

Über die ultraviolette Sonnenstrahlung

Physikalische Grundlagen, Strahlungstransfer durch die Erdatmosphäre sowie biologische Wirkungen auf den Menschen

In zunehmendem Maße werden in der Öffentlichkeit Begriffe wie Ozonloch, UV-Strahlung oder Hautkrebszunahme diskutiert. Der folgende Artikel soll in kompakter Form einen Überblick über die Problematik der UV-Strahlung geben und dem Leser dieses interessante Teilgebiet der Klimatologie, welches die Fachbereiche Physik, Biologie und Chemie umfasst, näher bringen.

1 Einleitung

Im Jahre 1995 wurde der Nobelpreis für Chemie an P. Crutzen, M. Molina und F.S. Rowland unter anderem für die Erforschung der Zusammenhänge, die zum Abbau der stratosphärischen Ozonkonzentration führen, vergeben. Urheber für diesen in den letzten Jahrzehnten beobachteten Trend sind vor allem anthropogene, in die Atmosphäre abgegebene Substanzen, die das natürliche Gleichgewicht zwischen Bildung und Dissoziation des Ozons stören. Insbesondere die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) bewirken dabei auf hochwirksame Weise eine Verminderung der Ozonkonzentration. Da die ultraviolette (UV-) Strahlung der Sonne jedoch zu einem überwiegenden Teil in der Ozonschicht in ca. 15 bis 50 km Höhe absorbiert wird, führt eine Ausdünnung dazu, dass in zunehmendem Maße kurzwellige, energiereiche UV-Strahlung bis zur Erdoberfläche gelangt. Im Rahmen einer energetischen Bilanzierung ist diese Zunahme verschwindend gering. Wird jedoch deren photobiologische Wirksamkeit mit in Betracht gezogen, so zeigt sich, dass selbst eine geringfügige Zunahme der UV-Strahlung mit einem deutlichen Anstieg der biologisch-effektiven Bestrahlungsstärke einhergeht. Dabei ist insbesondere der kurzwellige Anteil der UV-Strahlung für die Entwicklung von Hautschäden bis hin zum Hautkrebs verantwortlich.

Die starke Zunahme der Hautkrebserkrankungen in Deutschland liegt dabei allerdings weniger an einer Ausdünnung der Ozonschicht als vielmehr an einem geänderten Freizeitverhalten, im Zuge dessen sich große Teile der Bevölkerung länger und zudem häufig ungeschützt der Sonne aussetzen [1]. Bräune steht nach wie vor als Synonym für Vitalität, Jugend und Gesundheit, zu deren Erlangung Sonnenbrände billigend in Kauf genommen werden. Dabei wird der Haut selbst in den Wintermonaten oftmals keine Möglichkeit zur Regeneration gegeben. Im Zuge

wachsender Mobilität werden dann häufig Fernreisen in äquatornahe Gebiete mit extrem hoher UV-Strahlung unternommen, um die Bräune des Sommers wieder aufzufrischen.

Vor diesem Hintergrund sollen deswegen in diesem Beitrag die verschiedenen Aspekte der UV-Strahlung von den physikalischen Grundlagen über den Strahlungstransfer durch die Erdatmosphäre bis hin zu den biologischen Wirkungen auf den Menschen und Empfehlungen zum individuellen Verhalten in der Sonne diskutiert werden. Die Zusammenhänge werden durch spektrometrische Messungen der ultravioletten Sonnenstrahlung aus dem Institut für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel in Westerland auf Sylt illustriert.

2 Strahlungsgrößen

Bei der energetischen Beschreibung eines Strahlungsfeldes wie beispielsweise dem der Sonne sind die im Folgenden definierten physikalischen Größen zu unterscheiden [2, 3]:

- Transportierte Energie eines Strahlungsfeldes W in J
- Von einer Quelle emittierte oder einem Empfänger absorbierte Strahlungsleistung (Strahlungsfluss)
$$\phi = dW / dt \text{ in } W$$
- Von einem Empfänger pro Fläche absorbierte Leistung (Bestrahlungsstärke)
$$E = d\phi / dA \text{ in } W/m^2$$
- Integral der Bestrahlungsstärke über die Zeit der Bestrahlung (Dosis)
$$H = E(t) \cdot dt \text{ in } J/m^2$$
- Spektrale (Dichte der) Bestrahlungsstärke pro Wellenlängenintervall
$$E_{\bar{\epsilon}} = dE / d\bar{\epsilon} \text{ in } W/(m^2 \cdot nm)$$
- Mit der relativen spektralen Empfindlichkeit $S(\bar{\epsilon})$ eines biologischen Vorgangs bewertete photobiologisch-wirksame Bestrahlungsstärke
$$E_{biol} = E_{\bar{\epsilon}} \cdot S(\bar{\epsilon}) \cdot d\bar{\epsilon} \text{ in } W/m^2$$
- Integral der biologisch-wirksamen Bestrahlungsstärke über die Zeit der Bestrahlung: Photobiologisch-wirksame Bestrahlung (Dosis)
$$H_{biol} = E(t)_{biol} \cdot dt \text{ in } J/m^2$$

