonnenstrahlung.....	4
2.1	Die Sonne.....	4
2.2	Die Atmosphäre.....	6
2.3	Bodenbeschaffenheit.....	9
3	Unbewertete und bewertete Strahlungsgrößen.....	9
3.1	UV-Strahlung.....	9
3.2	VIS- und IR-Strahlung.....	11
4	Strahlungsmessungen.....	13
4.1	Physikalische Verfahren.....	13
4.2	Fotochemische Verfahren.....	15
4.3	Biologische Verfahren.....	16
4.4	Beobachten und Aufzeichnen der bodennahen solaren Strahlung.....	17
4.4.1	UV-Monitoring in Deutschland.....	17
4.4.2	UV-Monitoring in Österreich.....	18
4.4.3	UV-Monitoring in der Schweiz.....	19
4.4.4	Monitoring Globalstrahlung.....	20
4.4.5	Persönliche Messungen.....	20
5	Solare Strahlung in Deutschland.....	21
5.1	UV-Strahlung.....	21
5.2	Globalstrahlung.....	23
5.3	Sonnenscheindauer.....	24
5.4	Klimawandel.....	24
6	Wirkungen auf den Menschen.....	25
6.1	Biophysikalische Primärprozesse.....	25
6.2	Zellbiologische Wirkungen.....	27
6.3	Gesundheitliche Wirkungen.....	30
6.3.1	Das Auge.....	30
6.3.2	Die Haut.....	33
6.3.3	Gesamtorganismus.....	37
7	Gesundheitliche Bewertung der Sonnenstrahlung.....	37
7.1	Wirkungsfunktionen.....	38
7.2	UV-Index.....	39
7.3	UV-Vorhersage.....	41
8	Sonnenschutzempfehlungen.....	42
8.1	Empfehlungen für die Bevölkerung.....	42
8.2	Empfehlungen für Arbeitnehmer im Freien.....	46
8.2.1	Rechtliche Grundlagen.....	46
8.2.2	Gefährdungsermittlung und Risikobewertung.....	46
8.2.3	Schutzmaßnahmen.....	47
9	Literatur.....	51

1 Einleitung

Sowohl im Berufsleben als auch im Freizeitbereich können Menschen der Sonnenstrahlung ausgesetzt sein. Die Sonne sendet neben sichtbarer Strahlung auch nicht sichtbare Strahlung aus, und zwar sowohl infrarote als auch ultraviolette Strahlung. Dieser Leitfaden beschäftigt sich vornehmlich mit dem ultravioletten (UV) Strahlungsanteil der Sonnenstrahlung, weil davon die hauptsächliche Gefährdung ausgeht.

Die UV-Strahlung ist so energiereich, dass schon geringe Bestrahlungsstärken für das ungeschützte Auge und die ungeschützte Haut ein erhöhtes gesundheitliches Risiko darstellen. Aufgabe eines wirksamen Strahlenschutzes ist es daher, auf die strikte Einhaltung der international anerkannten Grenzwertempfehlungen zu achten. Auf diese Weise können akute Schäden vermieden und chronische Effekte zumindest begrenzt werden. Bei der Bewertung des ultravioletten Strahlungsanteils der Sonne ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Wirkungsmechanismen gerade der chronischen Effekte, insbesondere Hautkrebs, nur teilweise aufgeklärt sind. Daher gilt es, bestehende Grenzwerte permanent dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand anzupassen bzw. bei Bedarf neue Grenzwertempfehlungen zu erarbeiten. Dabei tritt jedoch die Schwierigkeit auf, wie die im Laufe des Lebens aufgenommene individuelle UV-Exposition aktuell zu berücksichtigen und zukunftsweisend zu beurteilen ist. Es sollte aber auch berücksichtigt werden, dass eine genügende Vitamin D-Versorgung des Menschen notwendig ist und die UV-Bestrahlung der Haut dabei eine wichtige Rolle spielt.

Die Expositionsgrenzwerte für UV-Strahlung basieren auf Empfehlungen der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP). In der Schweiz sind die Expositionsgrenzwerte für UV-Strahlung der ICNIRP sowohl für künstliche wie auch für natürliche UV-Strahlung verbindlich [1]. Der UV-Index stellt für die Allgemeinheit eine gute Hilfe zur situativen Bewertung der Erythem-(Sonnenbrand)-Wirksamkeit der Sonnenstrahlung dar und bietet auch eine einfache Skala zur Festlegung allfällig notwendiger Schutzmaßnahmen [2].

2 Grundlagen zur Sonnenstrahlung

2.1 Die Sonne

Ein Leben auf der Erde ist ohne Sonne nicht denkbar. Die von der Sonne abgegebene optische Strahlung erwärmt den Boden, die Meere und die Atmosphäre und steuert damit das Wetter und das Klima. Vor allem der sichtbare Strahlungsanteil ("Licht") liefert die für das Pflanzenwachstum benötigte Energie. Durch die hohe Oberflächentemperatur der Sonne wird aber auch ein signifikanter Anteil ultravioletter, biologisch hochwirksamer Strahlung abgegeben.

Erst mit der Entwicklung der Kernphysik in den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts konnte das Prinzip der solaren Energieerzeugung erklärt werden. Im Sonnenzentrum wird durch Kernfusion eine Temperatur von fast 16 Mio. Grad erzeugt, und zwar durch Verschmelzung von Wasserstoffatomkernen zu Heliumatomkernen. Zunächst wird die freigesetzte Energie durch kurzwellige elektromagnetische Strahlung und dann durch Konvektion zum Sonnenrand transportiert [3]. In der Fotosphäre, der sichtbaren Oberfläche also, wo eine Temperatur von ca. 5900 K herrscht, wird die Strahlung abgegeben, die auch die Erde erreicht. Dabei können Sonnenflecken und das wabenartige Granulationsmuster (aufsteigende heiße Materie) beobachtet werden.

In Abb. 1 ist ein typisches Sonnenspektrum dargestellt, das oberhalb der Erdatmosphäre in ungefähr 20 km Höhe weitgehend dem Spektrum eines schwarzen Körpers von 5777 K Effektivtemperatur entspricht [4]. Von der Gesamtstrahlungsleistung der Sonne von ca. $3,8 \cdot 10^{26}$ W treffen ca. $1,7 \cdot 10^{17}$ W die Erde, was eine Gesamtbestrahlungsstärke außerhalb der Erdatmosphäre von 1367 W/m^2 ergibt (Solarkonstante). Die terrestrische Gesamtbestrahlungsstärke liegt in unseren Breiten durch die Absorption und Streuung der im schiefen Winkel durchstrahlten Atmosphäre tiefer, im Normspektrum nach IEC 60904-3 [5] wird von 1000 W/m^2 ausgegangen.

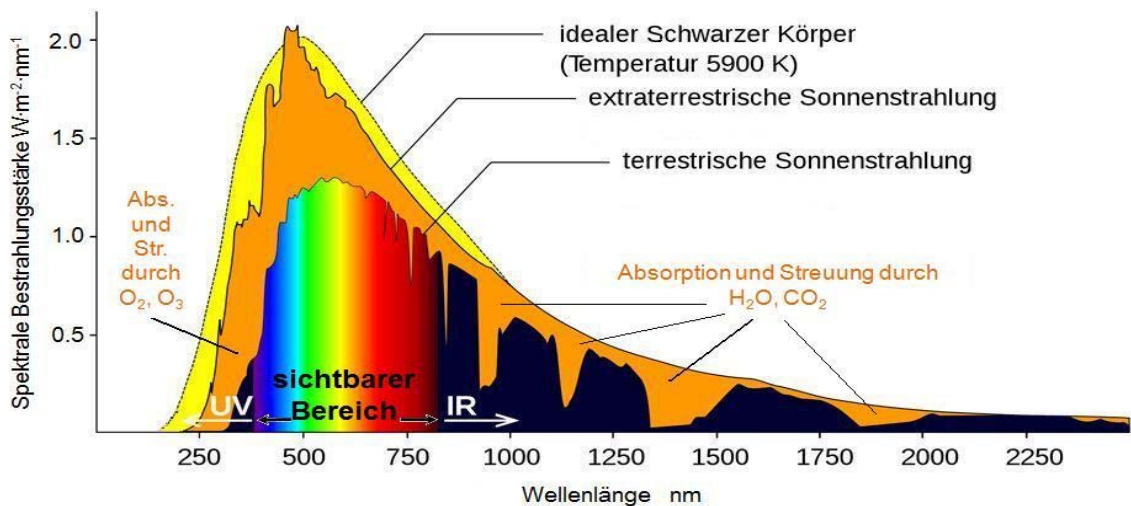


Abb. 1: Spektrale Bestrahlungsstärke eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ ; Sonnenspektrum außerhalb der Atmosphäre und in Erdbodennähe, Graphik aus Wikipedia überarbeitet.

Der meteorologisch bedeutsame Spektralbereich liegt bei 300 nm bis 3000 nm. Auf diesen entfallen etwa 96% der gesamten extraterrestrischen Sonnenstrahlung. Entsprechend der Oberflächentemperatur von 5900 K liegt das Maximum der Strahlung bei etwa 500 nm. In diesem grünen Bereich hat das menschliche Auge seine höchste spektrale Empfindlichkeit. Die prozentuale Zusammensetzung des Sonnenspektrums, die sich beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert (s. u.), ist in Tabelle 1 zusammen mit der Gesamtstrahlung aufgeführt.

Tab. 1: Relative Sonnenbestrahlungsstärkeanteile und Gesamtbestrahlungsstärke außerhalb der Atmosphäre und am Erdboden. *) Gesamtstrahlung bei klarem Himmel und senkrecht stehender Sonne, Quelle: 3.Bericht der Enquete-Kommission des 11.Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ 19/90 Band 1

Strahlungsanteile	Ultraviolett (UV-B) [%] 280-320 nm	Ultraviolett (UV-A) [%] 320-400 nm	Sichtbar (VIS) [%] 400-780 nm	Infrarot (IR) [%] > 780 nm	Gesamtstrahlung [W/m²]
außerhalb der Atmosphäre	1,6	6,5	47	44	1367
am Erdboden (Meereshöhe)	0,5	5,6	52	42	1120 *)

2.2 Die Atmosphäre

Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre verändern sich die Bestrahlungsstärke und spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung durch Absorption, Reflexion und Streuung. Je nach Sonnenstand durchlaufen die Sonnenstrahlen einen unterschiedlich langen Weg durch die Atmosphäre bis zur Erdoberfläche. Demnach ist die Zusammensetzung des Sonnenspektrums abhängig von der Tageszeit, der Jahreszeit, dem Breitengrad, der Bewölkung und der Höhenlage, erkennbar an der unterschiedlichen „Färbung“ der Sonne. In Deutschland erreicht die Sonne im Sommer eine maximale Höhe von 58° im Norden und 65° im Süden, im Winter eine maximale Höhe von 12° bzw. 19° . Der größte Teil der täglichen Bestrahlung (im Sommer ca. 66%, im Winter 75%) liegt in der Zeit von 2 Stunden vor bis zwei Stunden nach dem örtlichen Sonnenhöchststand.

UV-Strahlung

Die UV-Strahlung wird im Wesentlichen durch das Ozon in der Stratosphäre und Troposphäre absorbiert. Diese Filterfunktion ist für die UV-Strahlung stark wellenlängenabhängig. Mit kleiner werdender Wellenlänge unterhalb ca. 330 nm fällt die UV-Bestrahlungsstärke sehr stark ab. Man spricht auch von der sog. UV-B-Kante (Abb.2). Bei noch kleineren Wellenlängen unterhalb von ca. 290 nm ist die spektrale UV-Bestrahlungsstärke selbst im Sommer in unseren Breitengraden mit einem Wert $< 10^{-6} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ nicht mehr nachweisbar. Durch eine Verringerung der Ozonkonzentration in der Atmosphäre erhöht sich zum einen der Betrag der spektralen Bestrahlungsstärke. Zum anderen verschiebt sich auch die UV-B-Kante zu kürzeren Wellenlängen hin, d. h., zusätzliche sehr energiereiche UV-Strahlung erreicht damit den Erdboden [6]. Da die biologische Wirkung dieses Strahlungsanteils sehr groß ist, haben demnach auch kleine Änderungen des Ozongehaltes in der Stratosphäre ein durchaus ernst zu nehmendes Gefährdungspotential [7].

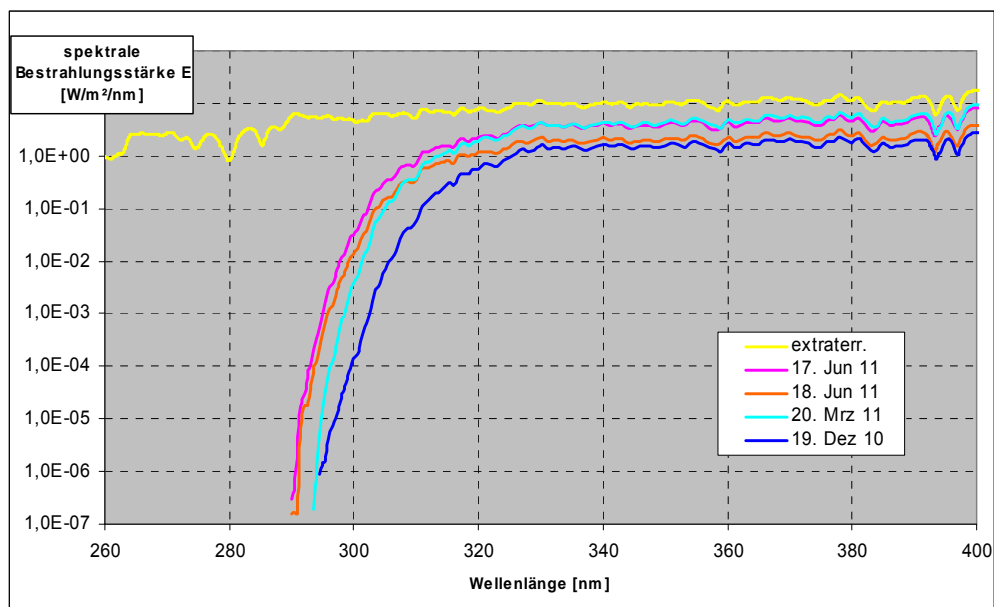


Abb.2: Einfluss von Ozon, Sonnenstand und Bewölkung auf die bodennahe UV-Strahlung. UV-Spektren bei klarem (17.6.) und stark bewölktem Himmel (18.6.) zum Jahressonnenhöchststand, bei klarem Himmel im Frühjahr (20.3.) und nahe am Jahressonnenniedrigstand (19.12.). Die Spektren wurden 2010 und 2011 jeweils um 12:00 Uhr MEZ in Neuherberg gemessen (extraterrestrisches Spektrum = relativer solarer spektraler Verlauf außerhalb der Erdatmosphäre).

Weiterhin unterliegt der Ozongehalt jahreszeitlichen Schwankungen. Nach Abb. 3 ist der Jahresgang des Gesamtozons mit einem Maximum im Frühjahr und einem Minimum im Herbst deutlich zu erkennen. Die Variabilität ist im Frühjahr am höchsten, allerdings zu einer Zeit, in der das Gesamtozon normalerweise sehr hoch ist [8].

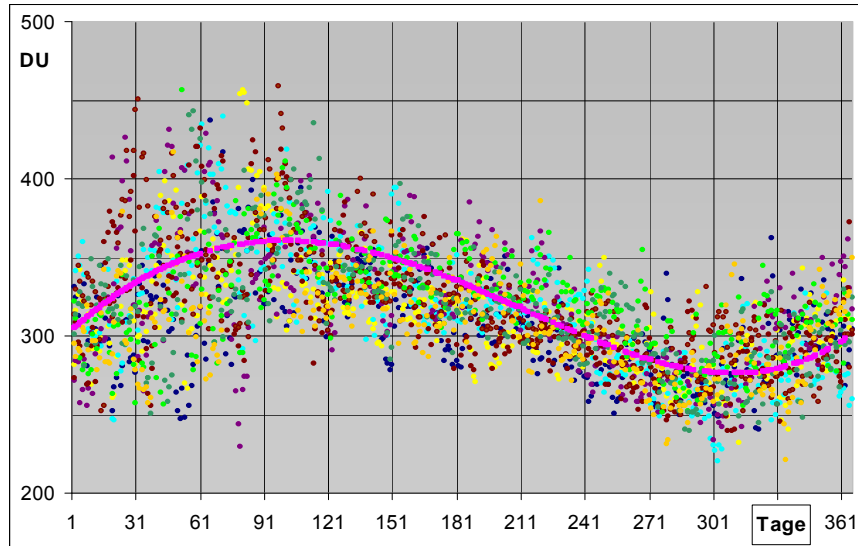


Abb.3: Jahresgang des Gesamtozons mit Mittelwertlinie. Quelle: M. Steinmetz, Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg. DU: Dobson Unit, ein Maß für die Ozonschichtdicke

In den letzten Jahren wurden zunehmend extrem niedrige Werte, so genannte „Mini-Ozonlöcher“, gerade im Spätwinter/Frühjahr registriert. Dies ist vornehmlich auf den Zustrom ozonarmer Luft aus subtropischen Breiten zurückzuführen. Durch die Auflösung des Polarwirbels im Frühjahr kann ebenfalls auf Grund des FCKW-bedingten Ozonabbaus polare Luft mit geringem Ozongehalt in die gemäßigten Breiten transportiert werden [9].

Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre wird die extraterrestrische UV-Strahlung außerdem signifikant durch Wolken geschwächt. Die Intensitätsminderung wird in erster Linie durch Streuprozesse an Wassertropfen und/oder Eiskristallen hervorgerufen. Da Wolken in Größe, Typ und Höhe über dem Erdboden stark variieren können, ist eine Angabe über die Schwächung der UV-Strahlung sehr schwierig. In diesem Punkt zeigen auch die existierenden Strahlungstransfermodelle ihre größten Unsicherheiten. Die Abschwächung des UV-Anteils kann beim Durchgang durch die Erdatmosphäre bis zu 90 % betragen. Auf der anderen Seite kann bei teilweise bewölktem Himmel die vom Erdboden in die Atmosphäre reflektierte UV-Strahlung an den Wolken in Richtung Boden rückreflektiert werden. Dadurch kann sich im Vergleich zu wolkenlosen Tagen die UV-Exposition in Bodennähe um ca. 10-20 % erhöhen.

Dunst, Spurengase sowie Luftverunreinigungen in der Atmosphäre können je nach ihrer Zusammensetzung zu Streuung und Absorption der einfallenden Strahlung führen und die UV-Strahlung bis zu 20 % schwächen. Demgegenüber nimmt die UV-Exposition je 1000 Höhenmeter um ca. 8-10 % zu [10].

VIS- und IR-Strahlung

Ein ganz wesentlicher Vorgang beim Auftreffen der Solarstrahlung auf der Erdoberfläche ist, wie bereits erwähnt, deren Erwärmung. Die sichtbare Strahlung wird vor-

nehmlich durch Streuung an Molekülen und Aerosolpartikeln, weniger durch schwache Absorption von Aerosolpartikeln, Ozon und anderen Spurengase geschwächt. Die infrarote Strahlung wird vornehmlich durch Absorption von Wasserdampf und Aerosolpartikel, weniger durch Streuung von diesen geschwächt. Dies führt zu ausgeprägten Bandlücken im Spektrum (s. Abb. 1).

Diese Strahlungsanteile der solaren Strahlung sind in erster Linie für den Strahlungshaushalt der Erde/Atmosphäre verantwortlich. Wegen der Kugelgestalt der Erde und nur hälftig der Sonne zugewandten Seite erhält die Atmosphäre nur ein Viertel der Solarkonstanten, also 342 W/m^2 . Durch die Reflexion in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche werden rund 30% bzw. 107 W/m^2 in den Weltraum unmittelbar zurückgestrahlt. Von den restlichen rund 70% bzw. 235 W/m^2 werden 67 W/m^2 von Wolken, Wasserdampf, Staub und Ozon in der Atmosphäre und 168 W/m^2 von der Erdoberfläche absorbiert und entsprechend erwärmt.

Das auf diese Weise erwärmte System Erde/Atmosphäre gibt die aufgenommene Energie als Wärmestrahlung im langwelligen IR-Bereich wieder ab. Dabei entspricht die Menge der gesamten an den Weltraum zurückgestrahlten Energie an der Obergrenze der Atmosphäre im Mittel genau der aufgenommenen Solarenergie. Andernfalls würde sich die Erde aufheizen bzw. abkühlen. Allerdings wird eine mittlerweile beobachtete globale Erwärmung auf den Treibhauseffekt zurückgeführt.

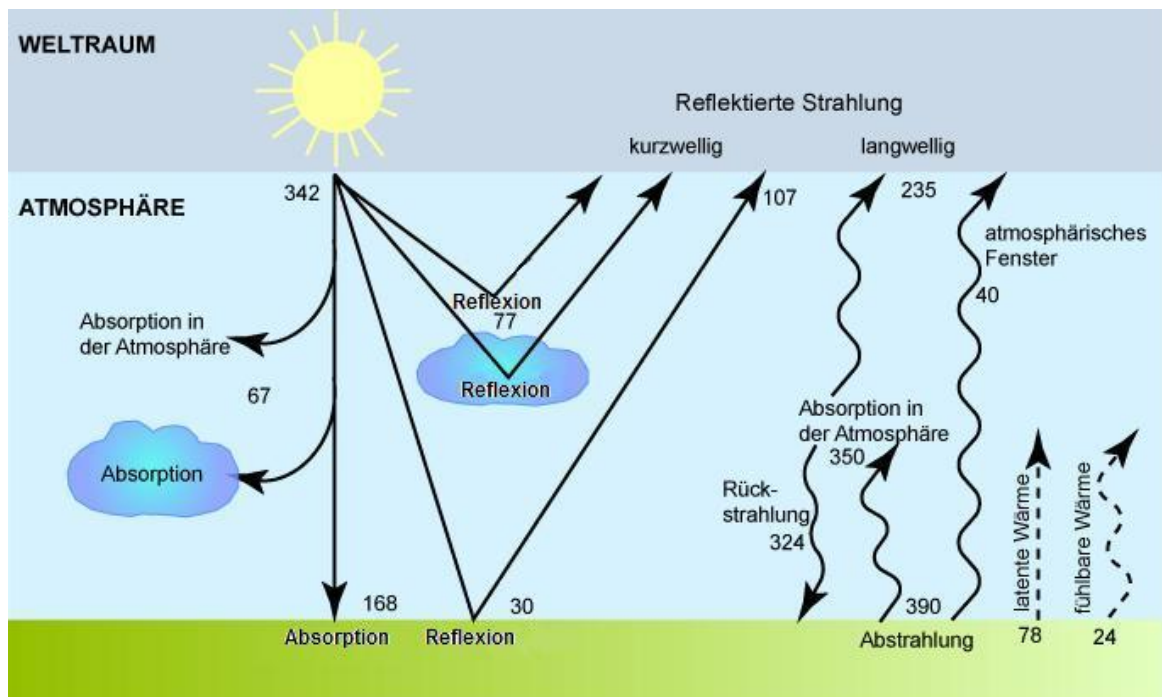


Abb.4: Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Die Werte sind in W/m^2 angegeben, Quelle: <http://www.hamburger-bildungsserver.de>

Unter einem Treibhauseffekt versteht man im Prinzip folgendes: kurzwellige Strahlung der Sonne trifft auf die Erdoberfläche und wird als langwellige Strahlung in die Atmosphäre zurückgestrahlt, die von Treibhausgasen dort fast vollständig absorbiert wird und diese erwärmt. Der von den erwärmten Gasen wiederum in Richtung der Erdoberfläche gerichtete langwellige Strahlungsanteil erwärmt die Erdoberfläche stärker, als dies allein durch die kurzwellige Strahlung der Sonne der Fall wäre. Die Treibhausgase Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Methan und Lachgas sind natürliche Bestandteile der Atmosphäre, daher wird die von ihnen verursachte Temperaturerhöhung als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet. Durch die Verbrennung

fossiler Rohstoffe (CO₂) und erhöhte Viehhaltung (Methan) verstärkt der Mensch diesen natürlichen Treibhauseffekt.

