

Solare UV-Strahlung im Hochgebirge und ihre Bedeutung für den Menschen

von

Walter AMBACH und Mario BLUMTHALER *)

(Institut für Medizinische Physik der Universität Innsbruck)

Solar UV-radiation in high mountains and its significance to man

Synopsis: Important biological reactions from solar UV-radiation are erythema, immediate and delayed pigmentation, and photokeratitis. Cataract and carcinogenic risk occur with great latency. Results from measurements of solar UV-radiation at Jungfrauoch (3576 m a.s.l.) and in Innsbruck (577 m a.s.l.) are discussed in connection with these biological reactions. The increase of the erythema effective radiation with altitude amounts to 24 % / 1000 m, that of the global radiation only to 9 % / 1000 m. A particular high radiant exposure results from snow covered terrain, as dry snow shows an extremely high albedo of 95 % for erythema effective radiation.

1. Einleitung:

Der Spektralbereich der UV-Strahlung ist in 3 Bereiche eingeteilt: UV-C von 200 bis 280 nm, UV-B von 280 bis 320 nm und UV-A von 320 bis 400 nm. Diese Einteilung ist damit begründet, daß relativ enge Spektralbereiche sehr unterschiedliche biologische Wirkungen hervorrufen. Im Sonnenspektrum fehlt auf der Erdoberfläche UV-C-Strahlung zur Gänze.

Bereits geringe Intensitäten der solaren UV-Strahlung ergeben wichtige biologische Reaktionen. Die Wirksamkeit wird durch das Aktivierungsspektrum angegeben, dessen Maximum mit 100 % normiert ist (DIN 5031, 1979). Das bekannteste Aktivierungsspektrum ist das des Erythems¹⁾ (Abb. 1a). Daraus ist ersichtlich, daß bei $\lambda = 297$ nm die größte Erythemwirkung erreicht wird. Bei Sonnenbestrahlung ist der Bereich $\lambda < 300$ nm praktisch nicht vorhanden, so daß ein erythemwirksames Sonnenspektrum berechnet wird (Abb. 1b). Dieses ergibt sich durch Multiplikation des Sonnenspektrums mit dem Aktivierungsspektrum. Abb. 2 zeigt die effektiven Aktivierungsspektren einiger bekannter Reaktionen bei Sonnenbestrahlung. Daraus wird ein Risikospektrum abgeleitet, das sich als Einhüllende der effektiven Aktivierungsspektren von Erythem, Konjunktivitis²⁾ und Keratitis³⁾ ergibt (Abb. 3). Die Aufnahme von Aktivierungsspektren ist eine schwierige Aufgabe, weil monochromatische Strahlung hoher Intensität erforderlich ist und die Reaktion bei den jeweiligen Wellenlängen festgestellt werden muß. Bei Reaktionen mit langer Latenz-

*) Anschrift der Verfasser: Univ.-Prof. Dr. phil. W. Ambach und Dr. phil. M. Blumthaler, Institut für Medizinische Physik, Müllerstraße 44, A-6020 Innsbruck, Österreich.

1) Sonnenbrand

2) Bindehautentzündung

3) Hornhautentzündung

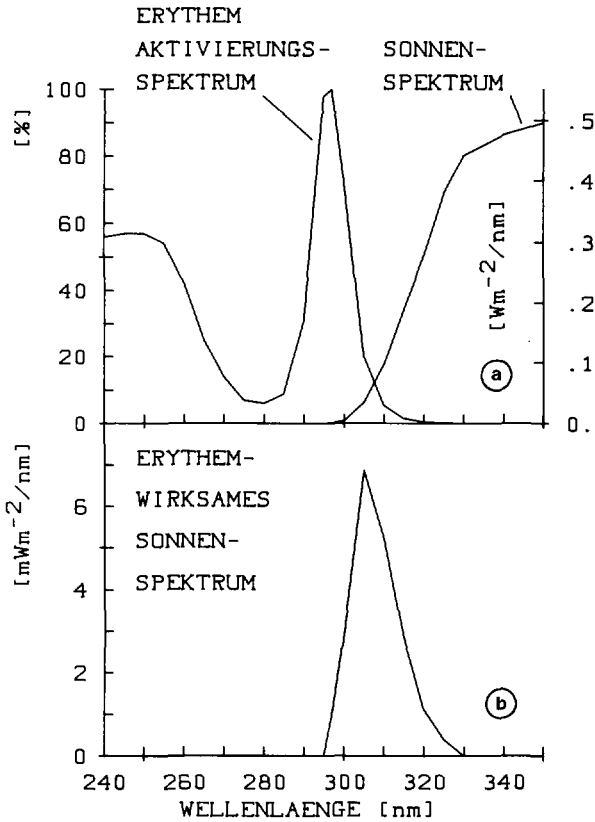


Abb. 1: a) Erythem Aktivierungsspektrum nach DIN 5031 (1979) und Sonnenspektrum für 60° Sonnenhöhe und 0.32 cm O₃ nach BENER (1972).
b) Erythemwirksames Sonnenspektrum, berechnet durch Multiplikation beider Kurven aus Abb. 1a.

zeit, wie dies beispielsweise bei der karzinogenen Wirkung und der Katarakt⁴⁾ vorliegt, ergeben sich praktisch kaum lösbare Probleme.