3 Messtechnik

Zur Messung der ultravioletten Bestrahlungsstärke der Sonne werden im Allgemeinen so genannte Spektralradiometer eingesetzt. Hierbei handelt es sich um Monochromatoren, die mit Hilfe holographischer Gitter aus dem Spektrum der einfallenden Strahlung einen kleinen spektralen Anteil auf einen Austrittsspalt abbilden. Dort wird das optische Signal unter Verwendung eines nachgeschalteten Photomultipliers in einen elektrischen Strom umgewandelt, der dann verstärkt, digitalisiert und von einem Computer eingelesen und ausgewertet wird. Die Abstimmung auf bestimmte Wellenlängen erfolgt durch Verdrehen der Gitter mit Hilfe einer Schrittmotorsteuerung. Die technischen Spezifikationen der verwendeten Spektralradiometer sind: Nachweisgrenze: $\leq 1 \mu\text{W}/\text{m}^2$, Wellenlängengenauigkeit: $\pm 0.15 \text{ nm}$, Wellenlängenbereich: 290 nm bis 450 nm. Zur Erfassung der gesamten Bestrahlungsstärke werden Breitbandmessgeräte, so genannte Pyranometer eingesetzt. Diese liefern als Messwert den integralen Wert über alle Wellenlängen von 305 nm bis 2800 nm.

4 Sonnenhöhenwinkel und Zeit des Sonnenhöchststands

Für einen durch seine geographische Länge λ und Breite φ definierten Beobachtungsort auf der Erdoberfläche ergibt sich aufgrund der Rotation der Erde um ihre eigene Achse und um die Sonne eine von der Tages- und Jahreszeit abhängige Position der Sonne am Himmel. Diese wird durch den Sonnenhöhenwinkel h als Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und Horizont sowie durch den Azimutwinkel α als Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und geographischer Nordrichtung festgelegt. Die Extremwerte der Mittagshöhe, also des maximalen Sonnenhöhenwinkels eines Tages, lassen sich aus den Koordinaten (z.B. für Westerland: $\varphi = 54.93^\circ$ Nord, $\lambda = 8.3^\circ$ Ost) und der Schiefe der Ekliptik von $23^\circ 27'$ berechnen: Der Maximalwert am 21. Juni beträgt in Westerland $h_{\max} = 90^\circ - \varphi + 23.45^\circ = 58.52^\circ$, die niedrigste Mittagshöhe am 22. Dezember $h_{\min} = 90^\circ - \varphi - 23.45^\circ = 11.62^\circ$. Die Zeit des Sonnenhöchststand ist dabei nicht um 12:00 Uhr Mitteleuropäischer Zeit (MEZ), sondern $\Delta\lambda \cdot 4$ min später, wobei $\Delta\lambda$ die Längendifferenz zum 15. Längengrad (Bezugsmeridian für die Mitteleuropäische Zeitzone) darstellt. Der Sonnenhöchststand ist in Westerland somit im Mittel erst um 12:27 MEZ entsprechend 13:27 Mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ).¹ Entsprechend der Zeitgleichung schwanken diese Zeiten im Jahresverlauf aufgrund der Exzentrizität der Erdbahn um etwa ± 15 Minuten.

¹ In La Coruña an der spanischen Atlantikküste ($\lambda \approx 8^\circ$ West), welches auch der Mitteleuropäischen Zeitzone angehört, ist Sonnenhöchststand sogar erst um 13:32 MEZ, entsprechend 14:32 MESZ.