2.3 Bodenbeschaffenheit

Ein Teil der UV-Strahlung, die den Erdboden erreicht, wird von der Erdoberfläche absorbiert, ein Teil reflektiert. Der Anteil reflektierter Strahlung hängt von der Bodenbeschaffenheit ab. Die meisten natürlichen Oberflächenarten wie Gras, Erde und Wasser reflektieren bis zu 10% der einfallenden Strahlung. Höhere Werte von bis zu 20% werden von sandigem Boden und den Schaumkronen des Meeres, Werte von bis zu 80 % werden von Neuschnee, Eis und Gletscher reflektiert [10]. Im schneebedeckten Gebirge ist demzufolge selbst im März bei noch relativ niedrigen Sonnenständen mit durchaus hohen UV-Belastungen zu rechnen.

3 Unbewertete und bewertete Strahlungsgrößen

Die optische Strahlung ist Teil des elektromagnetischen Spektrums. Sie liegt zwischen den längeren, besonders im Funk verwendeten Mikrowellen und den kürzeren Wellenlängen, zu denen auch die Röntgenstrahlen gehören. Das optische Spektrum umfasst den Wellenlängenbereich von 100 nm bis 1 mm und ist aus biologischen Gründen in mehrere Bereiche unterteilt. Optische Strahlung wird durch Energieabgabe von angeregten Elektronen in Atomen und Molekülen und durch Veränderungen von molekularen Schwingungszuständen (Entstehung von Wärme) erzeugt.

3.1 UV-Strahlung

UV-Strahlung beinhaltet den energiereichsten Wellenlängenbereich optischer Strahlung. Die Einteilung in drei Bereiche, UV-A, UV-B und UV-C, erfolgte insbesondere unter Berücksichtigung der biologischen Wirkungen bzw. deren Wichtungsfunktion sowie der Strahlungsanteile im erdnahen Spektrum der Sonne (Tab. 2).

Tab. 2: Einteilung der UV-Wellenlängenbereiche nach CIE; International Lighting Vocabulary, 1987; DIN 5031, Teil 7*) Übergang bei einigen Organisationen bei 320 nm

Wellenlängenbereich	UV-C (nm)	UV-B (nm)	UV-A (nm)
Nach CIE, DIN, IEC und WHO, EU-Richtlinie	100 - 280	280 - 315 *)	315 *) - 400

UV-Strahlung ist nicht sichtbar und nicht direkt wahrnehmbar. Eine indirekte Wahrnehmung erfolgt am ehesten über biologische Reaktionen wie z. B. Sonnenbrand oder Hornhaut- und Bindehautentzündung ("Verblitzung") der Augen.

Auf Grund unterschiedlicher Wellenlängen wird die UV-Strahlungsenergie durch das menschliche Gewebe nicht gleichmäßig aufgenommen, sondern selektiv von speziellen Molekülen absorbiert. Welcher Anteil der auf die Oberfläche auftreffende Strahlung im bestrahlten Gewebe absorbiert und dann zur fotobiologischen Wirkung kommt, hängt von dessen molekularer Zusammensetzung ab. Demzufolge muss zwischen unbewerteten Strahlungsgrößen der auftreffenden Strahlung und den bewerteten, die fotobiologische Wirksamkeit berücksichtigenden Strahlungsgrößen, unterschieden werden.

Die Beurteilung der biologischen Wirksamkeit kann durch die Einteilung des UV-Spektrums in drei Bereiche nur grob gemacht werden. Insbesondere an der Grenze zwischen UV-A und UV-B ergeben sich erhebliche Auswirkungen, wenn die Wellenlängen nicht genügend genau berücksichtigt werden. Da die Wirksamkeit der UV-Strahlung stark von der Wellenlänge abhängig ist, werden die verschiedenen biologischen Effekte, wie z. B. Pigmentierung und Erythem, besser durch spektrale biologische Wirksamkeiten $s(\lambda)_{rel,biol}$ beschrieben. Man beschreibt diesen Zusammenhang auch in spezifischen Aktionsspektren. Die spektrale biologische Wirksamkeit im UV-Bereich ist im Leitfaden „Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen“ (FS-05-131-AKNIR, zurzeit in Überarbeitung) ausführlich dargestellt.

Im Folgenden werden die Berechnungsformeln für die Größen des Strahlungsfeldes angegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Summenwirkung aus den verschiedenen Wellenlängenbereichen unabhängig von der Art der jeweiligen Teilstrahlungen linear ist.

Die fotobiologisch wirksame Bestrahlungsstärke E_{biol} ergibt sich im Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2 aus den spektralen Bestrahlungsstärken $E_\lambda(\lambda)$ und den relativen spektralen biologischen Wirksamkeiten $s_{rel,biol}(\lambda)$ durch:

$$E_{biol} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(\lambda) \cdot s_{rel,biol}(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (1)$$

Sie wird in der Einheit W/m^2 angegeben. In Gl. (1) bedeutet die spektrale Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$ eine auf eine Fläche fallende, unbewertete Strahlungsleistung in einem infinitesimalen Wellenlängenintervall bei der Wellenlänge λ . Sie ist auf die betreffende Fläche und das Wellenlängenintervall bezogen. Spektrale Größen werden spektralradiometrisch ermittelt und sind mit dem jeweils in Betracht kommenden Aktionsspektrum zu gewichten. Näheres dazu in den Kapiteln 6 und 7.

Die biologisch wirksame Bestrahlung H_{biol} wird in der Einheit J/m^2 angegeben und ergibt sich aus der biologisch wirksamen Bestrahlungsstärke E_{biol} und der Einwirkungsdauer $t_2 - t_1$:

$$H_{biol} = \int_{t_1}^{t_2} E_{biol} \cdot dt \quad (2)$$

Zur Erzeugung eines wahrnehmbaren Erythems (Hautrötung) ist eine Mindestbestrahlung $H_{s,er}$ (Schwellenbestrahlung für Erythem) erforderlich. Diese wird in der Literatur oft auch als Minimale Erythemdosis (MED) bezeichnet, und deren Wert ist abhängig vom Hauttyp. Gelegentlich wird auch der hauttypunabhängige Begriff „Standard-Erythem-Dosis (SED)“ verwendet mit $1 \text{ SED} = 100 \text{ J/m}^2$. Für die hellhäutigen Europäer der Hauttypen I-IV (s. Kap. 6) betragen die MED-Werte:

Tab.3: Minimale Erythemdosis (MED) für verschiedene Hauttypen

Hauttyp	I	II	III	IV
Minimale Erythemdosis $H_{s,er}$	200 J/m^2	250 J/m^2	300 J/m^2	450 J/m^2

3.2 VIS- und IR-Strahlung

Der mit den Augen wahrnehmbare optische Strahlungsanteil heißt sichtbare Strahlung und wird allgemein mit VIS (visible) abgekürzt. Der daran angrenzende längerwellige Anteil wird als Infrarot-(IR-) Strahlung bezeichnet und ebenfalls in drei Bereiche unterteilt (Tab. 4). IR-Strahlung ist nicht sichtbar, allerdings über Wärmerezeptoren direkt wahrnehmbar. Die Augenmedien sind für den IR-A-Anteil bis zur Netzhaut durchlässig.

Wie bei der UV-Strahlung wird auch bei der sichtbaren Strahlung und bei der kürzerwelligen IR-Strahlung die Strahlungsenergie vom exponierten Objekt nicht gleichmäßig aufgenommen, sondern noch selektiv von speziellen Molekülen absorbiert. Auch hier ist zwischen unbewerteten (physikalischen) und bewerteten (fotobiologisch wirksamen) Strahlungsgrößen zu unterscheiden.

Tab. 4: Einteilung der UV-Wellenlängenbereiche nach CIE; *International Lighting Vocabulary*, 1987; DIN 5031, Teil 7; *) Überlappung mit UV-A-Bereich, siehe Tab. 2

Wellenlängenbereich	VIS (nm)	IR-A (nm)	IR-B (nm)	IR-C (nm)
Nach CIE, DIN, IEC und WHO EU-Richtlinie	380 *) - 780	780 - 1400	1400 - 3000	3000 - 1 000 000

Im Folgenden werden die Berechnungsformeln für die Größen des Strahlungsfeldes angegeben. Zum einen werden die radiometrischen Größen der Bestrahlungsstärke E in $W \cdot m^{-2}$ und der Bestrahlung H in $J \cdot m^{-2}$, die die Bestrahlung einer Oberfläche beschreiben, benötigt. Zum anderen ist für das optische Spektrum außerhalb des UV-Bereiches die Strahldichte L in $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ einer ausgedehnten Quelle, die ein Bild auf der Netzhaut ergibt, zu bestimmen. Diese erhält man aus der spektralen Strahldichte $L_\lambda(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2 aus:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (3)$$

Dabei stellt die spektrale Strahldichte $L_\lambda(\lambda)$ den Quotienten aus der Strahlungsleistung und dem Produkt aus der Fläche eines Querschnittes senkrecht zur Strahl(bündel)-Ausbreitung und dem durchstrahlten Raumwinkel dar, und zwar in einem infinitesimalen Wellenlängenbereich.

Die biologisch wirksame Strahldichte L erhält man durch Bewertung mit der relativen spektralen Wirksamkeit für Blaulichtgefährdung, $B_\lambda(\lambda)$ bzw. durch Bewertung mit der relativen spektralen Wirksamkeit für die thermische Schädigung der Netzhaut, $R_\lambda(\lambda)$ aus:

$$L_{bl} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) \cdot B_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4a)$$

bzw.

$$L_{th} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda(\lambda) \cdot R_\lambda(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (4b)$$

Die relative spektrale Wirksamkeit für Blaulichtgefährdung $B_\lambda(\lambda)$ ist dabei im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 700 nm gegeben [11]. Sie berücksichtigt die Möglichkeit eines fotochemisch erzeugten Netzhautschadens und ist insbesondere auf den kurzwelligen Teil des sichtbaren Spektrums beschränkt, wobei sich der Bereich wegen der teilweisen Überlappung (siehe Tab. 2) auch in das UV-Gebiet erstreckt. Die relative spektrale Wirksamkeit für thermische Gefährdung der Netzhaut $R_\lambda(\lambda)$ gilt im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1400 nm [12].

Bei gegebener Strahldichte L und relativ kleiner Fläche der Quelle lässt sich für die Strahlung, die sich senkrecht zur Oberfläche der Quelle ausbreitet, die Bestrahlungsstärke E durch Multiplikation mit dem Raumwinkel Ω , unter dem das Auge eine Quelle sieht, berechnen:

$$E = L \cdot \Omega. \quad (5)$$

Die mit der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ gewichtete Strahldichte beschreibt die Helligkeit einer Quelle. Im sichtbaren Spektralbereich wird eine optische Quelle auch durch die fotometrischen Größen der Leuchtdichte L_v in cd/m^2 in ihrer Helligkeit und durch die Beleuchtungsstärke E_v in lm/m^2 bzw. lx (Lux) als Lichtstrom auf einer Fläche ausgedrückt und dabei mit der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion für das Tagessehen $V(\lambda)$ bewertet. Näheres wird im Leitfaden „sichtbare und infrarote Strahlung“ beschrieben.

Zusätzlich zum thermischen und insbesondere fotochemischen Gefährdungspotenzial der Sonnenstrahlung kann es in manchen Fällen auch wichtig sein, die Möglichkeiten einer indirekten Gefährdung durch vorübergehende Blendung zu kennen und in die Gesamtbetrachtung möglicher Risiken einzubeziehen. Eine vorübergehende Blendung stellt nicht nur während des direkten Blicks in die Sonne, sondern aufgrund des damit verbundenen Nachbildes, eine über das eigentliche Blendereignis hinausgehende Beeinträchtigung des Sehvorganges dar.

Ohne detaillierte Angaben zum funktionalen Zusammenhang machen zu wollen, kann hierzu aber dennoch festgehalten werden, dass z. B. „der Blick in die Sonne“ für eine Zeitdauer von 1 s hinsichtlich der Sehbeeinträchtigung beim Lesen eines Textes vergleichbar ist mit einem 0,5 s langen Blick in einen grünen Laserpointer mit einer Leistung von nur 10%, wie sie in der Klasse 1 erlaubt ist, und ein Blick in die Sonne von z. B. 3 s vergleichbar ist mit einem Blick in einen grünen Laserstrahl mit einer Leistung von 60% der Klasse 2 für eine Zeitdauer von nur 0,25 s oder aber 1 s lang in einen roten Laserstrahl eines Klasse 1-Lasers mit maximal erlaubter Leistung. Nach einem nur 1 bis 3 Sekunden dauernden Blick in die Sonne muss mit einem Sehhandicap von 3 bis 11 Sekunden, also von etwa dreifacher Dauer, gerechnet werden. Dies ist sicherlich bei vielen Tätigkeiten nicht mehr tolerabel und kann zu gefährlichen Situationen bei beruflicher Tätigkeit, aber auch im Alltag führen, so z. B. im Straßenverkehr.

4 Strahlungsmessungen

Optische Strahlung wird durch die Wirkung nachgewiesen, die sie beim Auftreffen auf Materie hervorruft, z.B. Erwärmung, elektrische Energieerzeugung (Photostrom), Elektronenemission (äußerer Photoeffekt), sowie Ablauf von chemischen und biologischen Reaktionen. Aufgabe der Radiometrie ist es, die von der Materie absorbierte bzw. emittierte Strahlungsleistung zu messen. Für die Erfassung von photochemischen oder photobiologischen Wirkungen werden bewertete Strahlungsgrößen

benötigt, zu denen die dazugehörigen Bewertungsfunktionen (s. Kap. 7) vorhanden sein müssen. Ein Sonderfall ist die Bewertung der Strahlung mit der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion des menschlichen Auges. Messung dieser Größen ist Aufgabe der Photometrie.

4.1. Physikalische Verfahren

Bei der Auswahl geeigneter Detektoren spielt die Energie der Photonen eine wichtige Rolle. Für energiereiche Photonen, bzw. Strahlung im UV- und kurzwelligen VIS-Bereich findet der Photoeffekt Anwendung, d.h. Photonen können beim Auftreffen auf eine Metalloberfläche Elektronen herauslösen, sofern sie die Ablösearbeit des Metalls überwinden können. Diese Elektronen können entweder direkt als Stromfluss registriert werden oder bei geringem Signal mit einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) verstärkt werden. Die Kombination von Photokathode und SEV nennt man Photomultiplier (PMT).

Strahlung im langwelligen UV- und VIS-Bereich kann mit dem inneren lichtelektrischen Effekt einer Siliziumscheibe nachgewiesen werden, auf dessen Bildelementen bei Belichtung Elektronen erzeugt werden (CCD - Teilchendetektoren). Strahlung im VIS und vor allem IR-Bereich wird durch den Temperaturanstieg von geeigneten Detektoren mit geschwärzter Empfängerfläche nachgewiesen.

Messgerät Optometer

Unter einem **Optometer** wird ein optisches Strahlungsmessgerät verstanden, mit dem universell radiometrische, photometrische (s. u.), farbmetrische Messungen oder Reflexions- / Transmissionsmessungen vorgenommen werden können. Das Gerät besteht aus einer Mess- und einer Elektronikeinheit. Im Messkopf wird das optische Signal mit Hilfe von vornehmlich Silizium-, Siliziumkarbid- oder Indium-Gallium-Arsenid-Photodioden in ein elektrisches Signal umgewandelt und in der Elektronikeinheit in eine physikalische Größe umgerechnet. Der Messkopf muss passend für die jeweilige Messanwendung ausgewählt werden, da die spektrale Empfindlichkeit der Empfänger unterschiedliche Wellenlängenbereiche umfasst und innerhalb dieser wellenlängenabhängig ist.



Bei diesem sog. Integralmessverfahren wird ein vom Detektortyp abhängiger, begrenzter Spektralbereich erfasst. Mit Hilfe eines vor der Empfängerfläche montierten Filters kann die Empfängercharakteristik an eine bestimmte spektrale Wirkungsfunktion angepasst werden. Es werden dabei hohe Anforderungen an die spektrale Transmission der Filter gestellt. Schon bei geringen Abweichungen der Transmission vom Sollwert sind große Fehler bei der Messung vor allem im Bereich der UV-Strahlung möglich. Eine Messung mit einem Optometer ist relativ einfach durchzuführen. Allerdings gibt das Verfahren keinen Aufschluss über die spektrale Zusammensetzung der gemessenen Strahlung.

Abb.5: Schematische Darstellung eines integral messenden Radiometers

Ein **Fotometer** ist ein Messinstrument für rein photometrische Größen, wie z. B. der Leuchtdichte (Einheit: cd/m^2) oder Lichtstärke (Einheit: cd). In der Astronomie wird es zur Helligkeitsmessung der Himmelskörper eingesetzt, in der Fotografie dient es

als Belichtungsmesser. Während mit einem Fotometer vornehmlich die Lichtquelle oder eine reflektierende Fläche vermessen wird, wird mit einem **Luxmeter** unabhängig von Ausdehnung und Richtung der Lichtquelle die Helligkeit am Messpunkt gemessen. Luxmeter werden beispielsweise zur Messung der Beleuchtungsstärke (Lichtstrom Φ pro Flächeneinheit in der Einheit Lux) an Arbeitsplätzen oder im Straßenverkehr eingesetzt.

Messgerät Spektralradiometer

Zur Erfassung spektral aufgelöster Wellenlängenbereiche werden Spektralradiometer verwendet. Beim sog. Spektralverfahren (Abb. 6) wird die optische Strahlung zunächst durch ein Prisma oder Gitter spektral zerlegt. Nach der spektralen Zerlegung wird der Ausgangsspalt auf eine Empfängerfläche, vornehmlich einem Photomultiplier (PMT) oder CCD-Detektor, abgebildet und dort das optische Signal in ein elektrisches Signal umgesetzt. Durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor, der durch eine Kalibrierung ermittelt wurde, werden die apparatebedingten spektralen Eigenschaften einschließlich der Empfängerempfindlichkeit berücksichtigt. Der so ermittelte Wert ist die spektrale Bestrahlungsstärke ($W \cdot m^{-2} nm^{-1}$). Bei der Erfassung von optischen Strahlungsquellen mit Linienspektren sollte mit einer schmalen spektralen Bandbreite (z. B. 1 nm) gemessen werden, damit eine hinreichend genaue Auflösung erreicht wird [13].

Spektralradiometer decken den UV-VIS- und IR-Bereich ab. Für höchste Systemempfindlichkeiten werden Photomultiplier eingesetzt mit dem Nachteil rotierender Gitter, die das zu detektierende Spektrum sukzessive einer schmalen Empfängerfläche zuführen müssen. Bei einem CCD-Array kann das gesamte zu messende Spektrum ohne Gitterbewegung auf einmal auf dem Array abgebildet werden. Allerdings ist die Quantenausbeute noch nicht so hoch wie beim PMT.

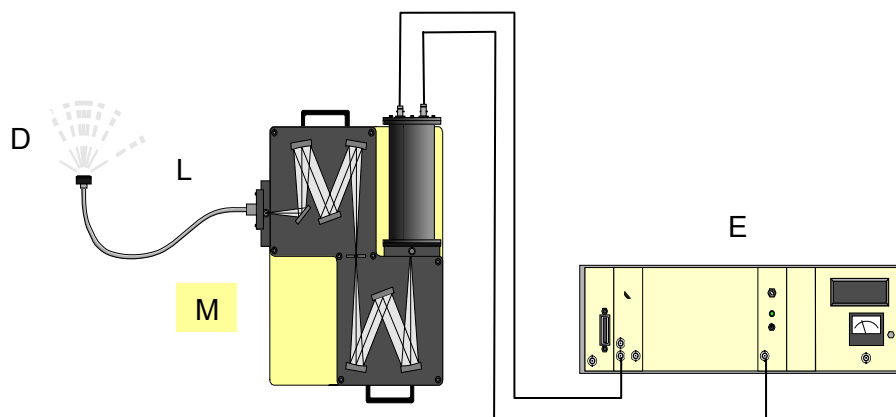


Abb. 6: Spektralradiometer mit Eingangsoptik (Diffusor D, Lichtwellenleiter L), Monochromator M und Auswerteelektronik E. Der Strahlengang über Spiegel und Gitter ist im Doppelmonochromator gesondert dargestellt. (Quelle: Gigahertz-Optik)

Messgerät Pyranometer

Pyranometer messen die Bestrahlungsstärke der solaren optischen Strahlung (in Watt pro Quadratmeter) und werden vor allem in der Meteorologie, Klimatologie, Bauphysik und bei Forschungen über Solarenergie angewendet. In der Meteorologie misst ein Pyranometer die globale Sonnenstrahlung, d. h., die direkt von der Sonne auf den Sensor auftreffende Strahlung und die im Himmelsraum reflektierte, diffuse Strahlung. Das Pyranometer besteht im Wesentlichen aus einer geschwärz-

ten Thermosäule, einer Glaskuppel und einem Abdeckschirm zum Schutz vor Umwelteinflüssen. Die schwarze Beschichtung der Thermosäule absorbiert die Sonnenstrahlung in einem Wellenlängenbereich von 0,3 μm bis nahezu 3 μm und setzt diese in Wärme um. Die Thermosäule erzeugt eine zur Strahlung proportionale elektrische Spannung, die über einen Kalibrierfaktor direkt proportional zur Bestrahlungsstärke (W/m^2) ist. Ein Pyranometer benötigt also keine externe Energiequelle. Um den direkten und diffusen Strahlungsanteil zu messen, ist die Geometrie des Detektors proportional zum Kosinus des Einfallswinkels zu gestalten, d. h. maximales Signal (1.0) wird bei senkrechtem Auftreffen der Strahlung auf den Sensor erzielt (senkrecht zur Fläche, Sonne im Zenit, 0 Grad Einfallswinkel), 0 - Signal bei einem Einfallswinkel von 90 Grad und z. B. 0,5 bei 60 Grad.



Abb. 7: Pyranometer

Messgerät Pyrheliometer

Ein Pyrheliometer ist ein Strahlungsmessgerät, das in der Meteorologie die direkte Sonnenstrahlung, d. h. die Sonnenstrahlung direkt aus der Richtung der Sonne misst. Der Detektor hat einen maximalen Öffnungswinkel von 5 Grad und folgt dem Sonnenstand kontinuierlich in Höhe und Breite. Je nach Messprinzip wird die Strahlung von einer schwarzen Thermosäule (s. o.), einem Thermometer oder einem schwarzen Hohlkörper bekannter Wärmekapazität absorbiert. Aus der Erwärmung des Detektors kann die Bestrahlungsstärke berechnet werden.

Messgerät Sonnenscheinautograph

Standardmäßig wird die Sonnenscheindauer eines Tages mit dem Sonnenscheinautographen nach Campbell-Stokes gemessen, auch Heliograph genannt. Bei diesem Gerät durchlaufen die Sonnenstrahlen eine große Glaskugel, die als Brennglas fungiert. In der Brennfläche hinter der Kugel befindet sich ein Plastik- oder Papierstreifen mit einer Zeitmarkierung. In diesen Streifen brennt die gebündelte Sonnenstrahlung bei Sonnenschein eine Spur. Anhand der Zeitmarkierung kann aus der Länge der Brennspur Zeitpunkt und Zeitdauer des Sonnenscheins bis auf eine zehntel Stunde genau abgelesen werden. Um die Tagessonnenscheindauer zu ermitteln, werden die Zeiten addiert. Ein Streifenwechsel findet täglich statt. Die Sonnenscheindauer wird heutzutage auch indirekt über die Messung der Bestrahlungsstärke ermittelt. Sobald diese den international festgelegten Grenzwert von $120 \text{ W}/\text{m}^2$ überschreitet, wird Sonnenschein angenommen und ein Signal ausgegeben.