UV-Licht stellt einen wichtigen Faktor bei der Entstehung einiger Hauttumoren dar. Dies sind das Plattenepithelkarzinom und dessen Vorstufe, die Aktinische Keratose, die meist nach langjähriger chronischer UV-Licht-Exposition entstehen. Ferner zählt dazu das Basaliom, ein semimaligner Tumor, der ebenfalls von der Epidermis ausgeht und schließlich der bösartigste Hauttumor, das Melanom, für welchen vor allem intensive Sonnenbestrahlung der nicht vorgebräunten Haut stimulierend wirkt. Aus Tierversuchen geht hervor, daß für die karzinogene Wirkung und das Erythem ähnliche Aktivierungsspektren angenommen werden können.

4) Trübung der Augenlinse.

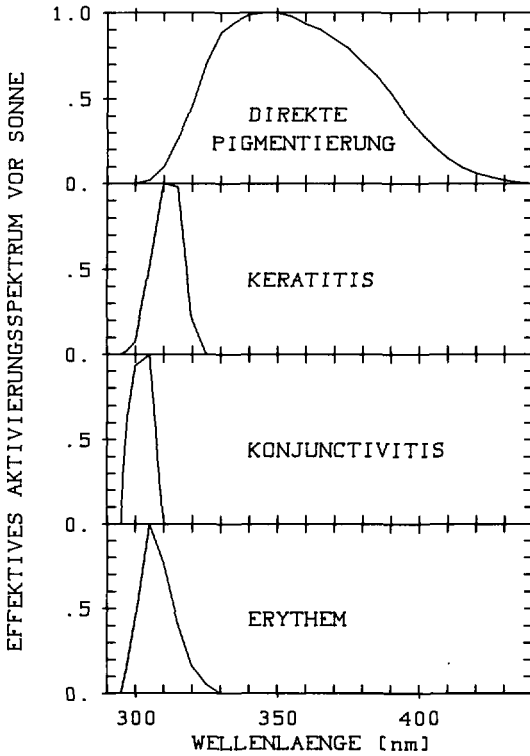


Abb. 2: Effektive Aktivierungsspektren verschiedener biologischer Reaktionen vor Sonne. Die Berechnung erfolgt wie in Abb. 1b angegeben.

2. Messungen der solaren UV-Strahlung:

Zur Messung der biologischen Wirksamkeit der Strahlung muß der Detektor eine spektrale Empfindlichkeitskurve aufweisen, die dem Aktivierungsspektrum der biologischen Reaktion entspricht. In der Praxis haben sich 2 Detektorsysteme bewährt (Abb. 4): Zur Messung der solaren UV-B Strahlung das Robertson-Berger Sunburn-Meter mit einer spektralen Empfindlichkeit, die dem Erythem entspricht (BERGER, 1976); für die solare UV-A Strahlung das Eppley UV-Radiometer mit einer der direkten Pigmentierung ähnlichen spektralen Empfindlichkeit (DRUMMOND and WADE, 1969). Die Übereinstimmung der spektralen Empfindlichkeit der Detektoren mit dem jeweiligen Aktivierungsspektrum ist allerdings nicht vollständig. Die Anzeige des UV-B Detektors erfolgt in Sunburn Units (SU), wobei 1 SU die Schwellwertdosis für das Erythem einer strahlungsmäßig nicht vorbelasteten kaukasischen Haut ist. Die Schwellwertdosis entspricht 200 J/m^2 , bezogen auf 297 nm.

3. Ergebnisse:

3.1. Einfluß der Seehöhe:

Es wurden mit dem Robertson-Berger Sunburn-Meter Messungen der erythemwirksamen Dosis an einer Höhenstation (Jungfraujoch, 3576 m Seehöhe) und an einer Talstation (Innsbruck,