5 Extraterrestrische Strahlung der Sonne

Für das Leben auf der Erde stellt die Sonne praktisch die einzige natürliche Energiequelle dar. Das gesamte Spektrum der von der Sonne emittierten elektromagnetischen Strahlung reicht von der kurzwelligen Röntgenstrahlung mit Wellenlängen unterhalb von 10 nm über den UV-Bereich, das sichtbare Licht und die Infrarotstrahlung bis hin zur langwelligen Mikro- und Radiowellenstrahlung mit Wellenlängen bis zu einigen hundert Metern. Das Emissionsspektrum der Sonne entspricht dabei näherungsweise dem eines Schwarzen Strahlers, für dessen spektrale Emission das Planck'sche Strahlungsgesetz gilt:

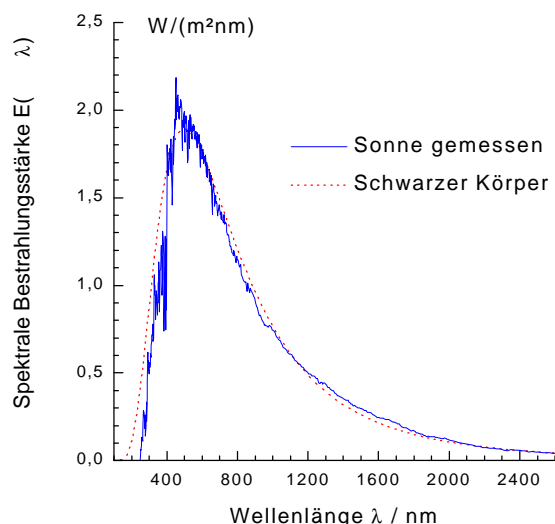
$$E(\lambda, T) d\lambda = 8\pi hc^2 \lambda^{-5} \exp(-hc / kT\lambda - 1) d\lambda$$

mit: Planck'sches Wirkungsquantum h , Lichtgeschwindigkeit c , Boltzmann-Konstante k und Temperatur T . Abbildung 1 zeigt die spektrale Verteilung der Strahlung eines Schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 5800 Kelvin sowie ein außerhalb der Erdatmosphäre von Satelliten gemessenes Sonnenspektrum (nach [4]).

Die Oberflächentemperatur der Sonne lässt sich dabei durch Bestimmung des Maximums der spektralen Energieverteilung mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{const mit const} = 2,898 \cdot 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K} \quad (8)$$

zu annähernd 5800 K ermitteln. Die gesamte von der Sonne abgestrahlte Leistung beträgt etwa $P_{\text{sol}} \approx 3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Das Jahresmittel der spektralen Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung auf eine am Außenrand der Erdatmosphäre senkrecht zur Sonne ausgerichteten Fläche wird als extraterrestrische spektrale Bestrahlungsstärke bezeichnet. Eine Integration über alle Wellenlängen ergibt die Solarkonstante, deren Wert mit $E_{\text{ex}} = P_{\text{sol}} / 4 \pi R^2 = 1367 \text{ W}/\text{m}^2$ angegeben wird. Hierbei ist $R = 149.1$ Millionen km der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne.



Tab 1. Außerhalb der Erdatmosphäre gemessene Strahlung der Sonne sowie Strahlung eines schwarzen Körpers mit $T = 5800 \text{ K}$. Das Maximum der Abstrahlung liegt bei etwa 500 nm, welches vom Menschen als blau-grünes Licht wahrgenommen wird. Dies entspricht in etwa dem Wellenlängenbereich, in dem das menschliche Auge im Zuge der Evolution seine maximale Empfindlichkeit entwickelt hat.

Bezeichnung	Bereich [nm]	Extraterrestrisch		In Westerland gemessen	
		Bestrahlungsstärke [W/m ²]	Anteil [%]	Bestrahlungs- stärke [W/m ²]	Anteil [%]
UVC	100 – 280	7.9 (6.5)	0.6	0.0	0.0
UVB	280 - 315	17.7 (14.5)	1.3	1.2	0.1
UVA	315 - 380	62.8 (51.4)	4.6	41.7	4.4
VIS (sichtbar)	380 - 780	656.3 (537.7)	48.0	897.9	95.5
IR (Infrarot), Mikro-, Radio- wellen	> 780	622.5 (509.9)	45.5		
Gesamtstrahlung		1367.2 (1120.0)	100.0	940.8	100.0

Tab 1. Verteilung der extraterrestrischen und der terrestrischen Bestrahlungsstärke auf die Wellenlängenbereiche. Es zeigt sich, dass keine UV-C-Strahlung bis zum Erdboden gelangt und auch UV-B-Strahlung zu über 90% in der Atmosphäre absorbiert wird. Die Abschwächung der UV-A-Strahlung sowie des sichtbaren Lichts in der Atmosphäre sind hingegen bei unbewölktem Himmel gering.