Abb. 8: Sonnenscheinautograph

4.2 Fotochemische Verfahren

Im Gegensatz zu physikalischen Vorgängen, bei denen die Stoffart gleich bleibt, nutzt man zum Nachweis von optischer Strahlung bei fotochemischen Verfahren die

bei chemischen Reaktionen neu entstandenen Stoffe. Voraussetzung für eine chemische Reaktion ist eine geeignete Wellenlänge des Photons, um vom Molekül überhaupt absorbiert werden zu können. Durch die Absorption werden die energetischen Zustände der äußeren Atomhülle von beteiligten Atomen so verändert, dass sie sich in Folge zu neuen Stoffen (Produkten) verbinden. Bekannte Beispiele für chemische Reaktionen mit photochemischen Reaktionsschritten im VIS-Bereich sind die Photosynthese und der Sehvorgang.

Zum Nachweis erythemwirksamer UV-Strahlung werden hauptsächlich Polysulfonfilme eingesetzt. Hierbei wird ausgenutzt, dass sich bei UV-Bestrahlung des Polysulfons die Absorption ändert. Das Ansprechverhalten dieses Materials ist nicht konstant und von der Wellenlänge abhängig. Näherungsweise entspricht die spektrale Empfindlichkeit dem Verlauf der Erythem-Wirkungsfunktion $s(\lambda)$. Die UV-



Exposition des Polysulfonfilms wirkt kumulativ. In einer nachträglichen Auswertung wird über die Absorptionsänderung und ein Berechnungsmodell die Bestrahlung (UV-Dosis) ermittelt. Bei bekanntem Spektrum kann dieses Dosimeter in bestimmten Grenzen über einen Korrekturwert für unterschiedliche Strahlungsquellen eingesetzt werden [14].

Abb. 9: Polysulfondosimeter im Einsatz

4.3 Biologische Verfahren

Im Vergleich zu den physikalischen und chemischen Verfahren kann die Wirkung speziell der solaren UV-Strahlung auf biologische Systeme mit Bioindikatoren direkt erfasst werden. Bei diesem Messverfahren werden der artspezifische Empfindlichkeitsbereich im UV-Spektrum eines jeden Organismus und die Wirkungen der UV-Reparatursysteme berücksichtigt. Zum Einsatz kommt z. B. ein vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelter Biofilm, bei dem getrocknete Sporen des Bakteriums *Bacillus subtilis* verwendet werden [15]. Das Wirkungsspektrum des Biofilms ist dem Erythem-Wirkungsspektrum sehr ähnlich. Nach Bestrahlung des Biofilms wird im Labor über ein standardisiertes Verfahren die Auswertung vorgenommen. Hierbei wird über die verbleibende Keimfähigkeit der Sporen ermittelt, wie viel an UV-Strahlung auf den Biofilm aufgetroffen ist.

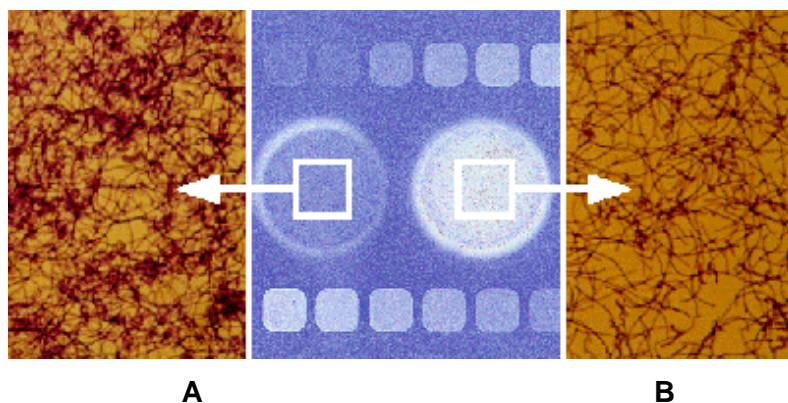


Abb. 10: Biofilm nach Belichtung, Kalibrierung und Entwicklung. A: Geringe Schädigung der Organismen, B: Starke Schädigung der Organismen

4.4 Beobachten und Aufzeichnen der bodennahen solaren Strahlung

In Deutschland ist es vor allem der Deutsche Wetterdienst (DWD), der regelmäßig im gesetzlichen Auftrag die meteorologischen Prozesse, Struktur und Zusammensetzung der Atmosphäre erfasst, überwacht und bewertet. Der DWD erbringt meteorologische Dienstleistungen insbesondere auf den Gebieten des Verkehrs, der gewerblichen Wirtschaft und der Wasserwirtschaft (Gesetz über den Deutschen Wetterdienst). Dazu betreibt der DWD die erforderlichen Mess- und Beobachtungssysteme (Monitoring). Die Beobachtung eines Abbaus des Gesamtzongehaltes durch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) vor gut 20 Jahren hat den Blick dahingehend geschärft, dass der dadurch erwartete höhere UV-Anteil der solaren Strahlung einen stark zunehmenden Einfluss auf die Gesundheit des Menschen, sowie auf terrestrische und aquatische Ökosysteme ausüben könnte.

Aus diesem Grund ist die bodennahe solare UV-Strahlung ein wichtiger Umweltparameter geworden, den es ebenfalls ständig zu erfassen sowie strahlengesundheitlich und ökologisch zu bewerten gilt. Zur Entwicklung zuverlässiger Vorhersagen über die Gesundheits- und Umweltkonsequenzen infolge der anthropogenen Änderungen der Erdatmosphäre gibt es im deutschsprachigen Raum mehrere Messaktivitäten.

4.4.1 UV-Monitoring in Deutschland

Seit 1993 betreibt das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zusammen mit dem Umweltbundesamt (UBA) ein UV-Messnetz [16]. Gemeinsam mit mittlerweile 5 weiteren assoziierten Institutionen, darunter auch der DWD, wird die solare UV-Strahlung an allen strahlenklimatologisch wichtigen Standorten Deutschlands kontinuierlich und spektral aufgelöst in Erdbodennähe gemessen. Dabei wurden unterschiedliche Breitengrade, Höhenlagen, Klimata und Lufttrübungen berücksichtigt. Das Kernnetz des BfS/UBA besteht aus den Stationen

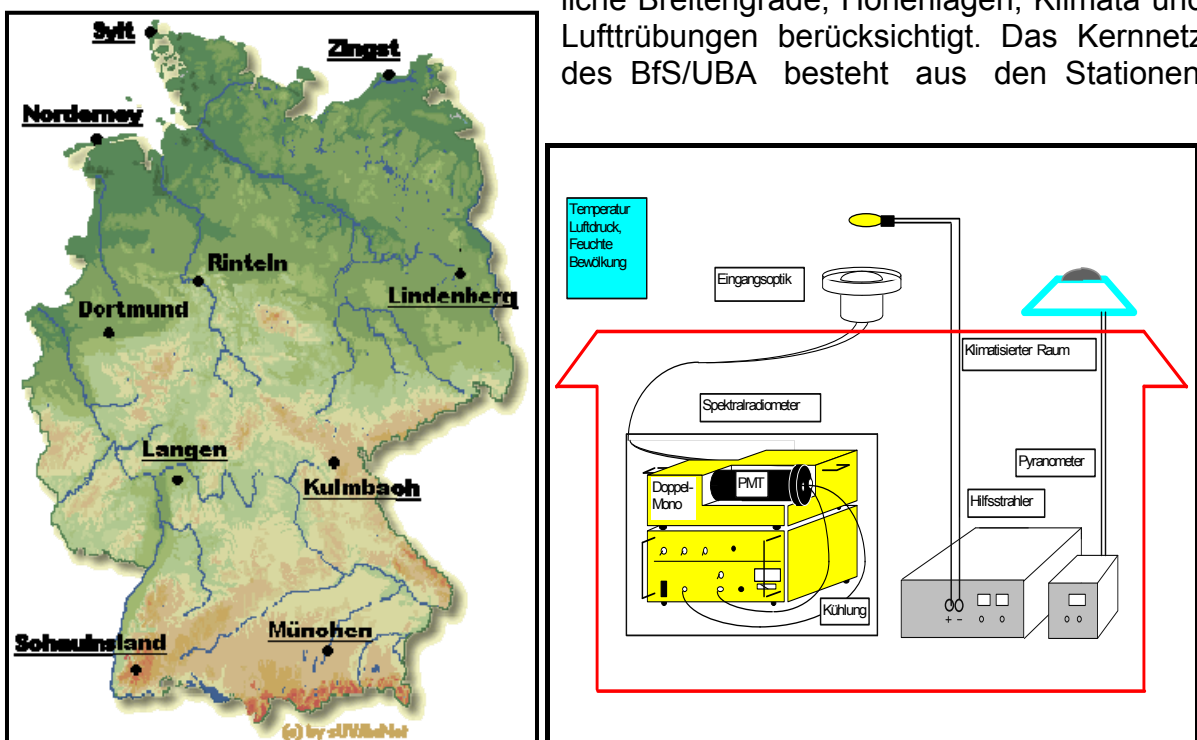


Abb.11: links: Verteilung der Messstationen in Deutschland rechts: Prinzipieller Aufbau einer UV-Messstation

Zingst, Langen, Schauinsland und München. In den Folgejahren wurde zusammen mit dem DWD und weiteren assoziierten Institutionen das Messnetz zu einem bundesweiten UV-Messnetz ausgebaut. Abbildung 11 zeigt die Standorte des UV-Messnetzes. Assoziierte Institutionen sind die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in Dortmund (BAuA), die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) mit der Station in Westerland/Sylt, das Meteorologische Observatorium Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes (DWD), das Landesamt für Umweltschutz Bayern mit der Messstation in Kulmbach (LfU Bayern) und die Gewerbeaufsicht Niedersachsen mit der Messstation in Rinteln und auf der Insel Norderney (GAA-Hi).

An allen Standorten werden die gleichen Messsysteme verwendet. Die temperaturempfindlichen Baugruppen der Messsysteme sind innerhalb eines klimatisierten Laborraums untergebracht und mit einem Lichtwellenleiterbündel mit der auf dem Dach befindlichen Eingangsoptik verbunden (Abb. 11, rechts). Die Eingangsoptik ist horizontal ausgerichtet und erfasst sowohl die direkte solare UV-Strahlung als auch die diffus gestreute UV-Himmelsstrahlung (Globalstrahlung). Die Gesamtglobalstrahlung wird mit einem Pyranometer zusätzlich erfasst.

Die solare UV-Strahlung wird im Wellenlängenbereich von 290 nm bis 400 nm gemessen, d. h. sowohl im UV-B- als auch im UV-A-Bereich. Bei kürzeren Wellenlängen liegt die spektrale Bestrahlungsstärke unterhalb der Systemempfindlichkeit des Messsystems. Messungen erfolgen alle 6 min, daher können auch kurzzeitige Veränderungen der UV-Strahlung, z. B. an wechselhaft bewölkten Tagen, ausreichend genau erfasst werden.

Für die aktuelle Berichterstattung dient der UV-Index, der zusammen mit Daten des Deutschen Wetterdienstes via Internet (www.bfs.de) und Videotext des Bayerischen Rundfunks der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt wird. Aktuelle Informationen werden in Form von Pressemitteilungen weitergegeben. Darüber hinaus werden in den Monaten April bis September auf Basis der bisherigen Messungen und der Wettervorhersage 3-Tagesprognosen veröffentlicht. Für ausführliche Dokumentationen werden die UV-Daten jedes Jahr in Form von Jahresberichten im Internet veröffentlicht.

4.4.2 UV- Monitoring in Österreich

Seit 1998 ist in Österreich im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt ein Messnetz mit inzwischen 12 Messstationen in Betrieb, das kontinuierlich die Intensität der erythemwirksamen solaren UV-Strahlung erfasst. Die Messstationen sind so gewählt, dass sowohl ländliche Gegenden als auch städtische Ballungsgebiete erfasst werden und außerdem die großen topographischen Unterschiede in Österreich mit Messstationen zwischen 150 m und 3100 m Seehöhe berücksichtigt werden.

Es werden Breitbanddetektoren (Solar Light Biometer) verwendet, die jedes Jahr im Labor in Innsbruck bezüglich relativer spektraler Empfindlichkeit und bezüglich absoluter Kalibrierung charakterisiert werden. Die Messdaten der einzelnen Stationen werden online alle 10 Minuten nach Innsbruck übertragen und nach einer Qualitätskontrolle werden die Eichfaktoren in Abhängigkeit von Sonnenhöhe und Ozongehalt angewendet. Die Absolutwerte der erythemwirksamen Strahlung werden in Einheiten des international einheitlich ermittelten UV-Index für alle Stationen online im Internet (www.uv-index.at) kontinuierlich veröffentlicht.

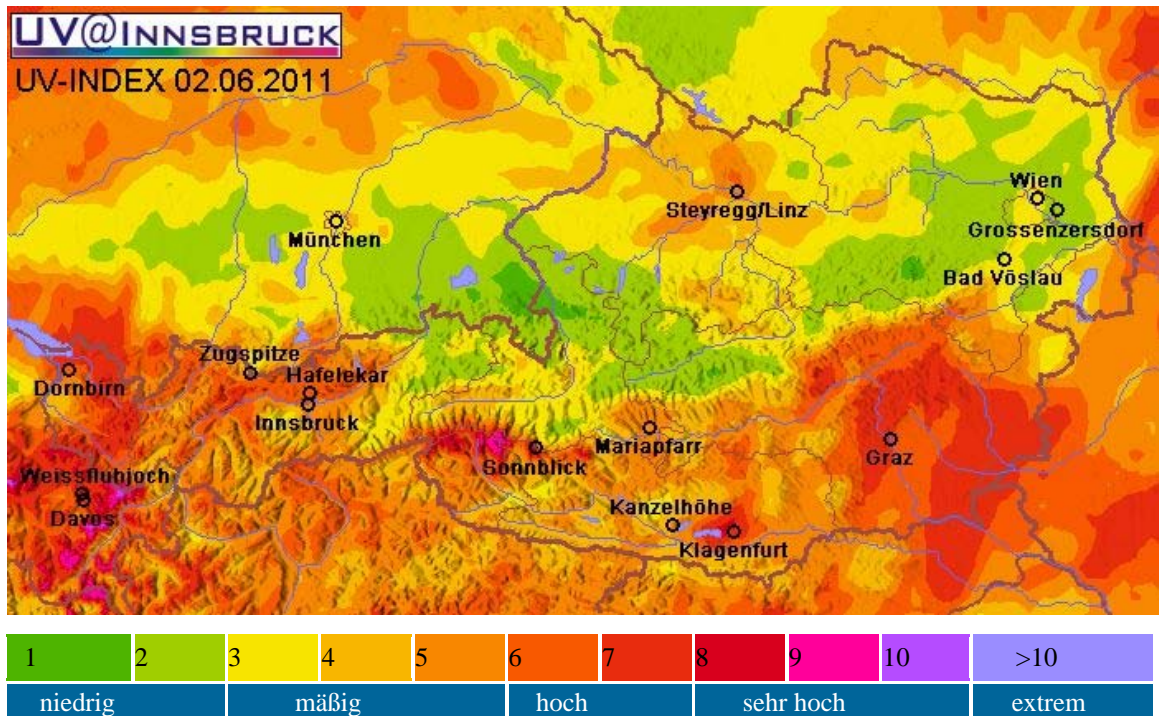


Abb. 12: UV-Monitoring in Österreich mit den Standorten der Messstationen und Einfärbung entsprechend der UVI – Werte (UVI-Skala s. Kap. 7).

Zusätzlich wird alle 15 Minuten eine Karte der UV-Belastung für Österreich und Umgebung erstellt, die aus den Messdaten der einzelnen Stationen in Kombination mit der aktuellen Bewölkungssituation aus Satellitenbildern (Meteosat) bestimmt wird. Neben den Messungen der Stationen in Österreich werden auch Messwerte aus Deutschland (München, Zugspitze) sowie der Schweiz (Davos, Weissfluhjoch) online dargestellt, die mit ähnlichen Detektoren und ähnlichen Qualitätskriterien erfasst werden.

Die Ziele für den Betrieb des österreichischen UV-Messnetzes sind einerseits die aktuelle Information der Bevölkerung über die UV-Belastung in allen Regionen des Landes und andererseits die wissenschaftliche Analyse der Messdaten hinsichtlich der verschiedenen Einflussfaktoren (Seehöhe, Bodenreflexion, Aerosole, bodennahes Ozon) und hinsichtlich der Langzeitentwicklung.

4.4.3 UV- Monitoring in der Schweiz

Die Information der Öffentlichkeit über die UV-Strahlung ist Aufgabe des Bundesamtes für Gesundheit (BAG). Gemeinsam mit dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie betreibt das BAG die Internetseite <http://www.uv-index.ch/>. Dort und auch auf der Informationsseite des BAG http://www.bag.admin.ch/uv_strahlung/ sind Prognosen zum UV-Index, Informationen zum Schutz vor UV-Strahlung und interessante Links und Downloads zum Thema zu finden.

Das BAG steht auch für Anfragen und Fachkontakte zur Verfügung. Für Fragen, die sich im Zusammenhang mit der Sonnenexposition von Arbeitnehmenden stellen, ist die Suva, Luzern, Bereich Physik, zuständig. In der Schweiz sind folgende Messstationen für den UVI in Betrieb: Jungfrauojoch (3457 m ü. M.), Locarno Monti (195 m ü. M.), Payerne (490 m ü. M.), Davos (1610 m ü. M.) und Weissfluhjoch (2540 m ü. M.).

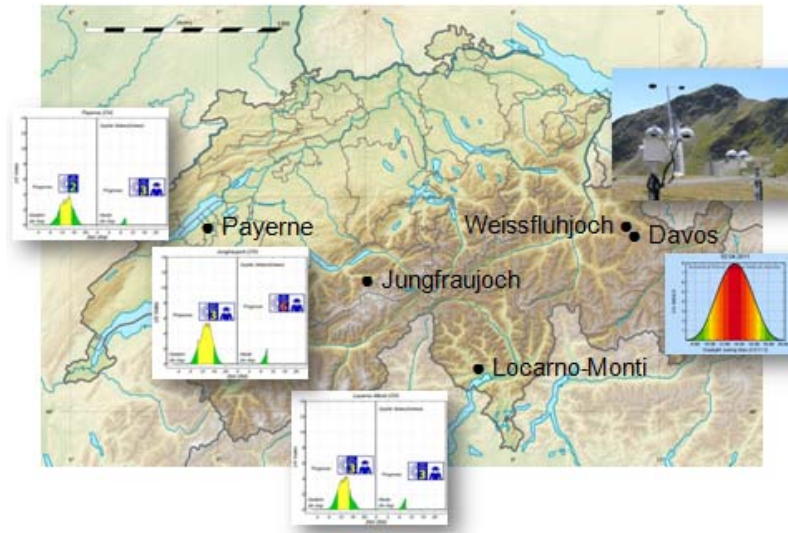


Abb. 13: UV-Monitoring in der Schweiz mit den Messstationen und Messwerten

4.4.4 Monitoring Globalstrahlung

In Deutschland misst und beobachtet der Deutsche Wetterdienst den Sonnenschein, die Globalstrahlung und die verschiedenen einzelnen Strahlungsarten schon seit vielen Jahrzehnten. Ungefähr 270 Stationen des DWD nehmen in Deutschland u. a. Sonnenscheinmessungen vor. Adressaten sind Biologen genauso wie Ingenieure, ganz besonders aber die Nutzer von Photovoltaik- oder Solarstromanlagen. Die gesamte am Erdboden ankommende Strahlung - die Globalstrahlung - wird in Form von Globalstrahlungskarten präsentiert. Basis sind die Messwerte von Globalstrahlungs- und anderen Stationen und von METEOSAT - Wettersatelliten. Daraus werden vom DWD pro Monat und Jahr Globalstrahlungs-Werte im 1 km-Raster für alle Punkte in Deutschland bestimmt und in Karten grafisch dargestellt. Globalstrahlungskarten erstellt der Deutsche Wetterdienst für jeden einzelnen Monat und für einzelne Jahre.

4.4.5 Persönliche Messungen

Die Schattenregel stellt eine einfache und verlässliche Alternative dar, um die UV-Belastung ohne Hilfsmittel abschätzen zu können (Abb. 14). Nach dieser Regel sind Schutzmaßnahmen jedenfalls dann anzuwenden, wenn der eigene Schatten kürzer ist als man selbst (also die Sonne mehr als 45° über dem Horizont steht). Die Schattenregel gilt eleganterweise zu allen Tages- und Jahreszeiten, da die UV-Belastung eng mit dem Sonnenstand verknüpft ist. Im Wesentlichen wird auch die Bewölkung berücksichtigt. Bei leichter Bewölkung nimmt die UV-Strahlung nur um fünf bis zehn Prozent ab. Die Schattenregel behält ihre Gültigkeit. Erst bei dichter Bewölkung, wenn auch kein Schatten mehr geworfen wird, reduziert sich die UV-Belastung um bis zu 70 Prozent [17].

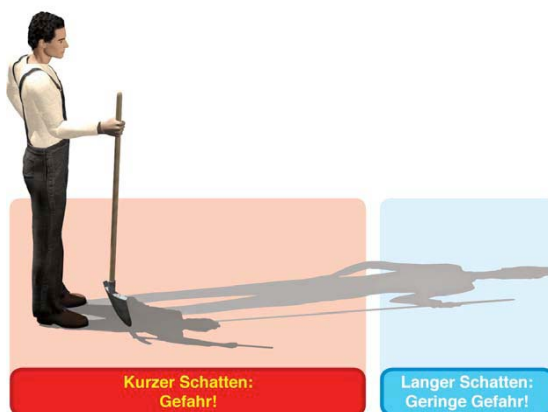


Abb. 14: Messung mit der Schattenregel "Quelle: AUVA"

Weitere Verfahren zur Messung oder Schätzung und zur Beurteilung der von der Sonne verursachten personenbezogenen UV-Strahlungs-Expositionen sind in der DIN EN 14255-3 [18] beschrieben. Neben der Verwendung des veröffentlichten solaren UV-Index bietet die Bestimmung der Haut-Expositionsfaktoren ebenfalls ein einfaches Hilfsmittel für jedermann zur Beurteilung des gesundheitlichen Risikos. Dazu sind in Abhängigkeit von der Umgebung im Freien, wie Jahreszeit, Bewölkung, Expositionsdauer und Bodenreflexion sowie persönlichem Hautschutz, wie Bekleidung und Abschattung sechs Faktoren zu bestimmen, die miteinander multipliziert einen Expositionsfaktor ergeben, der je nach Höhe einen entsprechendem Hautschutz empfiehlt. Die Genauigkeit ist begrenzt, bietet jedoch eine schnelle und praktische Hilfe zur Bestimmung des mindestens erforderlichen Schutzes.

Sonnenstrahlungs-Expositionen können auch mit Strahlungstransfer-Modellen berechnet werden. Dazu stehen empirische Modelle, mit Berechnungen auf Grundlage von über mehreren Jahren gewonnenen Daten von UV-Beobachtungen, schnelle Spektralmodelle, mit Berechnungen auf Basis der Ozonschicht und Sonnenstand und Mehrfachstreuungs-Spektralmodelle, mit Berechnungen auf Basis von detaillierten Atmosphärenprofilen zur Verfügung. Es gibt Internet-Webseiten, die solche Berechnungen anbieten.

5 Solare Strahlungssituation in Deutschland

5.1 UV-Strahlung

Eine langfristige spektralradiometrische Erfassung der solaren UV-Strahlung in Bodennähe (Monitoring) wird in Deutschland vor allem durch das BfS und UBA mit assoziierten Partnern im Rahmen des bundesweiten UV-Monitorings durchgeführt.