6 Strahlungstransfer durch die Erdatmosphäre

Tabelle 1 stellt die Verteilung der extraterrestrischen solaren Strahlung (nach [4]) der am Erdboden am 4.7.2000 um 13:36 MESZ bei einem Sonnenhöhenwinkel von 58° in Westerland gemessenen Strahlung gegenüber. Die Werte in Klammern geben für den Messtag die auf den tatsächlichen Abstand Erde-Sonne und den herrschenden Einfallswinkel korrigierten Werte der extraterrestrisch Bestrahlungsstärke an. Die gemessene Gesamtstrahlung von 940.8 W/m² liegt im Bereich der in Sylt aufgrund der geographischen Breite bei unbewölktem Himmel maximal möglichen Strahlung.

7 Absorption in der Ozonschicht

Die in die Erdatmosphäre eintretende solare Strahlung unterliegt dort vielfältigen Absorptions- und Streuprozessen, so dass in Abhängigkeit von der Wellenlänge nur ein bestimmter Anteil der Strahlung bis zur Erdoberfläche gelangt. Einer der wichtigsten Prozesse, der das Leben auf der Erde in der heutigen Form überhaupt erst ermöglicht, ist die Absorption der energiereichen solaren UV-Strahlung in der Ozonschicht. Hier kommt es im Rahmen von photochemischen Gleichgewichtsreaktionen zur Bildung und Dissoziation von Ozon, wobei als Summe hieraus kein Nettoverlust an Ozon resultiert, obwohl die durchdringende UV-Strahlung maßgeblich reduziert wird. Die absorbierte Energie wird in Form von Wärme als kinetische Energie an die umgebende Luft abgeführt.

Eine entscheidende Schlüsselrolle bei dem beobachteten Trend der Ozonabnahme spielen die Fluorchlorkohlenwasserstoff-Verbindungen, die aufgrund ihrer außerordentlichen Stabilität erst nach Aufstieg in die Ozonschicht durch die dort vorhandene UVC-Strahlung in ihre Bestandteile aufgespalten werden. Insbesondere die daraus freigesetzten Chlor-Radikale, die sich mit freien Sauerstoffatomen zu Chlormonoxid verbinden, zerstören in katalytischen Prozessen bereits in geringen Konzentrationen eine große Anzahl

von Ozonmolekülen. Hierdurch werden die Gleichgewichtsreaktionen zwischen Bildung und Dissoziation von Ozon verschoben. Die Konzentration des Ozons und somit dessen Funktion als UV-Filter nimmt ab und es gelangt zunehmend mehr UV-Strahlung bis zur Erdoberfläche. Diese Darstellung berücksichtigt dabei noch nicht die saisonalen Schwankungen des globalen Ozonhaushalts, Transportmechanismen von Ozon in der Stratosphäre oder das Ungleichgewicht zwischen Nord- und Südhalbkugel. Für eine detaillierte Darstellung der sehr komplexen Vorgänge in der Atmosphäre sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (z.B. [5]).

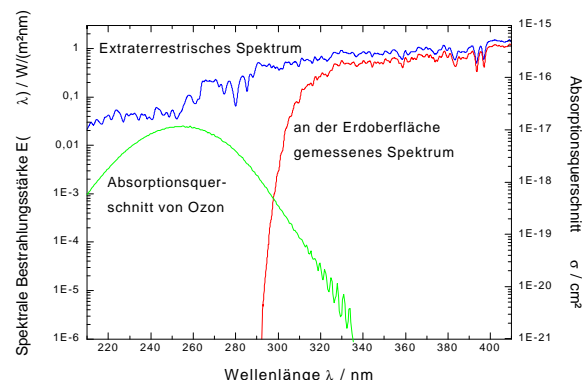


Abb 2. Extraterrestrisches und terrestrisches solares UV-Spektrum sowie Absorptionsquerschnitt von Ozon (nach [6]). Bei den Einschnitten in den Sonnenspektren handelt es sich um so genannte Fraunhofer'sche Linien, die als Absorptionslinien in der Atmosphäre der Sonne entstehen. Auffällig ist auch die UV-B-Kante im terrestrischen Spektrum aufgrund der Absorption in der Ozonschicht.

Wie effektiv die Ozonschicht als UV-Filter wirkt, zeigt Abbildung 2: Dargestellt sind das extraterrestrische und ein in Westerland kurz nach der Sommersonnenwende gemessenes UV-Spektrum sowie der Absorptionsquerschnitt von Ozon. Deutlich erkennbar ist, dass für Wellenlängen zwischen 330 nm und 410 nm das terrestrische und das extraterrestrische Spektrum einen parallelen Verlauf aufwei-

sen, wobei die terrestrische spektrale Bestrahlungsstärke aufgrund von Absorption und Streuung in der Atmosphäre geringer als die extraterrestrische ist. Für Wellenlängen unterhalb von 330 nm beginnt die Absorption durch das Ozon derart wirksam zu werden, dass die eintreffende Strahlung mit kleiner werdenden Wellenlängen immer stärker absorbiert wird. Unterhalb von etwa 290 nm wird schließlich sämtliche Strahlung in der Ozonschicht absorbiert, so dass überhaupt keine solare UV-Strahlung mehr bis zum Erdboden gelangt. Der steile Abfall der spektralen Bestrahlungsstärke, dessen Abnahme von 310 nm bis 290 nm etwa fünf Größenordnungen beträgt, wird auch als Ozon- oder UVB-Kante bezeichnet. Er verdankt seine Entstehung dabei ausschließlich der Absorption der eintreffenden Strahlung in der Ozonschicht.

8 Rayleigh-Streuung und Mie-Streuung

Die wichtigsten Streuprozesse beim Transfer solarer Strahlung durch die Erdatmosphäre sind die elastische Streuung an Luftmolekülen, Tröpfchen und Partikeln. Hierbei wird die Energie der Strahlung nicht wie bei der Absorption in andere Energieformen umgewandelt sondern nur in eine andere Richtung gelenkt. Grundsätzlich werden zwei Arten der Streuung unterschieden:

An den Atomen oder Molekülen der Luft, deren Durchmesser mindestens eine Größenordnung kleiner als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist, kommt es zur Rayleigh-Streuung. Diese lässt sich anhand des Modells eines schwingenden Dipols erklären: Im Feld eingestrahelter elektromagnetischer Wellen werden die positiven und negativen Ladungen der Luftmoleküle angeregt, gegeneinander Schwingungen auszuführen. Jedes Molekül entspricht dabei aufgrund des oszillierenden induzierten Dipolmoments einem Hertz'schen Dipol, der seinerseits wieder elektromagnetische Wellen abstrahlt. Dabei ist die Intensität I des Streulichts im Wesentlichen umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge λ :

$$I(\lambda) \sim \lambda^{-4}$$

Als Folge dessen wird Strahlung am kurzwelligen Ende des sichtbaren Bereichs bei einer Wellenlänge von 380 nm (violett) etwa 18 mal stärker gestreut als am langwelligen Ende bei 780 nm (dunkelrot). Hieraus resultiert einerseits der blaue Farbton des gestreuten Himmelslichts und andererseits als komplementäre Erscheinung die rote Farbe der tief am Horizont stehenden Sonne.

An atmosphärischen Schwebeteilchen wie beispielsweise Nebel- oder Wolkentröpfchen sowie Staubpartikel (Aerosole), deren Durchmesser im Bereich der Wellenlänge der einfallenden Strahlung liegt, kommt es zur Mie-Streuung, deren Intensität im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung nicht oder nur kaum von der Wellenlänge abhängt. Daher ist Mie-

gestreutes (weißes) Sonnenlicht ebenfalls (grau-) weiß, oder nur kaum von der Wellenlänge abhängig. Daher ist Mie-gestreutes (weißes) Sonnenlicht ebenfalls (grau-) weiß, wie beispielsweise in Wolken oder im Nebel. Auch die Aufhellung des Himmelsblau in Horizontnähe erfolgt durch Mie-Streuung durch das in der Atmosphäre enthaltene Aerosol.

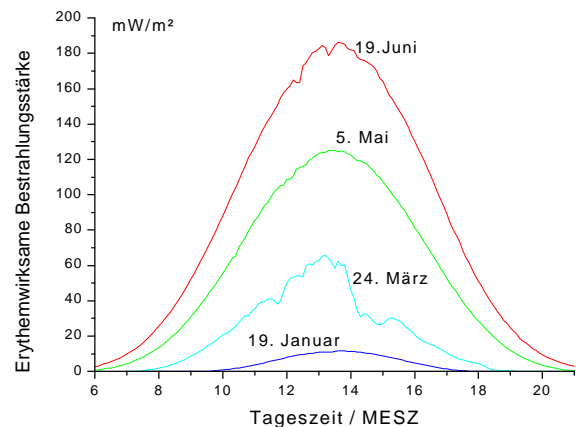


Abb 3. Tagesverlauf der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke in Westerland für ausgewählte Tage des Jahres 2000. Am 19.1 und 5.5. war der Himmel weitestgehend wolkenfrei. Ein durchziehendes Wolkenband bewirkte am 24.3. die Abnahme der Bestrahlungsstärke in den Nachmittagsstunden. Am 19.6 verursachten kleinere Schönwetterwolken eine Abnahme während der Mittagszeit.