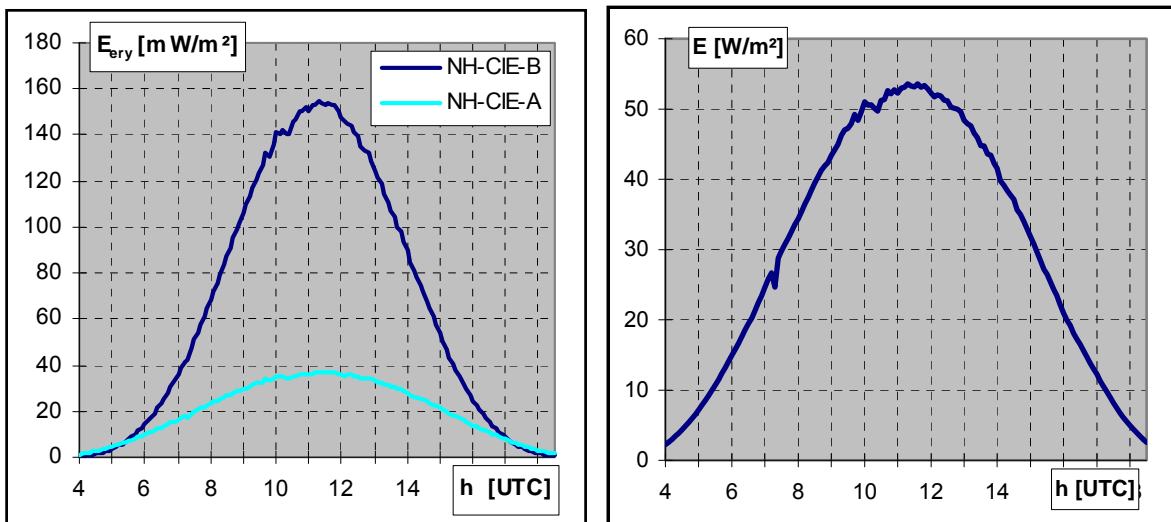


Abb.15: Typischer Tagesverlauf ungewichteter und gewichteter UV-Strahlung in München bei klarem Himmel im Juni **links:** der ungewichteten UV-Gesamtbestrahlungsstärke von 290-400nm, **rechts:** der erythemgewichteten UV-B (NH-CIE-B) und UV-A (NH-CIE-A) Gesamtbestrahlungsstärkeanteile

In Abb. 2, Kap. 2 wurden bereits UV-Spektren zu verschiedenen Jahreszeiten und bei unterschiedlichen Bewölkungsverhältnissen gezeigt. Für eine Darstellung der Tages- und Jahresverläufe der UV-Bestrahlungsstärke werden die Spektren über die Wellenlängen von 290 nm bis 400 nm integriert. Der Kurvenverlauf der so erhaltenen UV-Gesamtbestrahlungsstärke ist mit der höchsten zeitlichen Abtaste von jeweils 6 Minuten in Abb.15 links zu sehen.

Entsprechend des sonnigen Wetters ist ein ausgeprägter glockenförmiger Tagesverlauf zu erkennen mit einem Spitzenwert zum Sonnenhöchststand von ca. 55 W/m^2 . Im Vergleich zur gesamten, die Erdoberfläche erreichenden solaren Strahlung mit 1120 W/m^2 (senkrechter Sonnenstand, klarer Himmel) beträgt der reine UV-Anteil nur ca. 5%.

Für eine Darstellung der erythemgewichteten UV-Bestrahlungsstärke sind die Spektren entsprechend der Gleichung (1) zunächst zu falten (Erythemwirkfunktion in Abb. 24, Kap. 7) und dann über denselben Wellenlängenbereich zu integrieren. Abbildung 15 rechts zeigt die erythemgewichteten UV-Strahlungskomponenten im UV-A- und UV-B-Bereich, eine Addition beider Anteile ergibt die erythemgewichtete UV-Gesamtbestrahlungsstärke.

Neben der um fast einen Faktor von 1000 unterschiedlichen Größenordnung gewichteter und ungewichteter UV-Bestrahlungsstärken zeigt sich in Abb.15 rechts, dass das Verhältnis von UV-B-Anteil und UV-A-Anteil über den Tag hinweg einer starken Änderung unterworfen ist.

Wie stark die UV-Strahlung über das ganze Jahr variiert, kann anhand der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{ery} täglich um 12 Uhr MEZ eines Tages dargestellt werden. In Abb. 16 ist der Kurvenverlauf über den Zeitraum 2000 bis 2009 am Beispiel der Station München - Neuherberg dargestellt [19].

Für eine Trendanalyse wurde der gleitende Durchschnitt gewählt, d.h. diese Messreihe setzt sich zusammen aus dem arithmetischen Mittelwert über 365 Tage, beginnend 1.1. bis 31.12.2000 eines Jahres und fortlaufend um jeweils einen Tag verschoben, als 2.1.2000 bis 1.1.2001, 3.1.2000 bis 2.1.2001. Schaltjahre werden nicht berücksichtigt.

Durch seine Resistenz gegen Ausreißer eignet sich der Median besonders gut als Lageparameter für nicht normalverteilte Grundgesamtheiten und wurde deshalb als 2. Kurve mit demselben Auswerteschema wie der gleitende Durchschnitt in die 3 Grafiken mit aufgenommen. Die Kurven des gleitenden Durchschnitts und des Medians der erythemalen Bestrahlungsstärke haben nahezu den gleichen Verlauf, beide mit einer Erhöhung im Jahr 2003, dem Jahr mit sonnenreichen Monaten.

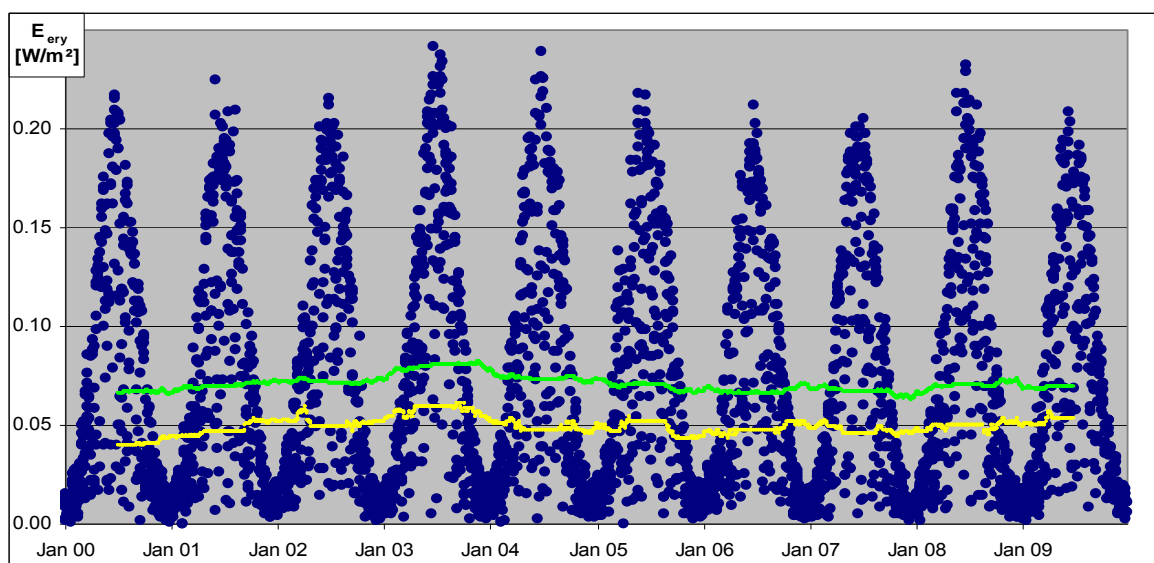


Abb.16: Erythemgewichtete 12 Uhr MEZ Bestrahlungsstärkewerte der Station Neuherberg im Zeitraum 2000-2009 mit gleitendem Durchschnitt (hellgrün) und Median (gelb)

Eine Trendanalyse des ermittelten gleitenden Durchschnitts und des Median von gemessener, wie auch der Gesamtglobalbestrahlungsstärke zeigt nur eine leichte Erhöhung im gesamten Zeitbereich von weniger als 5%. Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass die UV-Strahlung in Deutschland im Zeitraum 2000 – 2009 nur marginal gestiegen ist.

Eine weitere Darstellung der Bestrahlungsverhältnisse gestattet der UV-Index (UVI), näher beschrieben in Kap. 7. Er gibt die jeweiligen Spitzenwerte der gewichteten UV-Bestrahlungsstärke eines Tages wider und nicht, wie in der oberen Darstellung die Bestrahlung zu einer bestimmten Uhrzeit.

In Abb. 17 sind die maximalen und minimalen UV-Indexwerte in den Monaten April bis September 2009 für die Stationen Zingst (Norddeutschland), Dortmund (mittleres Deutschland) und München (Süddeutschland) dargestellt. Zum einen sind die großen Schwankungen innerhalb eines Monats deutlich zu erkennen, zum anderen die langzeitige Überschreitung des UV-Index von 5, d. h., eine nach WHO-Klassifizierung hohe UV-Belastung (siehe auch Tabelle 10, Kap. 7).

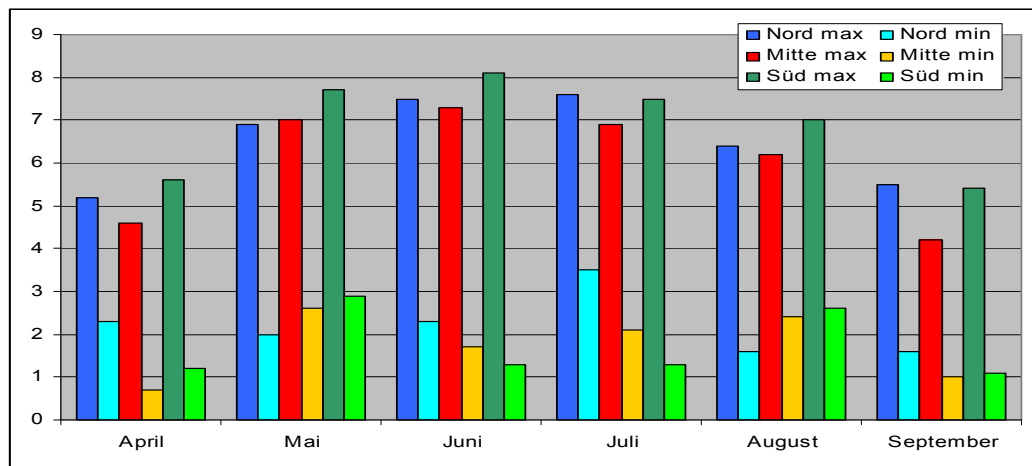


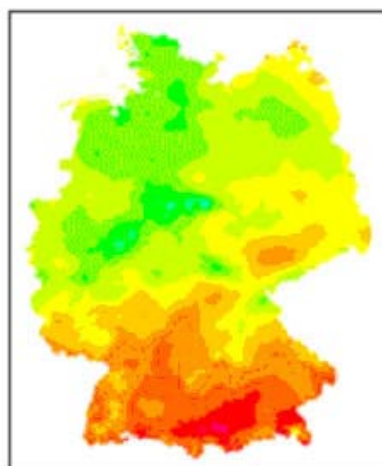
Abb.17: An verschiedenen Standorten gemessene max. und min. UVI - Werte eines Monats zwischen April und September 2009

5. 2 Globalstrahlung

Von den meisten Pflanzen wird die Energie der Sonnenstrahlung zur Photosynthese

Globalstrahlung 1981-2000
Mittlere Jahressummen in kWh/m²

- Über 1150
- 1125-1150
- 1100-1125
- 1175-1100
- 1050-1075
- 1025-1050
- 1000-1025
- 975-1000
- 950-975
- 925-950
- 900-925
- Unter 900



genutzt. Durch Absorption von Licht decken sie den Energiebedarf chemischer Synthesen.

Von den Menschen wird die Sonnenenergie seit jeher zur Bereitung von Warmwasser genutzt. Vor dem Hintergrund notwendiger nachhaltiger Energieerzeugung gewinnt die Solartechnik auch in Deutschland zunehmend an Bedeutung.

Zum Einen wird die Sonnenenergie durch geschwärzte Sonnenkollektoren in Wärme umgewandelt, zum Anderen durch Solarzellen direkt in elektrischen Strom.

Abb. 18: Mögliche Gewinnung von Solarenergie in Deutschland (Quelle: DWD)

Abb. 18 gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der Energiegewinnung in Deutschland. Wie zu erwarten ist die mittlere Jahressumme der Globalstrahlung in Deutschland in den Jahren 1981-2000 im Süden am höchsten. 1000 kWh entsprechen ungefähr 100l Öl.

5.3 Sonnenscheindauer

Die tatsächliche Sonnenscheindauer hängt entscheidend von der Klimazone ab. Wolken verhindern größtenteils den Sonnenschein, Smog, Sandstürme und Vulkanausbrüche verursachen eine Dämpfung des Sonnenlichtes.

Mit der Sonnenscheindauer kann die Einstrahlung an einem bestimmten Ort näherungsweise abgeschätzt werden und ermöglicht Angaben zu Zeit und Stärke der Bewölkung. Auf den meisten Kontinenten nimmt die Sonnenscheindauer statistisch mit abnehmender geografischer Breite zu. So liegt z. B. in Österreich die Sonnenscheindauer im Schnitt ca. 10 Prozent höher als in Deutschland. Ausnahmen sind die Tropen und teilweise die Polargebiete.

Die tatsächliche Sonnenscheindauer ist als die Zeitspanne definiert, während der die direkte Sonnenstrahlung senkrecht zur Sonnenrichtung mindestens 120 W/m^2 beträgt.

Tab.5: Globalbestrahlungswerte bei unterschiedlichen Zuständen des Himmels

Himmelzustand	Sommer	Winter
klarer bis leicht diffuser Himmel	600–1000 W/m^2	300–500 W/m^2
leichte bis mittlere Bewölkung	300–600 W/m^2	150–300 W/m^2
stark bewölkt bis nebelig-trüb	100–300 W/m^2	50–150 W/m^2

In Deutschland beträgt die durchschnittliche jährliche Sonnenscheindauer je nach Ort zwischen 1300 und 1900 Stunden pro Jahr, im Mittel 1550 Stunden/Jahr. Zu internationalen Spitzenreitern der Sonnenscheindauer gehören u. a. die Insel Kreta, Boulder (Colorado) und Phoenix (Arizona) mit 300 Tagen Sonnenschein.

5.4 Klimawandel

Unter Klima versteht man eine typische Zusammenfassung der atmosphärischen Zustände und Witterungseinflüsse, die die Erdoberfläche beeinflusst, bezogen auf eine geografisch abgegrenzte Fläche und einen längeren Zeitraum.

Als natürliche, das Klima beeinflussende Faktoren gelten große Vulkanausbrüche, bei denen Gase und Stäube in die Stratosphäre gelangen, an denen die Sonnenstrahlen reflektieren und damit die Einstrahlung von Wärmeenergie verhindern. Die Folge ist eine Abkühlung. Weitere wichtige Faktoren sind u. a. Veränderungen der Sonnenaktivität, der atmosphärischen Zirkulation und der Meeresströmungen.

Mittlerweile kann der Mensch auch das Klima beeinflussen. Die Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe für Klimaveränderungen (IPCC), die im Auftrag der Vereinten Nationen (UN) im Jahr 2007 den Stand der Wissenschaft zusammenfasste, kam zu dem Schluss, dass die gestiegene Konzentration der vom Menschen in die Erdatmosphäre freigesetzten Treibhausgase mit hoher Wahrscheinlichkeit die wichtigs-

te Ursache der globalen Erwärmung ist, da ohne sie die gemessenen Temperaturen nicht zu erklären sind (Treibhauseffekt).

"Klimawandel" bedeutet demnach in erster Linie, dass die durchschnittlichen Temperaturen auf der Erde in den kommenden Jahrzehnten steigen werden. Als Hauptbeweis für die derzeitige globale Erwärmung gelten die seit etwa 1860 vorliegenden weltweiten Temperaturmessungen sowie die Auswertungen verschiedener Klimaarchive. Einer Temperaturzeitreihe des DWD ist zu entnehmen, dass innerhalb der letzten 130 Jahre die mittlere Tagestemperatur in Deutschland um ca. 2°C gestiegen ist (Abb.19).

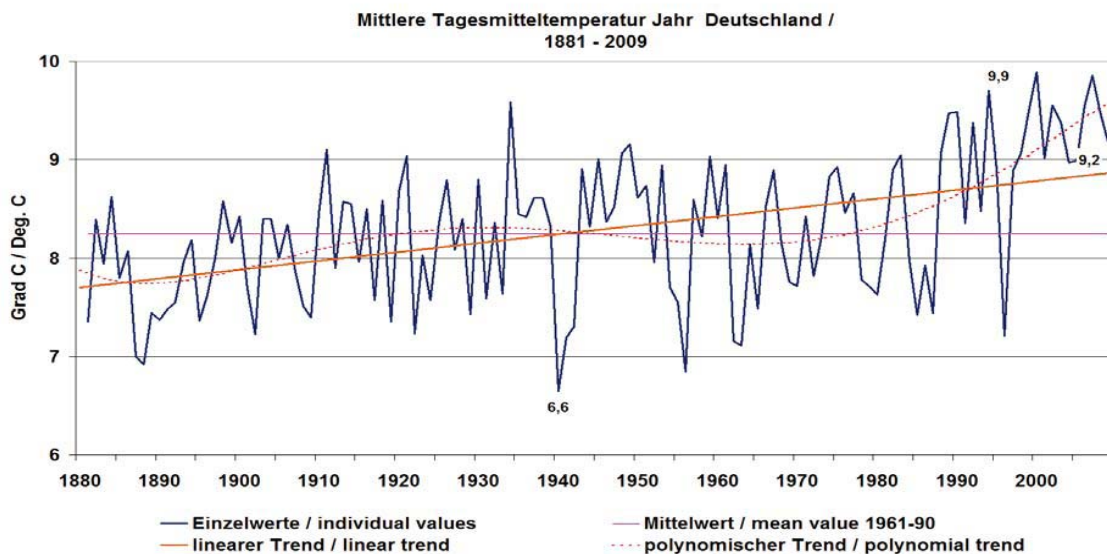


Abb. 19: Zeitreihen der Mitteltemperatur im Jahr für das Gebietsmittel von Deutschland (Quelle DWD)

Die von Experten prognostizierten Auswirkungen auf Hydrosphäre, Atmosphäre und Biosphäre sind vor allem: Weltweite Veränderung der Verteilung und Ausmaß der Niederschläge. Weil wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann, erhöht sich die Verdunstungsrate mit einem höheren Risiko für Starkregen und Hochwasser

- Weltweit verstärkte Gletscherschmelze mit Auswirkungen auf den Meeresspiegel
- Gesundheitsrisiken infolge steigender Lufttemperaturen (Hitzewellen)
- Durch Zunahme von Wetterextrema ist mit höherer Anzahl von Sonnentagen eine erhöhte UV- Jahresdosis möglich.

6 Wirkungen auf den Menschen

6.1 Biophysikalische Primärprozesse

Die Wirkungen der Sonnenstrahlung mit biologischem Gewebe werden durch die physikalischen Parameter der Strahlungsquelle und die "optischen" Eigenschaften des Gewebes bestimmt. Die wichtigsten Expositionsparameter sind Wellenlänge, Bestrahlungsdauer und -stärke, die wichtigsten Gewebeparameter sind Absorption, Streuung und Remission (s. Abb.20).

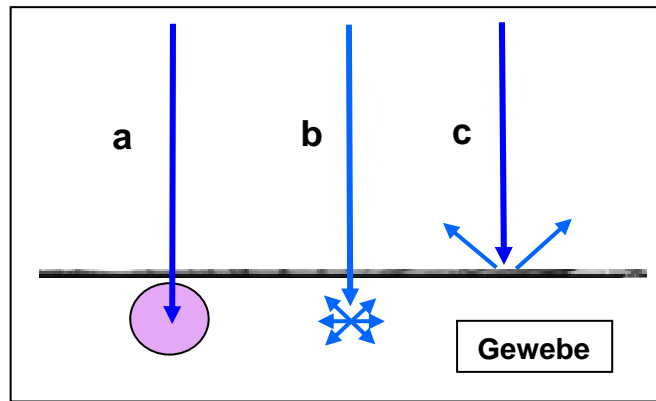


Abb.20: Wechselwirkung optischer Strahlung mit dem Gewebe vorrangig über (a) Absorption, (b) Streuung bzw. (c) Reflexion und Remission

In den meisten Fällen überwiegt jeweils einer der "optischen" Effekte. Bei der Absorption können auch sekundäre Effekte auftreten, wie z. B. Abgabe der Energie ohne fotochemische Reaktion (Lumineszenz).

Reflexion

Ein Teil der auffallenden Strahlung wird gleich an der nicht spiegelnden Oberfläche, wie der Haut, diffus in alle Raumrichtungen reflektiert. Ein weiterer Teil dringt oberflächlich in die obersten Zellschichten ein und wird von dort zurückgeworfen (Remission). Ein dritter Teil dringt tiefer ein und wechselwirkt dort mit dem Gewebe. Die Reflexion folgt dann dem so genannten Cosinus-Gesetz.

Die Reflexion an der Hautoberfläche und darunter liegenden obersten Hornschicht, erreicht im UV-Bereich einen Wert von bis zu 10 %, nimmt im sichtbaren Bereich deutlich zu und erreicht im IR-A-Bereich einen Wert von ca. 50 %. Im längerwelligeren Teil des IR-B-Bereiches nimmt die Reflexion wieder ab bis auf einen Wert von 5-10 %. Der Reflexionsgrad hängt auch vom Melanin Gehalt ab. Mit dunklerer Haut nimmt die Reflexion insbesondere im VIS-Bereich ab.

Brechung

Die Strahlungsbrechung an der Oberfläche wird durch die unterschiedliche Brechkraft der Medien hervorgerufen und gehorcht dem Snelliusschen Gesetz. Aus optischer Sicht sind die Gewebestrukturen von Haut und Auge inhomogen geschichtete Medien. Die einzelnen Gewebeschichten haben unterschiedliche Brechungsindizes und bewirken damit zwischen den Gewebeflächelementen unterschiedliche Ablenkungen des jeweils einfallenden Strahlenbündels.

Streuung

Teilchen oder Gewebestrukturen in der Größenordnung der Wellenlänge der Strahlung und größer streuen sehr viel stärker in Vorwärts- als in Rückwärtsrichtung (Mie-Streuung). Teilchen oder Gewebestrukturen sehr viel kleiner als die Wellenlänge der Strahlung streuen umgekehrt proportional zur 4. Potenz der Wellenlänge (Rayleigh-Streuung), d. h. der Streuanteil steigt sehr stark mit kürzeren Wellenlängen. Diese Streuung ist nicht gerichtet.

Die Ergebnisse beider Streuprozesse sind z. B. für die Blaufärbung des klaren Himmels und die Rotfärbung der niedrig stehenden Sonne verantwortlich. Durch die stärkere Streuung der Sonnenstrahlung an den Luftmolekülen im kurzwelligen sicht-

baren Spektralbereich enthält die gestreute Sonnenstrahlung aus dem Himmelsraum hauptsächlich blaue Anteile. Bei niedrigen Sonnenständen durchläuft die Sonnenstrahlung einen längeren Weg durch die Atmosphäre. Durch die erhöhte Absorption und Streuung fehlen der direkten Strahlungskomponente zunehmend bläuliche Anteile. Die sich ergebende Rotfärbung lässt sich auch an dünnen Wolken besonders gut beobachten, da diese die Strahlung relativ unabhängig von der Wellenlänge gleich stark streuen (Mie - Streuung).