9 Tagesverlauf der solaren UV-Strahlung

Mit abnehmendem Sonnenhöhenwinkel nimmt die optische Weglänge der solaren Strahlung durch die Atmosphäre und somit die Ozon-Absorption in der Stratosphäre stark zu. Die Intensität der am Erdboden messbaren UV-Strahlung ist somit aufgrund der unterschiedlichen optischen Weglängen von der Tages- und Jahreszeit abhängig (vergl. [7, 8]). Den Tagesgang der Bestrahlungsstärke, die eine Erythem (Sonnenbrand) verursacht, ist in Abbildung 3 dargestellt, wobei sich die erythemale Bestrahlungsstärke entsprechend Gleichung (5) aus der Faltung der Wirkungsfunktion des Erythems mit den gemessenen Tagesspektren ergibt. Es zeigt sich, dass bereits Anfang Mai bei wolkenfreiem Himmel die erythemwirksame UV-Strahlung in Westerland im Tagesmaximum bei 130 mW/m² liegt. Für den gemäß Tabelle 2 definierten Hauttyp II entspricht dies einer Dauer bis zum Erreichen der Sonnenbrandschwelle von etwas mehr als einer halben Stunde. Im Jahresmaximum werden in Westerland Werte von etwa 180 mW/m², entsprechend einer Sonnenbrandzeit von weniger als 25 Minuten erreicht. Im Süden Deutschlands sind diese Zeiten

Haut- typ:	Bezeichnung:	Beschreibung:	Reaktionen auf Sonnenexposi- tion	Dauer bis MED
I	Keltischer Typ (2 %)	auffallend helle Haut, rötliche bis hellblonde Haare, blaue Augen	Immer Sonnenbrand, kaum Bräunung auch nach wie- derholter Bestrahlung	Weniger als 10 Minuten
II	Hellhäutiger Europäer (12 %)	helle Haut, blonde bis dunkelblonde Haare, blaue, grüne Augen	Fast immer Sonnenbrand, mäßi- ge Bräunung nach wiederholter Bestrahlung	10 bis 20 Minuten
III	Dunkelhäutiger Euro- päer (78 %)	helle bis hellbraune Haut, dunkel- blonde bis braune Haare, graue, braune Augen	Gelegentlich Sonnenbrand, fort- schreitende Bräunung	20 bis 30 Minuten
IV	Mediterraner Typ (8%)	Hellbraune bis braune Haut, dunkel- braune bis schwarze Haare, dunkle Augen	Sehr selten Sonnenbrand, schnell einsetzende, tiefe Bräu- nung	über 40 Mi- nuten

Tab 2. Bezeichnung und Beschreibung der verschiedenen Hauttypen in Europa sowie Dauer der Sonnenbrandschwelle.

aufgrund des größeren Sonnenhöhenwinkels noch kürzer. Von Spätherbst bis zum Frühjahr sind die Werte der UV-Strahlung in Deutschland so gering, dass die Zeiten bis zum Erreichen eines Sonnenbrands selbst bei mehrstündigen Sonnenaufenthalten nicht erreicht werden. Anders stellt sich die Situation jedoch im Winter in den Alpen dar. Dort können aufgrund der Höhenlage und der starken Reflexion des Schnees UV-Bestrahlungsstärken auftreten, die bereits in dieser Jahreszeit zum Sonnenbrand führen können.

10 Wirkung der UV-Strahlung auf den Menschen

Die auf die Körperoberfläche auftreffende ultraviolette Strahlung dringt in Abhängigkeit von der Wellenlänge in unterschiedlich tiefe Schichten der Haut ein. Die bei photobiologischen Vorgängen am stärksten betroffene Oberhaut (Epidermis) ist dabei unterteilt in die Basalzell-, Stachelzell- und Hornschicht. Die Basalzellschicht besteht aus einer einzigen Lage säulenförmiger Zellen, die sich ständig teilen. In einem etwa dreiwöchigen Zyklus werden diese Zellen an die Hautoberfläche transportiert, wobei sie sich zu Stachelzellen entwickeln, absterben und schließlich als oberste Hornschicht im Zuge der Hauterneuerung abgerieben werden. Ebenfalls in der Basalzellschicht befinden sich die Pigmentzellen (Melanozyten), die durch UV-Bestrahlung angeregt werden, Melanin zu produzieren. Dieses gelangt über kleine Arme (Dendriten) direkt in die Stachelzellen. Die dadurch eingefärbten Stachelzellen bewirken die sichtbare Bräunung der Haut (Sofortpigmentierung). Ebenfalls durch UV-Strahlung angeregt, beginnen die Pigmentzellen sich zu teilen. Durch die steigende Anzahl sowie einer Vergrößerung der Melanozyten wird mit einer Zeitverzögerung von einigen Tagen eine intensivere und länger anhaltende Bräunung der Haut erzielt. Dieser Prozess der Spätpigmentierung ist ein natürlicher Schutzmechanismus, um darunter liegende Hautschichten vor der UV-Strahlung zu schützen. Einen noch effektiveren Schutz bewirkt die ebenfalls UV-induzierte Ausbildung der so genannten Lichtschwiele, einer nicht-sichtbare Verdickung der obersten Hornschicht.

Im Zuge von UV-Bestrahlung kommt es zu photophysikalischen und photochemischen Prozessen in der Haut, bei denen die UV-Strahlung von der DNA, dem wichtigsten hauteigenen Chromophor, absorbiert werden kann. Hieraus können gravierende Schädigungen der Erbinformation der Zelle resultieren, wie beispielsweise Veränderungen in der molekularen Geometrie der DNA oder die Entstehung von DNA-Strangbrüchen. Die Zelle verfügt zwar über eigene molekulare Reparaturmechanismen, bei einer großen Zahl von Veränderungen arbeiten diese jedoch nicht immer vollständig fehlerfrei. DNA-Schäden, die sich akkumulieren, können so im Laufe eines Lebens zur Ausbildung von Hautkrebserkrankungen führen [1].

Bereits bei Überschreiten einer bestimmten UV-Bestrahlungsdosis, der Minimalen Erythemalen Dosis (MED), treten akute Hautschäden auf, die nach einigen Stunden mit einer Rötung der Haut, dem Sonnenbrand einhergehen. Sind die Schädigungen in der DNA nach übermäßiger UV-Bestrahlung für Reparaturvorgänge zu weit fortgeschritten, so kommt es zum programmierten Zelltod (Apoptose), bei der großflächig Hautzellen abgestoßen werden. Auch kann es aufgrund der immunsuppressiven Wirkung der UV-Strahlung zu einem erhöhten Auftreten von Infektionskrankheiten, wie beispielsweise dem Ausbrechen von Herpes-Viren im Lippenbereich kommen.

Die Empfindlichkeit der Haut gegenüber UV-Bestrahlung und somit das Einsetzen eines Sonnenbrandes hängt dabei entscheidend vom individuellen Hauttyp ab. Entsprechend der Reaktion auf natürliche UV-Bestrahlung und der Möglichkeit der Pigmentierung werden für die weiße Bevölkerung die in Tabelle 2 genannten Hauttypen unterschieden. Die für jeden Hauttyp angegebene Dauer bis zum Erreichen einer MED bezieht sich dabei auf eine Sonnenexposition in den Sommermonaten in mittleren europäischen Breitengraden bei sonnenungewohnter Haut. In Regionen nahe des Äquators sind diese Zeiten deutlich geringer.

Die unterschiedliche Wirksamkeit einzelner Wellenlängen, einen biologischen Vorgang wie die Sofort- und Spätpigmentierung sowie die Ausbildung eines Erythems zu erzeugen, wird durch Wirkungsfunktionen beschrieben, wie sie in

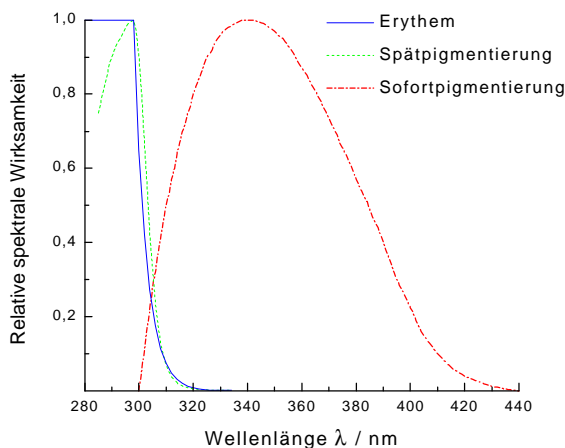


Abb 4. Wirkungsspektren für verschiedene biologische Prozesse (nach [3]). Deutlich erkennbar ist der Unterschied im Wellenlängenbereich bei der Spätpigmentierung und der Erythembildung im Gegensatz zur Sofortpigmentierung.