Bezogen auf das Gewebe kann folgender Effekt beobachtet werden: durch den Streueffekt fällt die Bestrahlungsstärke E nicht exponentiell ab, sondern ist aufgrund der zusätzlichen Streuung von benachbarten Gewebearealen in geringer Gewebetiefe sogar noch höher als die einfallende Bestrahlungsstärke E_0 . Es findet eine Überlagerung von einfallender mit der rückgestreuten Strahlung aus tieferen Schichten statt (Albedo).

Absorption

Voraussetzung für eine biologische Wirkung im Gewebe (z. B. in der Haut) ist die Absorption von Strahlung. Nur Photonen, die durch Moleküle im Gewebe absorbiert werden, können zu einer biologischen Antwort führen. Jedes Chromophor (Definition: lichtabsorbierendes Molekül) hat eine charakteristische, wellenlängenabhängige Absorption, das Absorptionsspektrum. Durch die aufgenommene Energie werden die Moleküle angeregt, die dann verschiedene fotochemische Reaktionen hervorrufen können. Bei längeren Wellenlängen im IR-Bereich kann die Strahlung nur noch Änderungen der Schwingungszustände hervorrufen, die als Wärmewirkung wirksam werden.

Bei fotostabilen Molekülen kommt es zu keiner biologischen Wirkung. Die aufgenommene Energie wird entweder unmittelbar nach Einstrahlung (Fluoreszenz) oder verspätet (Phosphoreszenz) als Strahlung wieder ausgesendet. Verhornte Hautanteile, aber auch Kollagenfasern der Haut fluoreszieren weiß-bläulich bis weißgelblich. Die aufgenommene Energie kann auch in Wärme umgesetzt werden, die im Gewebe z. B. zu einer Beschleunigung der normalen Reaktionsabläufe führen kann.

Bei ausschließlicher Absorption würde die auftreffende Bestrahlungsstärke E_0 im Gewebe in erster Näherung nach dem Lambert-Beerschen Gesetz exponentiell abfallen mit den Koeffizienten x als Eindringtiefe und a als Absorptionskoeffizient:

$$E(x) = E_0 \cdot e^{-ax} \quad (6)$$

Die Abschwächung im Gewebe wird durch die Absorptionseigenschaften der Körperflüssigkeiten und der festen Bestandteile des Gewebes bestimmt und ist stark wellenlängenabhängig.

Die meisten organischen Moleküle absorbieren sehr stark im ultravioletten Bereich. Proteine, die zu 15-20 % Bestandteil aller Zellen sind, absorbieren ebenfalls in diesem Spektralbereich, besonders bei 280 nm. Daraus folgt, dass UV-Strahlung nicht sehr tief in biologisches Gewebe eindringen kann. Hämoglobin, überwiegend in gefäßreichem Gewebe, absorbiert auch im sichtbaren Bereich (grün und gelb) bis zu einer scharfen Grenze um 600 nm. Demgegenüber verringert sich die Absorptionsfähigkeit bei Melanin, dem Hauptpigment und wichtigstem Chromophor der Epider-

mis, monoton vom UV-Bereich über den sichtbaren Bereich. IR-Strahlung wird in erster Linie von Wasser absorbiert und das mit zunehmend stärkeren Banden mit steigenden Wellenlängen [20].

6.2 Zellbiologische Wirkungen

Die Zelle als kleinste Einheit belebter Materie verfügt über viele Makromoleküle, die optische Strahlung absorbieren können, wie z. B. Eiweiße (Proteine), Fette und Nukleinsäuren.

Durch die Absorption der Energie von Photonen aus dem UV- oder sichtbaren Bereich gerät das Molekül (Chromophor) in einen angeregten Zustand mit einem höheren Energieniveau (Singulett-Zustand oder Triplett-Zustand). Bei fotostabilen Molekülen erfolgt die Energieabgabe in Form von optischer Strahlung (Fluoreszenz oder Phosphoreszenz) oder in Form von Wärme. Bei fotoinstabilen Molekülen werden durch die Energieabgabe photochemische Prozesse induziert. Beispiele für photochemische Reaktionstypen sind z.B. die Addition, Substitution, Umlagerung und Dissoziation. Durch Photonen können auch chemische Kettenreaktion ausgelöst werden, d.h. ein Startereignis löst eine Reaktion aus, dessen Zwischenprodukt (häufig Radikale) insgesamt oder teilweise als Ausgangspunkt für ein oder mehrere nachfolgende Reaktionen dienen.

Ein Beispiel für eine photochemische Reaktion nach Absorption von UV-B-Strahlung ist die Umbildung von Pro-Vitamin-D₃ unter UV-B-Strahlung zu Prä-Vitamin-D₃ in der Haut zum weiteren Vitamin-D-Stoffwechsel. Strahlungsinduzierte Photoprodukte spielen aber auch eine Rolle bei der UVB-induzierten Bräunung, dem Sonnenbrand und der Immunsuppression [21]. Es sind mindestens 3 photochemische Mechanismen bekannt, die durch die UV-Strahlung im Bereich der Haut immunmodulierend aktiv werden. Durch Absorption der Photonen kommt es zu DNA Veränderungen (Ausbildung von Thymidin Dimere) in den Zellkernen, zu einer Transformierung der in der Hornschicht lokalisierten Urocainsäure vom trans- zum cis-Isomer (welches eine starke immunsuppressive Wirkung hat), sowie durch Interaktion mit den Zellmembranen zur Ausbildung der Lipoperoxidase, wodurch sog. reaktive Sauerstoffspezies entstehen, die ebenfalls schädigende Wirkungen aufweisen. Diese photochemischen Veränderungen sind der Beginn komplexer Reaktionen, die die zelluläre Immunantwort der weißen Blutzellen der Haut und deren Interaktionen beeinflussen.

Hiervon sind insbesondere drei Zelltypen der immunologisch aktiven weißen Blutzellen betroffen, die normalerweise miteinander interagieren: sog. Antigen-präsentierende Zellen (wie die Langerhanszellen) - hier erfolgt eine Abnahme – sowie Einwirkungen auf die T-Helfer-(Immunantwort-fördernde) Lymphozyten (CD4) und T-Suppression (Immunantwort unterdrückende) Lymphozyten (CD8), die durch UV-Strahlung immununterdrückende Botenstoffe wie Interleukin 10 abgeben. Außerdem wird das Verhältnis der Lymphozytentypen zueinander durch chronische UV-Exposition vermindert, in diesem Fall das Verhältnis von CD4- zu CD8-Lymphozyten. Ferner erfolgt durch die Abnahme der Zahl der Langerhanszellen noch zusätzlich eine Aktivierung bestimmter CD4- Lymphozyten, die wiederum zur Reifung von CD8-Lymphozyten führen und damit die lymphozytenvermittelte Immunantwort negativ beeinflusst.

Die Exposition mit UV-Strahlung hat demnach immunmodulierende Wirkungen auf verschiedenen zellulären Ebenen, die insbesondere lokal ausschlaggebend für die

Entstehung von Hautkrebs und die Aktivierung von Infektionen der Haut sein können, wie z.B. Herpes Simplex Viren der Haut.

Die UVB- induzierte Dimerisierung benachbarter Pyrimidine in der DNA (s. o.), d. h. die Bildung zweier gleicher Moleküle zu einem Dimer, führt zu CPD - und Pyrimidin-(6-4) – Pyrimidon - Photoprodukten, die die räumliche Struktur der DNA verändert und die damit die Transkription und Replikation stören [22].

Die UV-A-Strahlungskomponente der Sonnenstrahlung wirkt indirekt über induzierte molekulare Spezies wie z. B. reaktive Sauerstoff-Verbindungen, die ihrerseits mit dem DNA-Molekül interagieren. Die hierbei hervorgerufene Ausbildung unspezifischer chemischer Bindungen oder die Entstehung von DNA-Einfach- und Doppelstrangbrüchen sind zumeist destruktiv und stellen die Grundlage für gravierende Schäden in der Erbinformation der Zelle dar [23].

Die vorhandenen Reparaturmechanismen, die noch vor (enzymatisch), während oder nach der Zellteilung (Überbrückung der DNA-Stellen und spätere Lückenfüllung durch Rekombination) wirksam werden, können nicht immer vollständig den Schaden beheben. Strahleninduzierte Zellschäden können somit in einem Zellverband den Gesamtorganismus gefährden. Infolge mangelhafter Reparatur und einem Versagen der Apoptose (programmierter Zelltod in diesem Fall) kann die Zelle darüber hinaus entarten und durch ständige Teilung eine Krebserkrankung herbeiführen.

Neben stochastischen kann es auch zu deterministischen Ereignissen kommen. Mit steigender Bestrahlungsstärke E oder Bestrahlungsdauer t steigt die Anzahl der Reaktionsprodukte proportional an, auf Gewebeebene können daher ab einer bestimmten Bestrahlung H_s (Schwellenwert) Schäden wahrgenommen werden.

VIS-Strahlung kann im kurzwelligen sichtbaren Bereich noch kovalente Molekülbindungen aufbrechen. Im längerwelligen Bereich wird die Strahlung im Wesentlichen in Wärme umgesetzt. Die zwei wichtigsten Prozesse im sichtbaren Bereich sind für die Pflanzen die Fotosynthese und für den Menschen der Sehvorgang.

Über die Fotosynthese (unter Energieaufnahme Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser zu Zucker) wird solare Strahlungsenergie in Form von chemischen Verbindungen gespeichert. Von der auf die Erde auftreffenden Sonnenenergie mit ungefähr 10^{22} kJ/Jahr wird ca. 0,5 % umgesetzt und der Biosphäre zugänglich gemacht, der überwiegende Teil wird als Wärmestrahlung in den extraterrestrischen Raum wieder abgegeben. Wesentliche Bedingung für die Fotosynthese ist die Anwesenheit von Blattfarbstoffen. Die wichtigsten sind Chlorophylle (Absorption im blauen und roten Bereich).

In der Retina des menschlichen Auges befinden sich ca. 120 Mio. Stäbchen und 6 bis 7 Mio. Zapfen. Unter Bestrahlung wird die Konformität der Sehfärbstoffe wie Rhodopsin infolge der Absorption geändert, sie zerfallen in mehreren Prozessen und werden in mehreren enzymatischen Prozessen wieder aufgebaut.

IR-Strahlung führt zu einer Temperaturerhöhung im Gewebe. Die durch Temperaturreize bewirkten Aktivitäten der Thermorezeptoren lösen Temperaturempfindungen aus. Die Regelkreise beim Menschen sind sehr fein aufeinander abgestimmt, um die Kerntemperatur auf $\pm 0,1$ °C konstant zu halten.

6.3 Gesundheitliche Wirkungen

Allgemeines

Sonnenstrahlung dringt in menschliches Gewebe nur relativ oberflächlich ein (vgl. 6.1.4); die inneren Organe werden nicht erreicht. Daher sind die kritischen Organe für die Einwirkung optischer Strahlung auf den Menschen die Augen und die Haut. Die Eindringtiefe selbst ist von der Wellenlänge abhängig. Damit bestimmt die Wellenlänge bzw. die Wellenlängen (Sonnenstrahlung ist polychromatische Strahlung) den Ort der Wirkung in Auge und Haut. Während kurzwellige UV-Strahlung und langwellige IR-Strahlung bereits an der Oberfläche absorbiert werden, dringt Strahlung im sichtbaren und nahen infraroten Bereich tiefer ein. Art und Schwere eines durch Sonnenstrahlung hervorgerufenen Effektes sind neben der Wellenlänge von der Bestrahlungsstärke E (in W/m^2) und der Bestrahlungsdauer t (in s) also von der Bestrahlung H (in $Ws = J/m^2$) abhängig.

Den gesundheitsförderlichen Wirkungen wie z.B. der Vitamin-D-Stoffwechsel durch UV-B-Strahlung stehen eine Reihe gesundheitlicher Risiken, oft im selben Spektralbereich gegenüber. Eine Wirkungsbeurteilung zur Gewährleistung der essentiellen biopositiven Effekte durch die Sonnenstrahlung bei Minimierung der Risiken insbesondere für Effekte chronischer Natur ist nach wie vor Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen.

6.3.1 Das Auge

Die sichtbare Strahlung ermöglicht dem Menschen über den Sehvorgang das Erkennen der Umgebung und ist für die meisten der wichtigste Sinneseindruck. Die Helligkeitsempfindung des Auges für die gleiche Bestrahlungsstärke steigt von 400 nm bis 555 nm, um dann bis zu 780 nm abzufallen, d.h. das Auge reagiert auf die Farbe grün am empfindlichsten. Neben dem visuellen Sinneseindruck erfolgt eine nichtvisuelle Wirkung über die melanopsinhaltigen retinalen Ganglienzellen, den Sehnerv und die Zirbeldrüse im Kleinhirn, die u. a. den Tag – Nacht - Rhythmus (zirkadianer Rhythmus) steuert. Dabei wird insbesondere die Melatoninsekretion beeinflusst [24]. Dieser Effekt ist von der Wellenlänge abhängig [25].

Der aus Hornhaut, Vorderkammerflüssigkeit und Linse bestehende dioptrische Apparat des Auges und der Glaskörper sind nur für Wellenlängen zwischen 400 nm und 1400 nm mehr oder weniger durchlässig. Die von ca. 400 nm mit kleiner werdender Wellenlänge abnehmende Transmission ist auf die altersbedingte zunehmende Absorption der Linse durch Gelbfärbung und der Hornhaut zurückzuführen. Für Kleinkinder sind noch Transmissionsanteile bis 360 nm im UV-A zu verzeichnen. Im Bereich zwischen 430 und 460 nm nimmt die Transmission im Alter besonders stark ab, d. h., in Abhängigkeit vom Lebensalter kommt es sowohl zu einer spektralen Verschiebung als auch die Reduktion der Transmission [26, 27]. In Abb. 21 sind sowohl der Aufbau des Auges als auch die Transmission der optischen Strahlung dargestellt.

Durch die Anatomie, wie Augenbrauen und zurückgesetzte Augenhöhle, ist das Auge in gewissen Grenzen vor zu hoher Sonnenexposition geschützt. Ein gewisser Schutz gegen zu hohe UV-Expositionen ist auch durch das unwillkürliche Schließen der Augenlider bei zu starkem Lichteinfall gegeben. Ein gewisser Schutz bei zu hoher Lichtexposition wird durch eine Verringerung des Pupillendurchmessers bewirkt. Bei geringer Sonneneinstrahlung in den Wintermonaten, verbunden mit einem in den längerwelligen Bereich verschobenen Spektrum, kann es bei einigen Menschen

zu Beeinträchtigungen im psychischen Wohlbefinden kommen (Winterdepression).

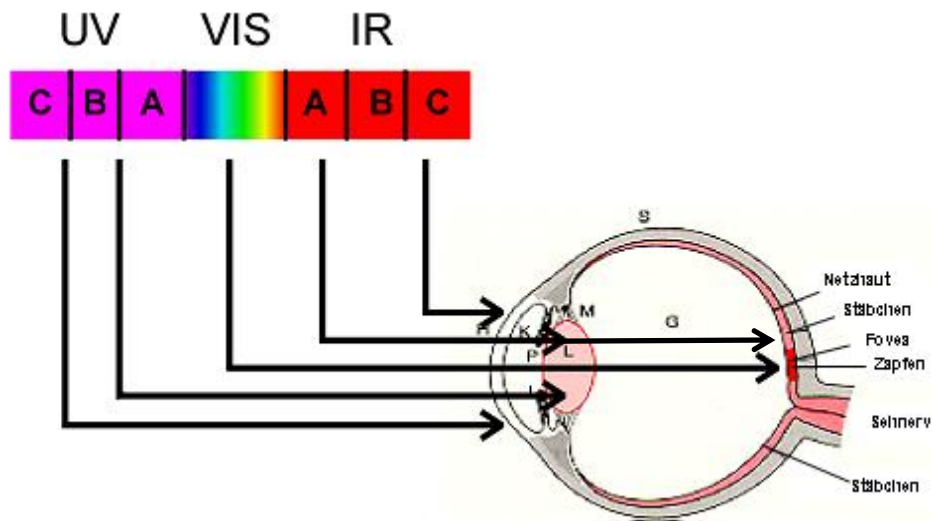


Abb. 21: Aufbau und Transmission des Auges: S Sklera, G Glaskörper, M Ziliarmuskel, L Linse, P Pupille, K vordere Augenkammer, H Hornhaut

Akute Schäden

Entsprechend dem anatomischen Aufbau und den Absorptionseigenschaften des Auges können durch UV-Strahlung vornehmlich die äußersten Zellen der Hornhaut und der Bindehaut akut geschädigt werden. Fotochemische Reaktionen führen zu Entzündungen der Hornhaut mit Latenzzeiten von 6-12 Stunden. Die Schädigung ist sehr schmerzhaft und dauert 1-3 Tage. Der wirksamste Wellenlängenbereich für die Hornhautentzündung (Fotokeratitis) liegt bei 288 nm (s. Abb. 22) bei einer mittleren Schwellbestrahlung $H(288 \text{ nm}) = 100 \text{ J/m}^2$. Es kann aber auch zu einer Entzündung der Bindehaut kommen (Fotokonjunktivitis), mit dem wirksamsten Wellenlängenbereich bei 260 nm und einer mittleren Schwellbestrahlung von $H(260 \text{ nm}) = 50 \text{ J/m}^2$.

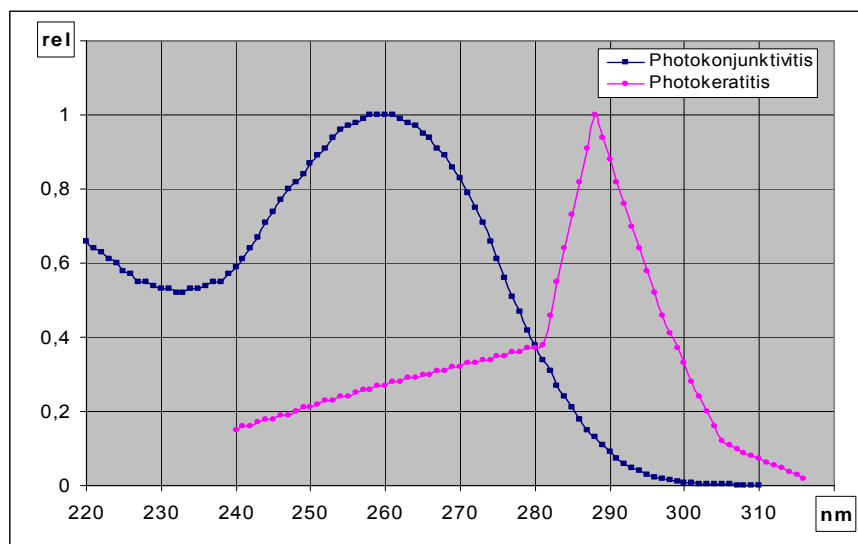


Abb. 22: Wirkungsfunktionen für Fotokonjunktivitis und Fotokeratitis nach DIN 5031-10

Kurzwellige mittlere bis starke VIS-Strahlung kann bei entsprechend langer Einwirkungsdauer die Netzhaut photochemisch schädigen (Fotoretinitis) und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Wellenlänge. Da die Schädigung bei der Wellenlänge von 440 nm am stärksten ist, spricht man auch von der Blaulichtgefährdung. Die Schädigung ist ir-

reversibel und kann sogar bis zur Erblindung führen. Da in der Literatur nur wenig über diese Schädigungsart zu finden ist, lässt sich daraus ableiten, dass diese entweder selten auftritt oder häufig von der thermischen Netzhautschädigung nicht unterschieden wird.

Sichtbare Strahlung hoher Bestrahlungsstärke bei z. B. direktem Blick in die Sonne anlässlich beobachteter Sonnenfinsternisse kann zu einer starken Erwärmung und nachfolgenden Verbrennung der Netzhaut führen. Diese Schädigung hängt nicht nur von der Bestrahlungsstärke und Einwirkdauer, sondern auch von der Größe der auf der Netzhaut bestrahlten Fläche ab. Das Maximum der Wirkung liegt bei einer Wellenlänge von 435 nm – 440 nm. Netzhautverbrennungen sind irreversibel, werden jedoch bei eng begrenzten Verbrennungen auf der Netzhaut meist nicht wahrgenommen, solange sie nicht im Bereich des schärfsten Sehens (Fovea) liegen.

Sichtbare Strahlung höherer Bestrahlungsstärke kann z. B. beim Blick in die tief stehende Sonne eine Blendung der Augen verursachen. Die Blendung ist zwar keine direkte Schädigung der Augen, sie kann jedoch durch lang anhaltende Nachbilder das Sehen und Erkennen beeinträchtigen und damit Folgeschäden (z. B. Unfälle im Straßenverkehr, Fehlhandlungen am Arbeitsplatz) hervorrufen.

Sichtbare und angrenzende infrarote Strahlung noch höherer Bestrahlungsstärke E können an der Netzhaut irreversible thermische Schädigungen hervorrufen. Die thermische Schädigung (Eiweißgerinnung bzw. Koagulation) hängt außer von der Einwirkdauer auch von der Größe der bestrahlten Netzhautfläche ab. Dies kann z. B. durch den ungeschützten kurzzeitigen direkten Blick in die hoch stehende Sonne geschehen (Beobachtung einer fortschreitenden Sonnenfinsternis oder abnehmenden Verdeckung durch eine Wolke). Anstelle der Bestrahlungsstärke ist daher häufig die Strahldichte der Strahlenquelle bei der Risikobeurteilung zu berücksichtigen (Kap. 3). Punktuelle Netzhautschäden werden meist nicht wahrgenommen, außer im Bereich des schärfsten Sehens (Fovea). Größere Schäden oder Verbrennungen der Stelle, an der der Sehnerv in die Netzhaut eintritt („blinder Fleck“) können allerdings zur Erblindung führen.

Chronische Schäden

Als chronischer, schädigender Effekt für das Auge ist vor allem die irreversible Linsentrübung zu nennen (Grauer Star, Katarakt) [28]. Epidemiologische Studien belegen einen Zusammenhang zwischen UV-Strahlung und einer primären kortikalen Katarakt [29]. Mit zunehmender Lebenszeitbestrahlung steigt die Erkrankungsrate am Grauen Star. Zwischen 65 und 75 Jahren hat ein hoher Anteil der Bevölkerung einen Grauen Star, wobei schätzungsweise die Hälfte der Bevölkerung erst Sehstörungen bemerken, sobald sie das 75. Lebensjahr erreichen.

Jährlich werden in Deutschland ca. 600.000 Staroperationen durchgeführt, wobei die eigene getrübe Linse mit gutem Erfolg durch eine künstliche ersetzt wird [30]. Die Gründe für die Erkrankung werden einerseits in einer Zunahme der UV-Transmission der Hornhaut und einer dadurch bedingten erhöhten Strahlenbelastung der Linse vermutet, andererseits fehlt es den Zellen der Linse an Reparaturmöglichkeiten nach einem fotobiologischen Schaden. Linsenzellen werden zeitlebens nicht regeneriert, neue werden nur an der Oberflächenschicht gebildet. Durch eine Akkumulation von Mikroschäden kommt es zu einer altersbedingten zunehmenden Linsentrübung („Altersstar“). Auch eine langjährige IR-Strahleneinwirkung kann zu einer Trübung der Augenlinse führen. Diese Einwirkung wurde jedoch vornehmlich an Arbeitsplätzen mit sehr hohen Expositionen, wie z. B. in Glasbläsereien, beobachtet.