Abbildung 4 dargestellt sind. Es zeigt sich anhand der Wirkungsfunktionen für das Erythem und der Spätpigmentierung, dass weitestgehend nur Wellenlängen unterhalb von etwa 320 nm, also UVB-Strahlung für diese Effekte verantwortlich ist. Der wirksamste Schutz vor UV-Strahlung wird somit durch denjenigen Wellenlängenbereich erzielt, der auch für die Ausbildung eines Sonnenbrandes verantwortlich ist. Die innerhalb weniger Stunden nach UV-Bestrahlung einsetzende Sofortpigmentierung sowie eine vorzeitige Hautalterung wird hingegen überwiegend durch UVA-Strahlung verursacht. Hieran zeigt sich, dass Solarien, die UVB-Strahlung durch entsprechende Filter unterdrücken, kaum einen effektiven Lichtschutz in der Haut aufbauen, sondern überwiegend eine kurzfristige Sofortpigmentierung und vorzeitige Hautalterung bewirken.

11 Empfehlungen zum Verhalten in der Sonne

Die wirksamsten natürlichen Schutzmechanismen vor übermäßiger UV-Strahlung, die Verdickung der Lichtschwiele und die Spätpigmentierung, werden wie die Ausbildung des Sonnenbrandes durch UV-B-Strahlung ausgelöst. Hieraus resultiert die allgemeine Empfehlung einer langsamen, dosierten Gewöhnung der Haut an UV-Strahlung, um einen körpereigenen Schutz aufzubauen ohne jedoch die Erythemschwelle zu überschreiten. Dabei zeigt Abbildung 3, dass im Tagesverlauf die erythemwirksame Bestrahlungsstärke zur Zeit des Sonnenhöchststands am größten ist. Anhand des Kurvenverlaufs ist sofort die allgemeine Empfehlung einsichtig, in den Sommermonaten im Zeitraum zwischen etwa 11:30 und 15:30 MESZ die direkte Sonne zu meiden und den Schatten aufzusuchen. Strandaufenthalte oder Sonnenbäder sollten in die Zeit

davor oder danach gelegt werden. Lässt sich der Aufenthalt in der direkten Sonne in dieser Zeit nicht umgehen, so bieten geeignete Kleidung, Hut und Sonnenbrille den besten Schutz. Unbedeckte Körperpartien sollten auch im Schatten mit einem Sonnenschutzmittel mit ausreichendem Lichtschutzfaktor (bei sonnenungewöhnlicher Haut mindestens Faktor 15 [1]) eingecremt werden. Die Haut von Kinder reagiert dabei sehr viel empfindlicher auf UV-Strahlung als die Erwachsener. In jedem Fall sollten Sonnenbrände, gerade im Kindesalter, vermieden werden, da erwiesen ist, dass sie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hauterkrankungen bis hin zum Hautkrebs signifikant erhöhen. Vor diesem Hintergrund lässt sich durch ein verantwortungsbewusstes Verhalten in der Sonne eine übermäßige UV-Exposition vermeiden, ohne auf die wohltuende Wirkung des Sonnenlichts zu verzichten.

Literatur

- [1] Strahlenschutzkommission: Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung – Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission, Nr. 4, 1998
- [2] DIN 5031-1 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik, Beuth Verlag, Berlin, 1982
- [3] DIN 5031-10 Strahlenphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Photobiologisch wirksame Strahlung Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektrum, Beuth Verlag, Berlin, 1996
- [4] VDI-Richtlinien: Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Oberflächen, VDI 3789, Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [5] R. Zellner u.a. (Hrsg.) 10 Jahre Deutsche Ozonforschung 1989-1999, Verlag für Marketing und Kommunikation Worms, 1999
- [6] L.T.Molina - M.J.Molina: Absolute absorption cross sections of Ozone in the 185- to 350-nm wavelength range, Geophys. Res. 91 (1986) D13, 14,501-14,508
- [7] C.Stick, L.Pielke: Die Zusammensetzung der solaren UV-Strahlung im Tagesverlauf, Akt. Dermatol. 24 (1998), 159-163
- [8] C.Stick: Die Beiträge von direkter und indirekt diffuser Sonnenstrahlung im UV-Spektrum, Akt. Dermatol. 27 (2001), 7-12

Ich danke Herrn Professor Carsten Stick für die konstruktive Durchsicht des Manuskripts.

Dipl.-Phys. Henner Sandmann, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Medizinische Klimatologie, Hermann-Rodewald-Str. 5, 24 098 Kiel, henner.sandmann@t-online.de

Der Autor war nach seinem Studium als wissenschaftlicher Fachreferent im Bundesamt für Strahlenschutz in München für die Qualitätssicherung und -kontrolle eines deutschlandweiten solaren UV-Messnetzes verantwortlich. Zur Zeit beendet er im Institut für Medizinische Klimatologie der Universität Kiel seine Dissertation über die Eigenschaften und biologischen Wirkungen der ultravioletten Himmelsstrahlung.