6.3.2 Die Haut

Die Haut kann in die drei Schichten Oberhaut, Lederhaut und Unterhaut unterteilt werden (s. Abb. 23 links). In der Oberhaut (Epidermis) befinden sich die Pigmentzellen (Melanozyten), Langerhanszellen (immunkompetente Zellen) und Hautzellen (Keratinocyten), aus denen dann die Hornschicht (Stratum corneum) als äußerer Abschluss entsteht. Die Lederhaut (Corium) enthält Haarwurzeln, Faserelemente, Gefäße und Nerven. Die Unterhaut (Subcutis) besteht vorwiegend aus lockerem Binde- und Fettgewebe und enthält die Schweißdrüsen. Durch die unterschiedlichen gewebeoptischen Eigenschaften sind die einzelnen Hautschichten bezüglich biologischer Wirkungen unterschiedlich betroffen. Abb. 23 zeigt neben dem schematischen Aufbau der Haut die Eindringtiefe der optischen Strahlung.

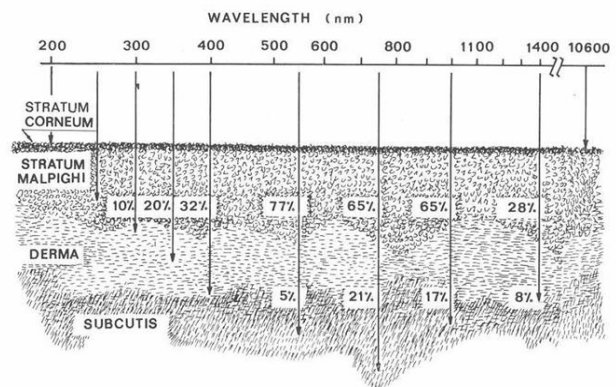
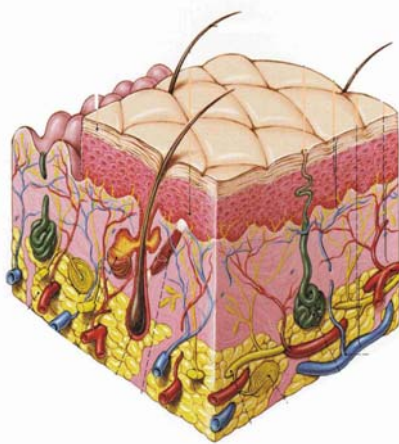


Abb. 23: links: Aufbau der Haut mit Epidermis (rot), Lederhaut (rosa) und Unterhaut (gelb) mit Schweißdrüsen (grün) aus: (Weitz, B. 1998, Atlas der Anatomie. Weltbild Verlag, München und rechts: Spektrale Eindringtiefe optischer Strahlung in die einzelnen Hautschichten (Slincy and Wolbarsht, Safety with Lasers, 1980) Für Solarstrahlung sind die Angaben von 290 nm aufwärts über UV-, VIS- und IR-Strahlung relevant

Abhängig von der Wellenlänge und von der Hautfarbe wird UV-Strahlung zu ca. 5-25 % reflektiert, der Rest gestreut und von den Zellbestandteilen absorbiert. Die in die Haut eingedrungene UV-B-Strahlung wird zu ca. 90 % schon in der Epidermis absorbiert. Chromophore sind in erster Linie Melanin, Harnsäure, Proteine und Nukleinsäuren. UV-A-Strahlung erreicht zu einem gewissen Anteil (20 %) die Dermis.

Im Bereich von 400 nm und 600 nm wird die Eindringtiefe der Strahlung in die Haut durch die Absorption des Blutes und die Streuung in der Kollagenfaserschicht beeinflusst. Strahlung zwischen 600 nm und 1200 nm kann am tiefsten bis in die subkutane Schicht gelangen.

Schutzmechanismen

Die Schwellendosis für ein Erythem unterliegt in einem gewissen Rahmen einer Veränderung, die durch die Lichtschwielereaktion [31] und die Melaninpigmentierung bestimmt werden. Die Lichtschwiele ist eine reaktive Proliferation der Epidermis mit Hyperkeratose. In Folge hoher UV-Dosen kommt es zu einer beschleunigten Zellteilung in der Epidermis. Die verdickte Oberhaut schützt darunter liegende Zellschichten über die daraus folgende höhere Absorption. Dieser Effekt setzt signifikant bei der Sonnenbrandschwellendosis ein. Der Effekt wird bereits in den ersten beiden Tagen nach Über-

exposition wirksam [32]. Nach Ablauf des typischerweise 30-tägigen Zyklus von der Zellteilung in der Basalmembran bis zur Abschuppung der abgestorbenen Hornzelle ohne erneute hohe UV-Exposition nimmt die Epidermis wieder die ursprüngliche Dicke und damit den ursprünglichen UV-Eigenschutz durch die Epidermisdicke an.

Die Neubildung von Melanin in der Epidermis erfolgt durch UV-B-Strahlung. Diese verzögerte Pigmentierung setzt nach etwa 3 Tagen ein und ist nach 5-7 Tagen abgeschlossen. Noch vorhandenes Pigment in der Haut kann durch UV-A-Strahlung photooxidativ gedunkelt werden.

Prinzipiell kann die Schwellendosis für ein Erythem bis zu einem Faktor von 40 erhöht werden. Das konnte nach täglicher UV-Exposition bis zur Schwelle zu einem Erythem über einen Zeitraum von 20 Tagen nachgewiesen werden. Allerdings ist diese Prozedur mit erheblichen DNS-Schädigungen verbunden.

Menschen können unterschiedlich empfindlich auf Sonnenstrahlung reagieren. Die heute gebräuchlichste Klassifikation von Hauttypen wurde 1975 von dem amerikanischen Hautarzt Thomas Fitzpatrick entwickelt. Danach werden sechs Hauttypen unterschieden, wobei die Einteilung der Hauttypen relativ grob ist – die Übergänge sind fließend. Die Hauttypen I bis IV nennt man auch die europäischen Hauttypen, denn sie sind typisch für die europäische Bevölkerung, Es gibt noch Hauttyp V, typisch für Bewohner Arabiens, Nordafrikas, Indiens und für dunkle Asiaten und Hauttyp VI typisch für die Ureinwohner Zentralafrikas und Australiens. Die nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Charakterisierung der Hauttypen, eine ungefähre Verteilung in der deutschen Bevölkerung [33] und die minimale erythemwirksame Schwellenbestrahlung (MED). Die zusätzlich aufgeführte ungefähre Zeit zum Erreichen eines Erythems bei nicht vorgebräunter Haut bezieht sich auf einen wolkenlosen Sonnentag in Mitteleuropa zur Mittagszeit.

Tab. 6: Einteilung von Erwachsenen in Hauttypen, Verteilung in der deutschen Bevölkerung *)entsprechend [33], mit MED und Zeit zum Erreichen eines Erythems

Hauttyp	Beschreibung des Hauttyps	Reaktion auf UV-Bestrahlung	Verteilung in dt. Bevölkerung [%] *)	MED [J·m ⁻²]	Zeit zum Erreichen eines Erythems [min]
I	Haut: sehr hell, Augen: blau	immer Sonnenbrand, kaum oder keine Bräunung (hohes Sonnenbrandrisiko)	4	200	15 - 20
II	Haut: hell, Augen: blau, grün, grau	fast immer Sonnenbrand, mäßige Bräunung	57	250	20 - 25
III	Haut: hell-hellbraun Augen: grau, braun	mäßig oft Sonnenbrand, fortschreitende Bräunung	35	350	28 - 35
IV	Haut: hellbraun, oliv Augen: dunkel	selten Sonnenbrand, schnell einsetzende Bräunung	4	450	36 - 45

Akute Effekte

Bezüglich akuter Effekte an der Haut ist der kurzwellige solare UV-Anteil in erster Linie für die Bildung eines Erythems verantwortlich. Diese entzündliche Hautrötung wird durch fotochemische Prozesse hervorgerufen, die mit der Entstehung von Zellentzündungsstoffen (Cytokine und Chemokine) verbunden sind [34]. Aufgrund einer gefäßer-

weiternden Reaktion durch Prostaglandine, die aus Zellmembranen freigesetzt werden, erhöht sich die Hautdurchblutung und die Haut schwillt an. Es kommt zu Juckreiz und Schmerzempfindung. Die erforderliche Bestrahlung zum Erreichen einer gerade beginnenden Hautrötung (Erythem) wird als minimale Erythemdosis (MED) bezeichnet. Die UV-Dosis, die nach 24 Stunden zur MED für den empfindlicheren Hauttyp II führt, beträgt im Mittel 250 J/m² Standarderythem - gewichteter UV-Strahlung. Das UV - Erythem setzt nach Exposition über der Erythemschwelle erst verzögert nach 2-3 Stunden ein. Man hat keinen natürlichen Indikator für das Erreichen der Sonnenbrandschwelle. Das Maximum der Sonnenbrandreaktion ist nach 8-12 Stunden erreicht.

Der längerwellige solare UV-Anteil initiiert vorwiegend fototoxische und fotoallergische Prozesse, die über körpereigene oder -fremde Stoffe die Strahlenempfindlichkeit der Haut erhöhen, wie z. B. bestimmte Medikamente und Kosmetika [35]. Fototoxische Reaktionen können klinisch gewöhnlich als erythemähnliche Reaktionen charakterisiert werden, fotoallergische Reaktionen treten auf, wenn bestimmte, durch UV-Strahlung aktivierte und umgewandelte Stoffe Allergencharakter annehmen.

Eine kleine Übersicht über gebräuchliche Substanzen gibt Tab. 7. Aber auch Lebensmittel und Pflanzen, die Furokumarine enthalten (z. B. Herkulesstauden etc.) und wie z. B. Zitrusfrüchte, Sellerie und Gemüse, können fotosensibilisierende Stoffe enthalten und bei Einnahme oder teilweise bei Kontakt zu sonnenbrandähnlichen Hautreaktionen führen.

Unter geeigneten Bedingungen können fototoxische Reaktionen bei jedem Menschen, fotoallergische bei einigen exponierten Personen hervorgerufen werden. Letztere Reaktionen sind mit Schwellungen, Nässen oder Blasenbildung an den exponierten Hautpartien verbunden. Unter Lichtdermatosen versteht man endogene Lichtkrankheiten zum Teil unbekannter Genese, die schon nach Minuten ausgelöst werden können und nach Tagen bis Wochen abklingen. Lichtdermatosen sind gekennzeichnet durch Quaddeln, Rötungen, Ekzeme sowie starken Juckreiz.

Tab. 7: Lichtempfindliche Medikamente und chemische Stoffe

Substanz	Anwendungsform
Antiseptika	Seifen
Blankophore	Waschmittel
Chloroquin	Antimalariamittel/Antirheumatika
Chlorothiazide	Diuretika
Cyclamate	Süßstoffe
Sulfonamide	Antibiotika/Chemotherapeutika
Tetracyclin	Antibiotika
Triacetyldiphenylisatin	Abführmittel

Chronische Wirkungen

Bei zu häufigen UV-Expositionen kommt es vornehmlich zu Pigmentverschiebungen, Austrocknung, Faltenbildung und Bindegewebsschädigung, sowie der Atrophie der

Haut. UV-A-Strahlung trägt besonders zu dieser vorzeitigen Hautalterung bei [36].

Tab. 8 Situation der Hautkrebsentwicklung in Deutschland. Nach: Krebsregister Schleswig-Holstein

Hochrechnungen für Deutschland Hautkrebserkrankungen pro Jahr

Art	Gesamt	Männer	Frauen
Malignes Melanom, invasiv	15.553	7.329	8.225
Malignes Melanom, in situ	8.657	3.553	5.103
Malignes Melanom, gesamt	24.210	10.882	13.328
Basalzellkarzinom	116.875	58.241	58.634
Spinozelluläres Karzinom, invasiv	30.162	16.714	13.448
Spinozelluläres Karzinom, in situ	23.851	10.937	12.914
Spinozelluläres Karzinom, gesamt	54.013	27.651	26.362
Hautkrebs gesamt	195.099	96.774	98.325

Datenquelle: Krebsregister Schleswig-Holstein, 2007

Die weitaus schwerwiegendste Folge übermäßiger UV-Exposition ist die Bildung von Hautkrebs, der weltweit zu den am häufigsten auftretenden Krebsarten zählt. Nach Angaben der Arbeitsgemeinschaft Dermatologische Prävention (ADP) sind in Tab. 8 die geschätzten Neuerkrankungsraten für Hautkrebs in Deutschland aufgeführt. Diese liegt bei knapp 200.000/Jahr im Vergleich zu allen anderen Krebsarten mit ca. 350.000/Jahr. Als Hauptursache für den starken Anstieg wird die UV-Belastung bei zunehmenden Aufenthalten im Freien verantwortlich gemacht. Als Risikofaktoren gelten generell familiäre Häufung und Zugehörigkeit zum Hauttyp I und II.

Über 90 % der bösartigen Neubildungen der Haut sind epidermalen Ursprungs. Bei den Basalzell- und Plattenepithelkarziomen konnte ein direkter Zusammenhang zwischen UV-Bestrahlung und Hautkrebsinzidenz beobachtet werden [37]. Beim Basalzellkarzinom handelt es sich um einen langsam wachsenden, lokal Gewebe zerstörenden Tumor ohne Metastasenbildung. Er tritt vorwiegend in exponierten Hautpartien wie Gesicht, Ohren und Kopfhaut auf. Obwohl die Sterblichkeit sehr niedrig ist, stellt die Therapie häufig ein großes kosmetisches Problem dar. Das Plattenepithelkarzinom ist ein invasiver, lokal destruierender Tumor, der ab einer bestimmten Größe auch Metastasen bilden und zum Tode führen kann. Es besteht hier ein Zusammenhang zur kumulativen UV Strahlungsdosis. Er tritt ebenfalls an exponierten Hautpartien wie Gesicht, Handrücken und Unterarmen auf, dann meist zunächst als aktinische Keratose (früher als Präkanzerose bezeichnet) bzw. Carcinoma in situ, wobei hier die entarteten Zellen nur im Epidermisbereich auffindbar sind. Im Laufe der Zeit kommt es dann jedoch zum Wachstum in die Dermis.

Beim malignen Melanom ist die Situation nicht so eindeutig. Obwohl Melanome nicht bevorzugt in UV-exponierten Hautarealen auftreten und in der Häufigkeit nicht direkt mit der kumulativen UV-Dosis korrelieren, sprechen epidemiologische Daten für einen wesentlichen UV-Einfluss hier jedoch durch Sonnenbrände in der Kindheit und Jugend bei der Verursachung dieser Erkrankung [38]. Das maligne Melanom (schwarzer Haut-

krebs) ist ein unterschiedlich wachsender, in der Regel braungefärbter Tumor, der Metastasen bildet und an beliebigen Hautpartien auftreten kann. Bei Früherkennung ist der Tumor überwiegend heilbar, bei verzögerter Therapie oft tödlich. Als weitere Risiken kommen über 40-50 multiple Pigmentmale und erbliche Faktoren hinzu.

UV-Strahlung kann ebenfalls das menschliche Immunsystem [39] siehe oben! verändern. Wegen der Komplexität sind die genauen molekularen Mechanismen noch nicht aufgeklärt. Fest steht, dass schon Dosiswerte deutlich unterhalb einer MED zu einer Immunsuppression (Minderung der Eigenabwehrkräfte des Körpers) der Haut führen können. Das beste klinische Beispiel ist eine Zunahme von Herpes-Virus-Infektionen nach längeren Sonnenexpositionen im Sommer.

6.3.3 Gesamtorganismus

Für den Gesamtorganismus stark belastende Klimabedingungen wie z. B. intensive Sonneneinstrahlung, hohe Luftfeuchtigkeit und Temperaturen führen bei falschem Verhalten sehr schnell zu Störungen im Wärmehaushalt. Personen mit labilem Kreislauf, Übergewicht, hohem Alter und mit allgemein schwächenden Erkrankungen sollten eine übermäßige Sonnenexposition und körperliche Anstrengungen in diesen Situationen vermeiden. Wichtigste akute Folgen einer äußerlich bedingten Übererwärmung des Körpers sind der Sonnenstich und Hitzekollaps

Sonnenstich

Lang andauernde, direkte Sonnenexpositionen auf den unbedeckten Kopf können neben der UV-B-induzierten erythematösen Reaktion an der Hautoberfläche die Hirnhaut durch die tiefer eindringende IR-Strahlung direkt reizen. Es kommt zu Kopfschmerzen, Schwindel, Ohrensausen und Gleichgewichtsstörungen. Weiterhin wird durch eine Störung des Temperaturregelungszentrums die Körpertemperatur erhöht. Die Reaktionen treten erst einige Stunden nach der Exposition auf.

Hitzekollaps und Hitzschlag

Unter einem Hitzekollaps versteht man ein Versagen des peripheren Kreislaufes. Um eine Temperatursenkung zu erreichen, will der Körper überschüssige Wärme nach außen abführen. Wenn durch hohe Luftfeuchtigkeit der Mechanismus der Schweißabsonderung versagt, kann die Wärme nur noch durch Abstrahlung und Konvektion abgegeben werden. Zur Durchblutungssteigerung werden die Gefäße maximal erweitert mit der Folge eines Blutdruckabfalls, einem zu geringen Blutrückfluss zum Herzen und zu geringer Versorgung des Gehirns mit Sauerstoff. Als Beschwerden sind Schwindelgefühle, Sehstörungen, Ohrensausen und Atembeschleunigung zu nennen.

Ursache des Hitzschlages ist das Unvermögen des Körpers, die aufgenommene Wärme nach außen abzugeben. Durch fehlende Schweißsekretion kann es zum Wärmestau mit einem Temperaturanstieg bis zu 42 °C kommen. Dann setzt Bewusstlosigkeit ein. Hitzschlag ist eine lebensbedrohende Erkrankung.

7 Gesundheitliche Bewertung der Sonnenstrahlung

Um sich vor der Sonnenstrahlung optimal zu schützen, muss diese zunächst einer gesundheitlichen Bewertung unterzogen werden, d. h. deren gesundheitliches Risiko ermittelt werden. Erst dann können, wie in Kapitel 8 aufgeführt, geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden. Für eine gesundheitliche Bewertung der Sonnenstrahlung sind zwei Schritte erforderlich: zunächst muss ermittelt werden, welche biologischen

Folgeerscheinungen mit der Bestrahlung in kausalem Zusammenhang stehen, in einem zweiten Schritt werden dann deren Risiken für eine Gefährdung quantitativ abgeschätzt. Im vorhergehenden Kapitel wurden die biologischen Wirkungen der Sonnenstrahlung bereits dargestellt, in diesem Kapitel wird das Verfahren der quantitativen Risikoabschätzung beschrieben. Dazu sind Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die einzelnen UV-induzierten biologischen Wirkungen zu bestimmen.

Die Gefährdung wird grundsätzlich durch die jeweils restriktivste Funktion festgelegt, d. h. hier durch die Hautkrebsentstehung. Nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand hat das Wirkungsspektrum für den Hautkrebs einen ähnlichen Verlauf wie die frühzeitige Hautalterung und das Erythem. Da das Erythem eine akute biologische Antwort auf eine zu starke UV-Bestrahlung ist, empfiehlt er sich als ein geeigneter Indikator für eine gesundheitliche UV-Bewertung.

7.1 Wirkungsfunktionen

Für jede photobiologische Wirkung ist eine bestimmte relative spektrale Wirkungsfunktion maßgebend, die je nach der Art der Wirkung innerhalb bestimmter Bereiche der Stärke der Wirkung und der Bestrahlungsdauer gilt. Wie bereits erwähnt, zeigen die Wirkungen der UV-Strahlung eine sehr starke Wellenlängenabhängigkeit. Sowohl für das Auge als auch für die Haut ist der kurzwellige UV-Bereich bis ca. 300 nm hoch wirksam und fällt dann bei längeren Wellenlängen ab.

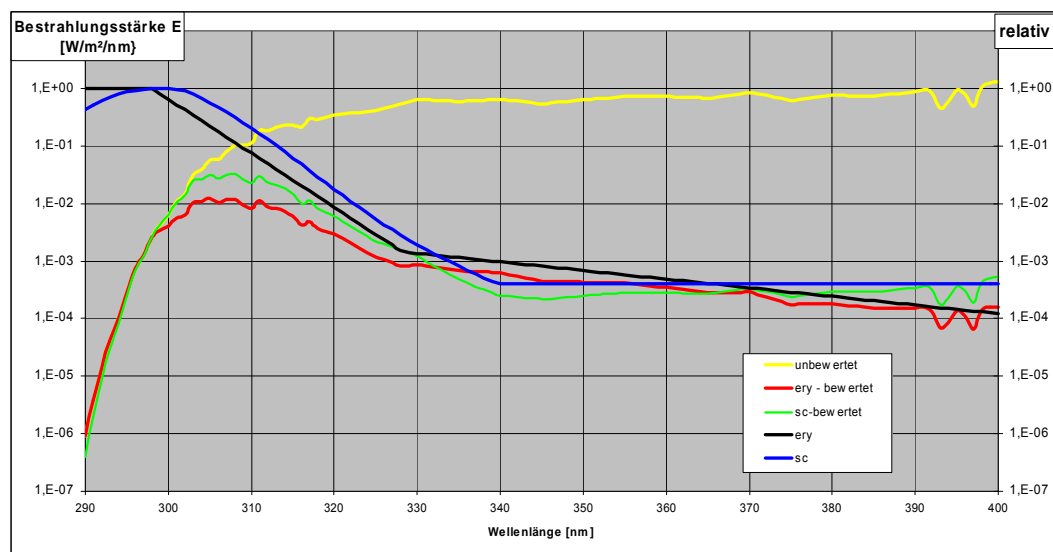


Abb. 24: Solares unbewertetes UV-Spektrum, jeweils mit der Erythem- (ery) und Hautkrebs (sc) –Wirkungsfunktion bewertet, sowie deren Wirkungsfunktionen in relativen Einheiten

Nach Abb. 24 bedarf es z. B. zur Ausbildung eines Erythems im langwelligen UV-Bereich über 1000-fach höherer spektraler Bestrahlungsstärken als im kurzwelligen UV-Bereich. Aus diesem Grund muss die jeweilige biologische Wirksamkeit für jede einzelne Wellenlänge ermittelt werden. Auf diese Weise erhält man sodann ein biologisches Wirkungsspektrum im entsprechenden Wellenlängenbereich. Es wird auf die Wellenlänge maximaler Wirksamkeit mit dem Wert 1 normiert (s. Tab.9).

Nach multiplikativer Verknüpfung mit der physikalisch gemessenen spektralen UV-Bestrahlungsstärke erhält man die biologisch wirksame spektrale UV-Bestrahlungsstärke für die jeweilige biologische Wirkung. Allerdings sind bei dieser Vorgehensweise zu erwartende synergistische Effekte nicht berücksichtigt.

Tab. 9: Erythemale Wirkungsfunktion nach CIE (1987) für verschiedene Wellenlängenbereiche

$\lambda \leq 298 \text{ nm}$	$S_{er}(\lambda) = 1.$
$298 \text{ nm} < \lambda \leq 328 \text{ nm}$	$S_{er}(\lambda) = 10^{0.094 \cdot (298 - \lambda)}$
$328 \text{ nm} < \lambda \leq 400 \text{ nm}$	$S_{er}(\lambda) = 10^{0.015 \cdot (139 - \lambda)}$

Für die Bewertung einer photobiologischen Wirkung im UV-Bereich ist weiterhin entscheidend, in welchem Zeitraum die UV-Strahlung auf den Menschen einwirkt, d. h., welcher UV-Dosis sich der Mensch aussetzt. Als praktisch hat sich erwiesen, aus den physikalisch gemessenen UV-Daten abzuleiten, welche erythemwirksame UV-Dosis in jeweils 30 Minuten den Erdboden erreicht. In ungefähr diesem Zeitraum kann für ungeschützte und nicht lichtgewöhnte Haut in unseren Breitengraden im Sommer die Schwellendosis für ein Erythem erreicht werden. Mit diesen Daten kann des Weiteren der Tagesverlauf der UV-Strahlung noch ausreichend genau nachgebildet werden.

Ein weiteres wichtiges Wirkungsspektrum ist die sog. nmSC – Wirkfunktion (non melanoma skin cancer) $s_{nmSC}(\lambda)$ für die Entstehung eines Plattenepithelkarzinoms und eines Basalioms. Diese wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE im Dokument CIE S 013/E:2006 veröffentlicht [40] und beruht auf wissenschaftlichen Untersuchungen der Universitäten in Utrecht und Philadelphia, USA. Die Wirkfunktion $s_{nmSC}(\lambda)$ hat nach Abb. 24 einen ähnlichen Verlauf wie die Wirkfunktion $s_{er}(\lambda)$, d. h., mit einem Maximum bei 299 nm liegt sie überwiegend im UV-B-Bereich. Das entspricht den heutigen Kenntnissen, dass der Hautkrebs hauptsächlich durch UV-B-Strahlung verursacht wird. Der exakte Verlauf einer spektralen Wirkungsfunktion für den menschlichen Hautkrebs ist aber bis heute nicht bekannt. Die entsprechende standardisierte Wirkungsfunktion wird aber als gute Näherung dafür betrachtet.

7.2 UV-Index


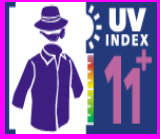

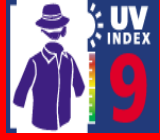


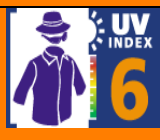





Als sehr effektives Maß für eine Gefährdungsbeurteilung bietet sich der in den 90er Jahren international eingeführte UV-Index (UVI) an, in Deutschland eingeführt vom DWD und BfS. Der UVI ist zwischenzeitlich in mehreren Expertensitzungen von WMO, WHO und ICNIRP harmonisiert worden [41,42]. Obwohl für die Öffentlichkeit eingeführt, kann er ebenfalls für die Arbeitnehmer im Freien genutzt werden, da er generell verfügbar ist.

Der globale solare UV-Index (Global solar UV-Index) ist eine Messgröße bezogen und definiert auf eine horizontale Empfangsfläche. Als dimensionslose Größe kann er nach folgender Formel bestimmt werden [41]:

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

mit E_{λ} als solare spektrale Gesamtbestrahlungsstärke in der Dimension $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ bei der Wellenlänge λ , $d\lambda$ ist das im Integral definierte Wellenlängenintervall, $s_{er}(\lambda)$ ist die spektrale Wirkungsfunktion für das Erythem nach CIE (1987) und k_{er} ist eine Konstante mit dem Wert 40 und der Dimension m^2/W . Durch den konstanten Faktor 40 erhält der UV-Index einen Wertebereich, der zwischen Null, als (winterlichem) Minimum, und etwa 15 als Jahresmaximum in tropischen Breiten variiert.

Tab. 10: Empfohlenes UVI-Schutzschema der WHO/WMO/ICNIRP mit Angaben über Zeiten zum Auftreten eines Erythems (bei Hauttyp II)

	UVI	Klassifikation	Längste Expositions-dauer zur Vermeidung eines Erythems (ohne Hautschutz)	Schutz	Empfohlene Schutzmaßnahmen
	11 und mehr	extrem hoch	ab > 10 min.	Extra-schutz	Zusätzlich zu Empf. bei UVI 10: Mindestens in der Zeit von 11:00 bis 15:00 (MEZ) sollten, sofern es möglich ist, der Schatten aufgesucht werden bzw. Arbeiten im Innenraum verrichtet werden!
	10	sehr hoch	ab > 15 min.	Extra-schutz	In der Mittagszeit sollte der Schatten aufgesucht werden! Bei Aufenthalt in der Sonne <u>unbedingt</u> körperbedeckende Kleidung und ggf. Kopfbedeckung tragen. Je nach Aufenthaltsdauer und Vorbräunung Sonnencreme verwenden!
	9		ab > 20 min		
	8				
	7	hoch	ab > 25 min	erforderlich	In der Mittagszeit sollte der Schatten aufgesucht werden! Bei Aufenthalt in der Sonne unbedingt körperbedeckende Kleidung und ggf. Kopfbedeckung tragen. Je nach Aufenthaltsdauer und Vorbräunung Sonnencreme verwenden!
	6		ab > 30 min		
	5	mittel	ab > 35 min	erforderlich	Bei Aufenthalt in der Sonne körperbedeckende Kleidung und ggf. Kopfbedeckung tragen. Je nach Aufenthaltsdauer und Vorbräunung Sonnencreme verwenden!
	4		ab > 40 min		
	3		ab > 60 min		
	2	schwach	ab > 90 min	nicht erforderlich	
	0-1		-		

Die in vielen Ländern allein angegebenen Zeiten zum Erreichen eines Sonnenbrandes werden von Strahlenschützern kontrovers diskutiert. Einerseits erscheinen sie ein einfaches Konzept zu sein, das von der Bevölkerung direkt in eine Verhaltensmaßnahme umgesetzt werden kann. Auf der anderen Seite können konkrete Zeitangaben von der Öffentlichkeit so interpretiert werden, dass es einen sicheren Wert gibt, bis zu dem Sonnenbestrahlung sicher ist. Der UVI soll nicht implizieren, dass ausgedehntes Besonnenen akzeptabel ist, sondern aufzeigen, dass kumulative UV-Exposition auch die Hautkrebsentwicklung fördert. In der Tabelle 10 sind die UVI-Schutzschemata aufgeführt, die von der WHO, dem WMO und der ICNIRP als Konsensus veröffentlicht worden sind [42].

Die Ermittlung des UVI kann durch Modellberechnungen oder Messungen erfolgen. Bei Messungen können folgende 2 Verfahren verwendet werden: entweder die solare UV-Strahlung mit einem Spektralradiometer erfassen und den UVI nach obiger Gleichung (8) ermitteln oder die Strahlung mit einem Breitbanddetektor messen, der mit einem Filter entsprechend der Erythemwirkungsfunktion nach CIE (1987) $s_{er}(\lambda)$ versehen ist und die UVI - Werte direkt anzeigt.

7.3 UV-Vorhersage

Seit einigen Jahren werden von verschiedenen Institutionen Vorhersagen oder aktuelle Messwerte der UV-Belastung zur Verfügung gestellt. Dabei wird zumeist der UV-Index als Maßzahl verwendet.

In Deutschland werden zurzeit vom BfS und vom DWD UV-Vorhersagen erstellt. Die 1-Tages-Vorhersagen des DWD (Abb. 25 b) basieren auf Rechnungen mit einem Strahlungstransfermodell, verknüpft mit den zu prognostizierenden Parametern Gesamt-ozongehalt, optischer Dicke des Aerosols und präziser Wolkenparametrisierung.

Die 3-Tages-Vorhersagen des BfS (Abb. 25 a) basieren auf statistischen Auswertungen der vorhandenen UV-Messdaten. Unter Kenntnis der bevorstehenden Wetterlage werden daraus sodann die UV-Prognosewerte ermittelt, die unter den gleichen Bedingungen bereits erfasst wurden.

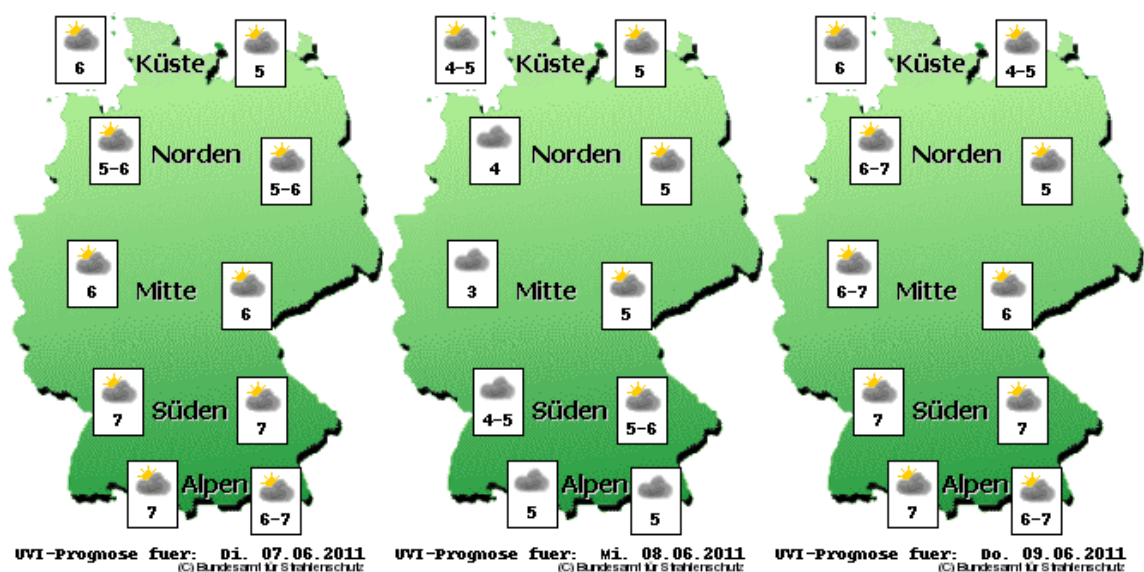


Abb. 25 a: BfS - Darstellung im Internet (www.bfs.de) einer 3-Tages-UVI-Prognose

UV-Index Vorhersage für den 27.07.11

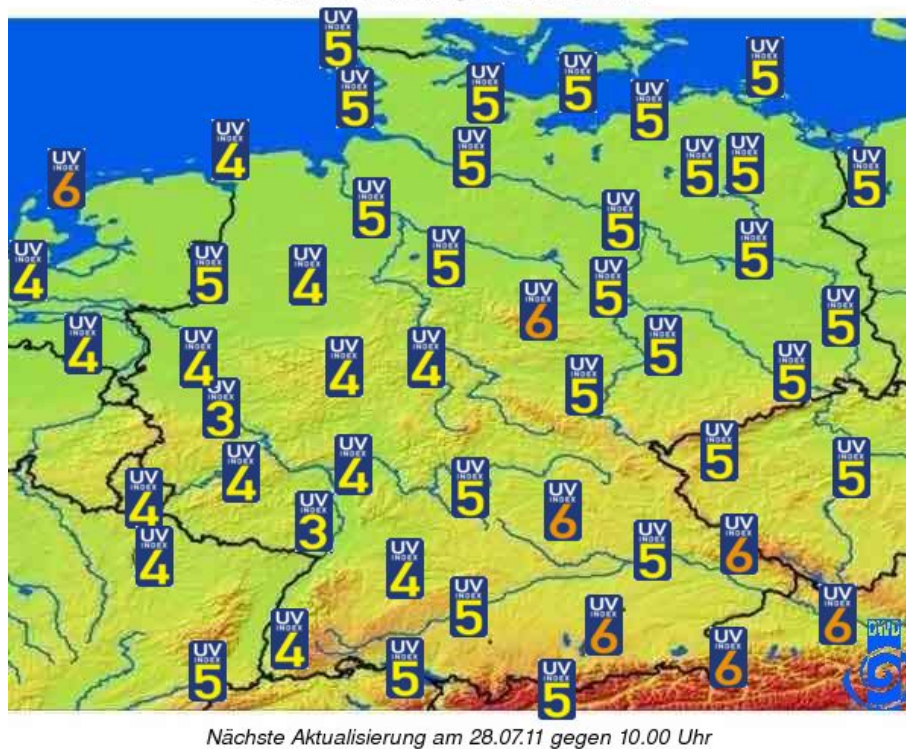


Abb. 25 b: DWD-Darstellung einer 1-Tages-UVI-Prognose im Internet (www.dwd.de)

8 Sonnenschutzempfehlungen

Allgemeine Empfehlungen

Schutzmaßnahmen gegen Sonnenstrahlung sind nicht schwierig vorzunehmen. Es gilt die Grundregel, dass ein sicherer Schutz zunächst durch geeignete Abschirmung vorgenommen werden sollte. Erst dann sollten organisatorische Maßnahmen getroffen werden, wie z. B. Begrenzung der Aufenthaltsdauer. Als letztes sind persönliche Schutzmaßnahmen anzuwenden, wie geeignete Sonnenschutzbrillen, Kleidung und dermale Sonnenschutzmittel. Grundlegende Verhaltensregeln für den Aufenthalt in der Sonne gelten sowohl für die Bevölkerung, als auch für die Arbeitnehmer im Freien [18].

8.1 Empfehlungen für die Bevölkerung

Verhaltensregeln

Auf einen Urlaub im sonnigen Süden sowie auf Aktivitäten im Freien muss man nicht verzichten, wenn einfache Verhaltensregeln (ab ca. UV-Index 5 und größer) beachtet werden:

- Die Haut sollte langsam an die Sonnenbestrahlung gewöhnt werden. Eine Vorbräunung zur Vermeidung eines Sonnenbrandes durch Solarien ist nicht ratsam, da der Eigenschutz der Haut durch die Bestrahlung mit UV-A-Bestrahlungsgeräten nicht erhöht wird. In den ersten Tagen der intensiven Sonnenbestrahlung möglichst im Schatten bleiben. Jede Rötung der Haut sollte vermieden werden, wobei die Dauer des unbeschwertes Sonnenbades vom Hauttyp abhängt. **Hinweis:** Der Schatten unter einem Baum entspricht einem Licht-

schutzfaktor von ca. 5-15, und unter einem Sonnenschirm ist ein Lichtschutzfaktor von ca. 5 bis 40 (bei großem Durchmesser und dichten Textilien) erreichbar.

- Der Aufenthalt in der Mittagssonne im Sommer sollte unterbleiben, da die Sonnenstrahlung im Zeitraum 11 bis 15 Uhr (mitteleuropäische Sommerzeit, siehe Abbildung 13) besonders stark ist. Lernen Sie aus dem Verhalten der Menschen im Mittelmeerraum und ziehen sie sich über die Mittagszeit zur Siesta in den Schatten zurück.
- Der wirksamste Schutz vor Sonnenstrahlung sind neben Schatten geeignete Kleidung und eine Kopfbedeckung (besonders wichtig bei Personen mit lichthem oder fehlendem Kopfhaar).
- Mit dermalen Sonnenschutzmitteln (Sonnenlotion) sollten die nicht durch die Kleidung bedeckten Körperteile geschützt werden.
- Der direkte Blick in die pralle Sonne ist zu vermeiden. Bei intensiver Sonnenstrahlung ist eine geeignete Sonnenschutzbrille zu tragen. Dies gilt insbesondere bei Reflexion durch Sand, Wasser oder Schnee.
- Einige Medikamente haben eine fotosensibilisierende Nebenwirkung. Hierzu sollte vor dem Sonnenbaden die Packungsbeilage gelesen und gegebenenfalls der behandelnde Arzt befragt werden.
- Auf Parfüms, Deodorants und andere Kosmetika sollte beim Aufenthalt in der Sonne verzichtet werden, da dadurch bleibende fleckige Pigmentierungen entstehen können.

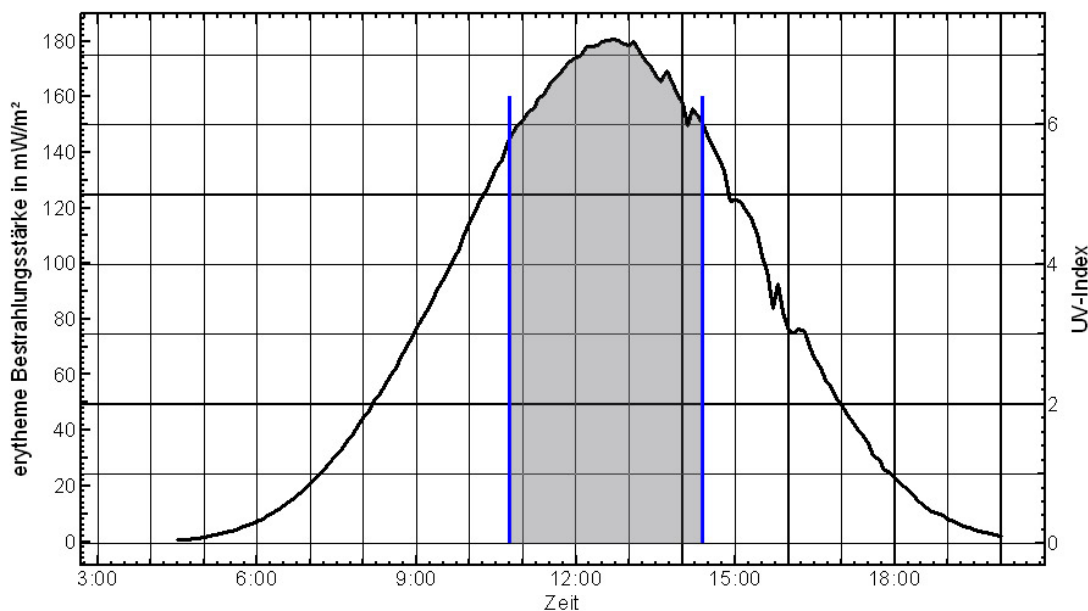


Abb. 26: Typischer Tagesverlauf der erythem bewerteten Sonnenstrahlung für einen wolkenlosen Himmel. Die senkrechten Markierungen geben das Zeitfenster an, in dem 50 % der UV-Strahlung des gesamten Tages auftritt

Sonnenschutzmittel

Vermeiden ist die effektivste Schutzmaßnahme, danach folgt erst der Schutz durch Bekleidung, wobei die Schutzwirkung von **Textilien** u. a. von Material, Gewebedichte, Farbe und UV-absorbierenden bzw. -reflektierenden Zusätzen abhängig ist. Im Allge-

meinen gilt, je dichter und dunkler Textilien sind, umso besser ist der UV-Schutz. Zum Beispiel entspricht eine feinmaschige Baumwollkleidung einem Lichtschutzfaktor von ca. 40, während grobmaschige Baumwollkleidung einen Lichtschutzfaktor von ca. 10 erreicht. Bei nasser Kleidung verringert sich der UV-Schutz bis zu 50 %. Das Tragen von zu warmer Kleidung in sehr heißer Umgebung kann bei gleichzeitiger starker körperlicher Anstrengung zu einem Wärmestau und zu einem Hitzschlag führen. Ein hoher Lichtschutzfaktor kann bei leichter, lockerer Sommerkleidung durch UV-Zusätze erzielt werden. Eine Hilfe beim Kauf von Bekleidung werden zukünftig Angaben zum UV-Schutz an Textilien sein.

Neben der Schutzkleidung sollten bei starker Sonnenstrahlung Sonnenschutzbrillen verwendet werden. Zum einen sollen die Sonnenschutzbrillen und Sonnenschutzfilter die Blendung durch die direkte oder reflektierte Sonnenstrahlung verringern und zum anderen die schädigende UV-Strahlung von den Augen fernhalten. Sonnenschutzbrillen sollten passgenau sein und über einen Seitenschutz verfügen, damit reflektierende Strahlung das Auge nicht erreicht.

Die Anforderungen an die Sonnenbrillen und Sonnenschutzfilter für den allgemeinen Gebrauch sind in der DIN EN 1836 festgelegt [43]. Diese Norm gilt für den privaten Bereich und schließt die aktive Teilnahme am Straßenverkehr, z. B. Autofahren mit ein. Weiterhin sind Festlegungen zu Filtern enthalten, die für die direkte Beobachtung der Sonne geeignet sind. Die europäische Norm enthält umfassende Anforderungen zu Sonnenschutzfiltern, vollständigen Sonnenbrillen (Fassungen mit Filtern), Prüfverfahren zur Kennzeichnung, sowie Anhänge mit vielen nützlichen Hinweisen u. a. zu Anwendungsbereichen der Sonnenschutzbrillen.

Ein bestimmendes Merkmal bei Sonnenbrillen ist ihre Lichtdurchlässigkeit, die sich auch in der Tönung der Filter, von leicht bis sehr dunkel, zeigt. Danach sind die Sonnenschutzfilter in 5 Kategorien von 0 bis 4 eingeteilt. Die Höhe der Filterkategorie gibt an, wie stark die Augen vor Blendung geschützt werden. Der Lichttransmissionsgrad ist zudem die ausschlaggebende Größe für die zulässige Transmission im ultravioletten Spektralbereich. Für Filter der Kategorien null bis zwei gelten die gleichen Anforderungen für den UV-Schutz. Bei den höheren Filterkategorien 3 und 4 muss die UV-Strahlung durch die Filter stärker herausgefiltert werden.

Für die meisten Anwendungen in unseren Breitengraden sind mittelstark bis dunkel getönte Filter der Kategorie zwei und drei zu empfehlen. Die Filterkategorie 3 ist z. B. für Sportanwendungen (Skifahren, Wassersport), Strand, Tropen und für das Hochgebirge geeignet. Die höchste Kategorie vier ist für extreme Bedingungen, z. B. für den Einsatz bei stark UV-reflektierender Schneefläche oder Gletscher zweckdienlich.

Problematisch sind u. U. modisch gefärbte Sonnenschutzfilter, die eine Farberkennung erschweren. Die sehr dunkel getönten Sonnenschutzfilter der Kategorie 4 sind wegen der zu geringen Transmission im sichtbaren Spektralbereich nicht für den Straßenverkehr geeignet.

Unbedeckte Körperstellen sind mit dermalen Sonnenschutzmitteln einzureiben. Bei der Auswahl findet der Käufer den Begriff des Lichtschutzfaktors auf dem Produkt. Die Höhe des Lichtschutzfaktors gibt an, um wie viel länger man mit einem dermalen Sonnenschutzmittel im Vergleich zu ungeschützter Haut in der Sonne bleiben kann, ehe eine Rötung der Haut entsteht. Der Lichtschutzfaktor bezieht sich allerdings nur auf die UV-B-Schutzfunktion; d. h. die UV-A-Strahlung ist im Lichtschutzfaktor nicht einbezogen. Die Verwendung der dermalen Sonnenschutzmittel kann jedoch bei einigen Personengruppen (Allergiker und Neurodermitiker) zu Hautreizungen führen. Hier empfiehlt es sich, gegebenenfalls nach Absprache mit dem Arzt, Produkte ohne Farb-, Duft- und

Konservierungsstoffe oder Produkte, die auf physikalischer Wirkung (Reflexion an Pigmenten) beruhen, auszuwählen.

Folgende Punkte sind bei dermalen Sonnenschutzmitteln zu beachten:

- Für die ersten intensiven Sonnentage sind dermale Sonnenschutzmittel (Creme) mit einem hohen und hauttypgerechten Schutzfaktor zu verwenden. Für die empfindlichen Hauttypen I und II sollte der Lichtschutzfaktor mindestens 30 betragen. Bei der Auswahl des Lichtschutzfaktors sind u. a. die Jahreszeit und die geografische Lage des Aufenthaltslandes zu berücksichtigen.
- Die Haut an den Sonnenterrassen des Körpers wie z. B. Stirn, Glatze, Ohren, Schultern und Brüste ist je nach Körperbedeckung (Kleidung) verstärkt solarer Strahlung ausgesetzt und daher besonders zu schützen.
- Dermale Sonnenschutzmittel sind im Schatten genügend lange vor dem Sonnenbaden in ausreichender Menge aufzutragen, damit sie ihre Schutzfunktion voll entfalten können. Sonnenschutzmittel sind am Tag mehrfach aufzutragen, da die Schutzwirkung durch Schweiß und Abreibungen an einigen Körperstellen verloren gehen kann, wobei zu beachten ist, dass ein Nachcremen nicht die Schutzdauer pro Tag verlängert. Zu beachten ist, dass die Schutzfunktion nur bei einer ausreichend dicken Auftragsmenge (ca. 2 mg/cm²) erreicht wird.
- Beim Baden sollten nur wasserfeste dermale Sonnenschutzmittel verwendet werden. Nach dem Baden sollte man sich neu eincremen, da ein Teil des Schutzes durch Schwimmen, anschließendes Duschen und Abtrocknen verloren geht.
- Hohe Lichtschutzfaktoren mit Werten über 30 sollten nicht zu einem unmäßigen Aufenthalt in der Sonne verleiten.

Besondere Empfehlungen für Kinder

Kinder haben das Verlangen, sich viel im Freien aufzuhalten, wo sie verstärkt der Sonnenstrahlung ausgesetzt sein können. Gerade Kinderhaut ist besonders empfindlich gegenüber UV-Strahlung, da in den ersten Lebensjahren der Eigenschutz noch nicht vollständig entwickelt ist. Häufige Sonnenbrände und eine übermäßige UV-Belastung während der Kinderzeit haben ein erhöhtes Hautkrebsrisiko in späteren Jahren zur Folge. Für Kinder sind insbesondere folgende Punkte zu beachten:

- Sonnengerechte Kleidung und Schatten sind der wirksamste Schutz vor UV-Strahlung. Die Kopfbedeckung sollte groß genug sein, um Gesicht und Nacken ausreichend zu schützen. T-Shirts oder Hemden sollten sonnendicht, nicht zu eng und möglichst mit langen Ärmeln sein. Hosen sollten möglichst lang und weit geschnitten sein. Schuhe sollten den Fuß vollständig bedecken. Nur geeignete Sonnenbrillen verhindern Entzündungen der Augen.
- Kinder unter einem Jahr sollten nicht der direkten Sonne ausgesetzt werden. Auf dermale Sonnenschutzmittel sollte für die zarte Haut verzichtet werden.
- Bei Kindern zwischen einem und sechs Jahren ist der Aufenthalt in der direkten Sonne zu vermeiden. Es sind kindgerechte dermale Sonnenschutzmittel zu verwenden.
- Kinder zwischen sechs und zwölf Jahren sollten nur wenig der direkten Sonne ausgesetzt werden. Der Aufenthalt in der Mittagssonne ist zu vermeiden. Die nicht bedeckten Körperstellen sind mit einem Lichtschutzfaktor größer 15 einzucremen.

8.2 Empfehlungen für Arbeitnehmer im Freien

Die Empfehlungen zum Schutz vor Sonnenstrahlung für Arbeitnehmer im Freien unterscheiden sich nicht grundsätzlich von den Schutzmaßnahmen, die für die Bevölkerung zu treffen sind. Im Gegensatz zur Allgemeinbevölkerung muss sich eine große Anzahl von Arbeitnehmern berufsbedingt häufig im Freien aufhalten und ist somit der Sonnenstrahlung intensiver ausgesetzt. Der Arbeitgeber hat für diese Tätigkeiten eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Hierbei muss auch die Sonnenstrahlung als Gefährdung beachtet werden.

Durch berufliche UV-Strahlung induzierter Hautkrebs ist bisher keine Berufskrankheit im Sinne der Berufskrankheitenverordnung (BKV). Da jedoch der Zusammenhang zwischen der Entstehung von aktinischen Keratosen und Plattenepithelkarzinomen (siehe Seite 36) im Rahmen von beruflich bedingter solarer UV-Exposition durch epidemiologische Untersuchungen und Metaanalysen hinreichend belegt ist, wird aktuell die Aufnahme dieser Malignome in die Liste der Berufskrankheiten diskutiert. Bei entsprechendem Verdacht kann zurzeit schon durch den behandelnden Arzt nach Berufskrankheitenrecht eine Berufskrankheitenanzeige nach § 9 Abs. 2 des SGB VII („Wie Berufskrankheit“) gestellt werden [44].

8.2.1 Rechtliche Grundlagen

Angesichts alarmierender Hautkrebszahlen war 2004 von den Regierungen der EU-Mitgliedsländer zunächst beabsichtigt, in die seit langem vorbereitete Arbeitsschutz-Richtlinie zur optischen Strahlung auch die Sonnenstrahlung als natürliche optische Strahlung aufzunehmen. Im Rahmen eines Vermittlungsverfahrens wurden die Regelungen für den Schutz von Arbeitnehmern im Freien aus dem Entwurf des Anwendungsbereiches der Richtlinie gestrichen. Begründet wurde dies damit, dass der Schutz der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch natürliche optische Strahlung bereits in der Rahmenrichtlinie 89/391/EWG enthalten sei. Danach besteht bereits 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 [45].

Die Arbeitgeber in Deutschland sind nach dem Arbeitsschutzgesetz (§ 4, § 5, § 11, § 12), nach der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV § 3, Anhang 5.1) und der Unfallverhütungsvorschrift („Grundsätze der Prävention“ BGV A1, § 23, „Maßnahmen gegen Einflüsse des Wettergeschehens“) gesetzlich für den Gesundheitsschutz und die Sicherheit ihrer Beschäftigten am Arbeitsplatz verantwortlich. Da die gesundheitlichen Risiken der natürlichen ultravioletten Strahlung seit langem nachgewiesen und anerkannt sind, kann sich ein verantwortungsbewusster Arbeitgeber dieser Verpflichtung schon jetzt nicht entziehen.

Es gelten die Verpflichtungen:

- zur Gefährdungsbeurteilung (Expositionsermittlung und -bewertung)
- zur Festlegung und Anwendung von Schutzmaßnahmen
- zur Unterweisung
- zu arbeitsmedizinischen Untersuchungen

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

8.2.2 Gefährdungsermittlung und Risikobewertung

Das Ausmaß einer Gefährdung von Beschäftigten durch Sonnenstrahlung an Arbeitsplätzen im Freien ist zu ermitteln und zu beurteilen. Hierbei können die örtlichen klimatischen, wetterbedingten sowie tageszeitlichen Strahlungsverhältnisse und spezifischen Erfahrungen einbezogen werden. Im späten Frühjahr und Sommer ist bei wolkenarmem Himmel von einem hohen UV-Strahlungsanteil auszugehen. Dann besteht eine Gefährdung für die Augen und für die Haut. Bei hohen Temperaturen besteht ferner die Gefahr, dass man nur leicht bekleidet arbeiten möchte, aber mit hohen UV-Bestrahlungen zu rechnen ist. Bei Regen und stark bewölktem Himmel besteht dagegen in der Regel keine Gefährdung durch die UV-Strahlung der Sonne.

Im Hochgebirge kann auch im Winter bei Schnee der UV-Anteil der Sonnenstrahlung zu einer Gefährdung der Augen und der ungeschützten Haut führen. Die Gefährdungsermittlung und -beurteilung kann unterbleiben, wenn die Aufenthaltszeit im Freien nur einen geringen Teil der gesamten Arbeitszeit beträgt.

Als Grundlage für die Gefährdungsermittlung kann der UV-Index (siehe 7.2) verwandt werden. Der UV-Index ist international einheitlich festgelegt. Von einer „mittleren“ Gefährdung durch UV-Strahlung ist bei einem UV-Index von 3 bis 5, und von einer „hohen“ Gefährdung ab 6 (Klassifikation: hoch) oder größer auszugehen. In der Regel sind dann besondere Schutzmaßnahmen zu treffen.

Eine Gefährdungsermittlung kann auch durch Verwendung von geeigneten UV-Messgeräten durchgeführt werden. Diese müssen die UV-Bestrahlung von Personen entsprechend den ICNIRP-Grenzwertempfehlungen bzw. den Grenzwertempfehlungen des Leitfadens „UV-Strahlung“ bestimmen.

8.2.3 Schutzmaßnahmen

Ergibt die Gefährdungsermittlung und -beurteilung eine Gefährdung, so müssen geeignete Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Hierbei haben entsprechend den allgemeinen Auswahlkriterien grundsätzlich technische und organisatorische Schutzmaßnahmen Vorrang vor persönlichen Schutzausrüstungen. Bei der Auswahl der Schutzmaßnahmen wird zunächst das Risiko anhand der Dauer der Arbeit und der Zeit ermittelt. Im Folgenden werden die Schutzmaßnahmen beispielhaft aufgeführt:

Technische Schutzmaßnahmen können z. B. sein:

- Überdachungen,
- UV-Absorbierende Abdeckungen,
- Verwendung von Sonnenschirmen, -segel oder -planen,
- Unterstellmöglichkeiten für Arbeitsplätze im Freien, z. B. an der Kasse für Parkplatzwächter, feste überdachte Montagestellen auf Baustellen, Verkaufsstände im Freien,
- Verwendung von UV-Absorbierenden Fenstern bei Fahrzeugen, wie z. B. bei Bahnen, Bussen, Gabelstaplern, Traktoren, Baggern, Kranen, Flugzeugen,
- Verwendung von Dächern oder Sonnenschirmen für ständige Arbeitsplätze, wie z. B. Stände von Bademeistern, Beladungseinrichtungen und Verkaufseinrichtungen.

Gegen die mit stärkerer Sonneneinstrahlung verbundene Hitze können z. B. bei Bus-, LKW-, Kran- und Baggerfahrern Klimaanlage wirksam eingesetzt werden und zwar,

soweit dies die Gesundheit am Arbeitsplatz förderlich beeinflusst, d. h. wenn kein häufiges Verlassen des Arbeitsplatzes, z. B. zum Ein- und Aussteigen, vorkommt. Können die technischen Schutzmaßnahmen auf Grund der Verhältnisse vor Ort nicht zumutbar angewandt werden, sind organisatorische Schutzmaßnahmen zu treffen.

Organisatorische Schutzmaßnahmen können z. B. sein:

- Unterweisung der Beschäftigten über mögliche Gefahren durch die Sonnenstrahlung und über angepasste Schutzmaßnahmen
- Expositionsdauer gegenüber Sonnenstrahlung nach den Möglichkeiten der Arbeitsorganisation beschränken, z. B. durch einen früheren Arbeitsbeginn
- Körperlich anstrengende Arbeiten in die weniger sonnigen und kühleren Morgenstunden verlegen
- Weniger dringliche Arbeiten in eine sonnenärmere und kühlere Witterungsperiode verschieben
- Bei intensiver Sonnenstrahlung und Hitze auf Überstunden verzichten
- In den Mittagsstunden den Aufenthalt in der Sonne minimieren, nach Möglichkeit Arbeiten in abgeschattete Bereiche verlegen. Die Mittagssonne sollte im Sommer möglichst vermieden werden, da die Sonnenstrahlung im Zeitraum von 11 bis 15 Uhr (mitteleuropäische Sommerzeit MESZ) besonders intensiv ist. Auf diesen Zeitraum entfallen 50 % der solaren Einstrahlung pro Tag
- Mittagspause in den Zeitraum höchster Sonnenintensivität legen

Geeignete persönliche Schutzmaßnahmen sind z. B.:

- Die Verwendung von geeigneter körperbedeckender Kleidung. Die Textilien sollten über einen ausreichenden UV-Schutz (UPF) verfügen.
- Das Tragen von Kopfbedeckungen. Die Kopfbedeckungen sollten über Krempe und ggf. Nackentücher verfügen, die eine ausreichende Abschattung für Augen und die Haut im Kopfbereich gewährleisten.
- Die Benutzung von Sonnenschutzcremes mit einem geeigneten Lichtschutzfaktor (LSF, engl.: SPF). Dabei sollte auf eine sachgerechte Anwendung geachtet werden (gleichmäßiger und ausreichend dicker Auftrag, der ggf. zu wiederholen ist; bei nicht ausreichender Auftragung kann der Schutzfaktor bis auf ein Viertel abfallen).
- Die Gefährdungen für die Augen werden häufig unterschätzt. Bei intensiver Sonnenstrahlung sollte eine geeignete Sonnenschutzbrille getragen werden. Der direkte Blick in die Sonne ist zu vermeiden. Der Schutz der Augen ist insbesondere in größeren Höhenlagen und bei Reflexion der UV-Strahlung durch Sand oder Schnee erforderlich.



Bei Arbeitnehmern kann an Arbeitsplätzen bei Anwendung von bestimmten Stoffen, z. B. durch Teer, Pech, bestimmte pflanzliche Stoffe oder durch die Einnahme von Medikamenten eine höhere Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung auftreten. In einer

Empfehlung der Strahlenschutzkommission werden in einer Liste phototoxische und photoallergische Substanzen aufgeführt [46]

Anforderungen an die Sonnenschutzfilter für den gewerblichen Bereich sind in der Europäischen Norm DIN EN 172 festgelegt [47]. Diese Norm legt Schutzstufen fest und enthält ergänzende Anforderungen zur DIN EN 166 „Persönlicher Augenschutz“ [48] u. a. zum zulässigen Transmissionsgrad für den ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich.

Die Norm DIN EN 172 ist nur auf Sonnenschutzfilter anzuwenden und gilt nicht für Strahlung aus künstlichen Strahlungsquellen. Für die Schutzstufen 5-1,1 bis 5-3,1 bzw. 6-1,1 bis 6-3,1 sind für die Anwendung im Straßenverkehr und für bestimmte berufliche Situationen Anforderungen an die Erkennbarkeit der Signallichter Rot, Gelb, Grün und Blau festgelegt. Filter der Schutzstufe 5-4,1 bzw. 6-4,1 sind so dunkel getönt, dass die visuelle Wahrnehmung stark verringert wird, so dass z. B. Radfahrer und Fußgänger in der Dämmerung oder im Schatten von Bäumen nicht mehr erkannt werden können. Diese Filter müssen mit der Aufschrift „Nicht verkehrstauglich“ oder mit einem anerkannten Symbol gekennzeichnet sein.

Die Vorzahl 5 kennzeichnet Sonnenschutzfilter, die keine Anforderungen für den Infrarotschutz erfüllen. Bei Filtern mit der Vorzahl 6 darf der maximale Wert des Infrarotgrades nicht größer sein, als der für die Schutzstufe angegebene Lichttransmissionsgrad. Es wird der Hinweis gegeben, dass die infraroten Anteile der Sonnenstrahlung keine Gefährdung darstellen.

Es ist zu beachten, dass selbst die sehr dunkel getönten Sonnenschutzbrillen nicht für den direkten Blick in die Sonne geeignet sind. Ein solcher Schutz z. B. zum Betrachten einer Sonnenfinsternis kann nur von Schweißerschutzfiltern der Schutzstufen 12 bis 16, bzw. von Filtern und Augenschutzgeräten für die direkte Beobachtung der Sonne nach DIN EN 1836, erreicht werden.

Anforderungen zur Kennzeichnung sind in der DIN EN 166 festgelegt. Auf der Sonnenschutzbrille sollten die dort geforderten Angaben und zusätzlich das CE - Zeichen angebracht sein. Dadurch kennzeichnet der Hersteller, dass sein Produkt den in Europa gültigen Qualitäts-Mindestanforderungen entspricht. Wichtige Hinweise sind auch in der BG-Regel BGR 192 "Benutzung von Augen- und Gesichtsschutz" [49] enthalten. Angaben zu den Schutzstufen, Anforderungen an die Transmissionsgrade und Verwendungshinweise sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tab. 11: Anwendungsbereiche von Sonnenschutzbrillen; Filter mit der Vorzahl 6 besitzen einen IR-Schutz.

Schutzstufe	Verwendung	Bezeichnung
5 -1,1 6 -1,1	Diese Schutzstufe gilt nur für bestimmte fototrope Sonnenschutzfilter im hellen Zustand und für den Bereich hoher Lichttransmission von Verlauffiltern	
5 -1,4 6 -1,4	als sehr helles Filter nicht zu empfehlen	sehr hell
5 -1,7 6 -1,7	als helles Filter nicht zu empfehlen	hell
5 - 2 6 - 2	als empfohlenes Universalfilter meist gut verwendbar	mittel
5 - 2,5 6 - 2,5	meist gebräuchlich in Mitteleuropa	dunkel
5 - 3,1 6 - 3,1	in den Tropen und Subtropen, für Himmelsbeobachtungen, im Hochgebirge, bei Schneeflächen, hellen Wasserflächen, Sandflächen, Kalk- und Kreidebrüchen, für den Straßenverkehr nicht zu empfehlen	sehr dunkel
5 - 4,1 6 - 4,1	nur bei extremen Bestrahlungsstärken, nicht für den Straßenverkehr geeignet	extrem dunkel

9 Literatur

- [1] Schweiz: Grenzwerte am Arbeitsplatz (Publikation Suva 1903.d)
- [2] UV-Index: www.uv-index.de, www.uv-index.at, www.uv-index.ch,
- [3] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>
- [4] Schönwiese, C.: "Klimatologie" Uni-Taschenbücher (UTB) Verlag Eugen Ulmer Stuttgart (1994, 3. Auflage 2008)
- [5] IEC, Photo voltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photo-voltaic (PV) solar devices with reference spectral data, in 60904-3, 2008
- [6] Van der Leun, J. C. and de Gruijl, F. R.: "Influences of Ozone Depletion on Human and Animal Health". In: UV-B Radiation and Ozone Depletion. M.Tevini (ed.) Lewis Publishers, London (1993)
- [7] Steinmetz, M.: „Ozonloch und UV-Strahlung“. Apotheker Journal 18.Jahrgang Nr. 5 (1996)
- [8] Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes, Gesamtausgabe Nr.37-48 (1998)
- [9] Köhler, U. et al.: "Spektrale und integrale Messungen der UV-B-Strahlung im Vergleich zu Ozonmessungen". Bericht BayForKlim-Projekt B I 10 (1995)
- [10] UV Index for the public Cost-713 Action, European communities2000
- [11] Ham, W. T. Jr.: "The photopathology and nature of the blue-light and near-UV retinal lesion produced by lasers and other optical sources". In: Wolbarsht ed. Laser applications in medicine and biology. New York: Plenum Press 1989, 191-246
- [12] Lund, D. J. et al: "Spectral dependence of retinal thermal injury". J. Laser App.20, 76-82 2008
- [13] Madronich, S.: "UV Radiation in the Natural and Perturbed Atmosphere". In: UV-B Radiation and Ozone Depletion. M.Tevini (ed.) Lewis Publishers, London (1993)
- [14] Krins, A. et al.: "Messung und Bewertung natürlicher und künstlicher Strahlung". Hautarzt 50:701-705. Springer Verlag 1999
- [15] Quintern, L. E. et al. "Characterization and application of UV detector spore films: the sensitivity curve of a new detector system provides good similarity to the action spectrum for UV-induced erythema in human skin". J. Photochem. Photobiol B: Biol. 37, 158-166
- [16] Steinmetz, M., Wallasch, M., „Bundesweites solares UV-Monitoring: Messen, bewerten und unterrichten“ in „Klimawandel und Hautkrebs“ M.Kappas Hrsg. Ibidem –Verlag Stuttgart 2008 S. 62-96
- [17] Kitz, E. Sonne ohne Schattenseiten. AUVA
- [18] DIN EN 14255-3: „Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung – von der Sonne emittierte Strahlung“
- [19] Steinmetz, M.: "Jahresbericht über die solare terrestrische UV-Strahlung in Deutschland – Messergebnisse aus dem UV-Messnetz des BfS/UBA (1995-2010) unter www.bfs.de
- [20] Bulnois, J. L. "Photophysical Processes in Recent Medical Laser Development: a Review" Lasers in Medical Science Vol1 (1986)

- [21] Noonan, F. P. et al. "UV-induced immunosuppression". In "Environmental UV-Radiation, Risk of Skin Cancer and Primary Prevention". SSK-Band 34. Gustav Fischer Verlag (1996)
- [22] Graw, J. "Genetik" Springer Verlag 5. Auflage 2010
- [23] WHO: Environmental Health Criteria 160 "Ultraviolet Radiation", World Health Organization, Genf (1994)
- [24] Thapan, K. et al.: An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology* 535.1: 261–267. (2001)
- [25] Gall, D. : „Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung“. *Licht* 54 11/12, S. 1292–1297 (2002)
- [26] Van de Kraatz, J.; van Norren, D. „Optical density of aging human ocular media in the visible and UV“ *J.Opt.Soc. Am. A*, V24 N7 1842-1857 (2007)
- [27] Augustin. A. J.: „Einfluss der Lichtexposition auf Linse und Makula“. *Ophthalmochirurgie* 15 19-25 (2003)
- [28] Hockwin, O., Sasaki, K., Leske, M. C.: "Risk factors for Cataract Development". *Dev. Ophthalmol.* Vol.17, Karger, Basel (1989)
- [29] McCarty, C. A., Taylor, H. R.: A review of the epidemiological evidence linking ultraviolet radiation and cataracts. In: Hockwin O. et al. (Eds.). *Progress in Lens and Cataract Research.* Dev Ophthalmol. Basel. Karger 21-31(2002)
- [30] Kottler U. B. et al. „Ist die Katarakt vermeidbar?“ *Der Ophthalmologe* 3 190-196 (2003)
- [31] Miescher, G.: „Das Problem des Lichtschutzes und der Lichtgewöhnung“. *Strahlentherapie* 35 403-443 (1930)
- [32] Knuschke, P. et al. „Untersuchung des Eigenschutzes der Haut gegen solare UV-Strahlung bei Arbeitnehmern im Freien“. *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung, F 1986; Dortmund/Berlin/Dresden 2010; ISBN 978-3-88261-121-2.*
- [33] Unverricht, I, Knuschke, P.: Verhalten von im Freien Beschäftigten gegenüber solarer UV-Strahlung in Beruf und Alltag. *Dermatol Beruf Umwelt* 55 (2007) 159-166]
- [34] Gilchrest, B. A. et al."The human sunburn reaction: histologic and biochemical studies". *J. Am. Acad. dermatol.* 5: 411-422 (1981)
- [35] Food and Drug Administration (FDA):"Medications that increase sensitivity to light"(prepared by Levine J.I.). Rockville, Maryland (1992)
- [36] Kligman, L. H. and Kligman, A. M.:"The nature of photoaging: its prevention and repair". *Photodermatology*, 3: 215-227 (1986)
- [37] Int. Agency for research on cancer:"Solar and Ultraviolet Radiation". *Monographs on the Evaluation of carcinogenic Risks to Humans*, Vol.55, Lyon (1992)
- [38] Armstrong, B. K.:"Sunlight and malignant melanoma: intermittent or total accumulated exposure to the sun". *J. dermat. surg. oncol.* 14: 835-849 (1988)
- [39] Kripke, M. L.:"Photoimmunology". *Photochem. Photobiol.* 52: 919-924 (1990)
- [40] CIE im Dokument CIE S 013/E:2006

- [41] WHO: "Global Solar UV Index – A Practical Guide" (ISBN 92 4 159007 6, NLM classification: QT 162.U4, Marketing and Dissemination, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Genf 27, Schweiz
- [42] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: "Global solar UV-Index" ICNIRP-1/95 ISBN 3-9804789-0-4 (1995)
- [43] DIN EN 1836: Persönlicher Augenschutz - Sonnenbrillen und Sonnenschutzfilter für den allgemeinen Gebrauch und Filter für die direkte Beobachtung der Sonne; Deutsche Fassung EN 1836:2005+A1:2007, Ausgabedatum: 2007-11
- [44] Fartasch, M., Diepgen. T. L., Schmitt, J., Drexler, H.: The relationship between occupational sun exposure and non-melanoma skin cancer—clinical basics, epidemiology, occupational disease evaluation, and prevention. Dtsch Arztebl Int 2012; 109(43): 715–20
- [45] 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
- [46] Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung - Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission 1995 – 1997 Informationen der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Nummer 4 (1998)
- [47] DIN EN 172: Persönlicher Augenschutz - Sonnenschutzfilter für den betrieblichen Gebrauch (enthält Änderungen A1:2000 und A2:2001); Deutsche Fassung EN 172:1994 + A1:2000 + A2:2001, Ausgabedatum: 2002-02
- [48] DIN EN 166: Persönlicher Augenschutz - Anforderungen; Deutsche Fassung EN 166:2001, Ausgabedatum: 2002-04
- [49] BGR 192: „Benutzung von Augen- und Gesichtsschutz“, Juli 2001