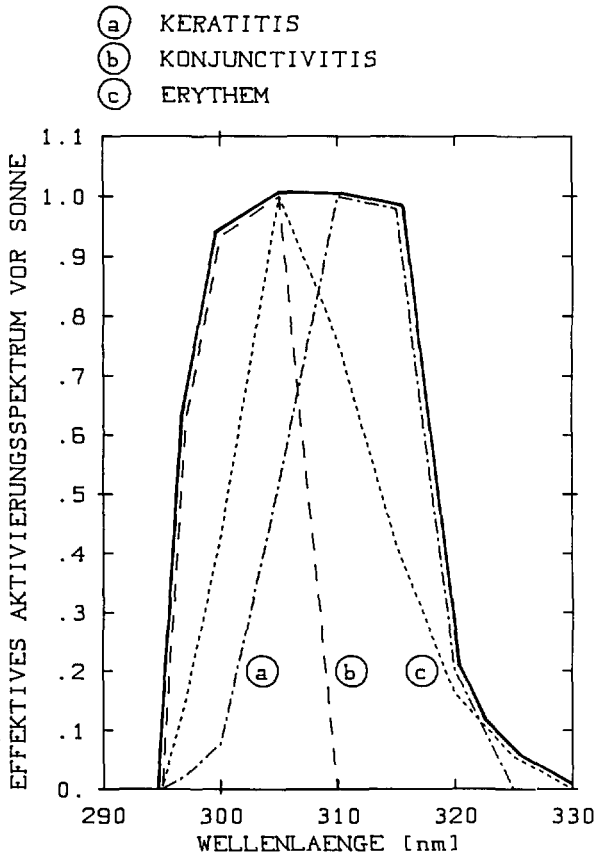


Abb. 3: Effektive Aktivierungsspektren verschiedener biologischer Reaktionen vor Sonne und das daraus resultierende Risikospektrum (durchgezogene Linie).

577 m Seehöhe) im jahreszeitlichen Verlauf durchgeführt (BLUMTHALER et al., 1985a). Daraus sind höhenbedingte und jahreszeitlich bedingte Unterschiede der Tagesdosen zu erkennen (Abb. 5). Die maximal möglichen Tagesdosen sind aus dem Verlauf einer fiktiven Einhüllenden abzulesen. Am Jungfraujoch sind die Tagesdosen im Sommer für erythemwirksame Strahlung 171 % jener in Innsbruck, für die Globalstrahlung⁵⁾ ergibt sich eine Erhöhung auf nur 127 %. Im Winter sind die Tagesdosen für erythemwirksame Strahlung etwa 5 % jener vom Sommer, wobei dieser Unterschied unabhängig von der Seehöhe ist.

3.2. Anteile von erythemwirksamen und pigmentierenden Dosen an der Globalstrahlung:

Der Quotient G_{ER}/G gibt den relativen Anteil der erythemwirksamen Dosis G_{ER} an der Globalstrahlung G . Dieser Anteil ist jahreszeitlich nicht konstant, sondern zeigt im Sommer ein ausge-

5) Sonnenstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung aller Wellenlängen auf eine horizontale Fläche.

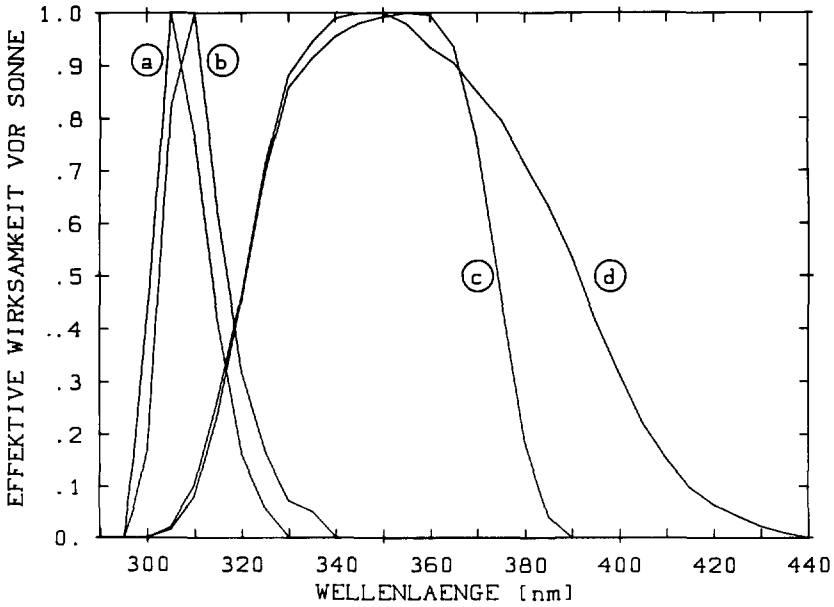


Abb. 4: Effektive Wirksamkeit vor Sonne.

a: Erythem, b: Robertson-Berger Sunburn-Meter, c: Eppley UV-Radiometer, d: direkte Pigmentierung.

JUNGFRAUJOCH (3576 m asl)

INNSBRUCK (577 m asl)

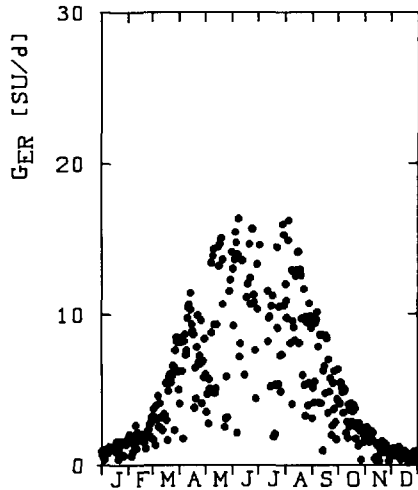
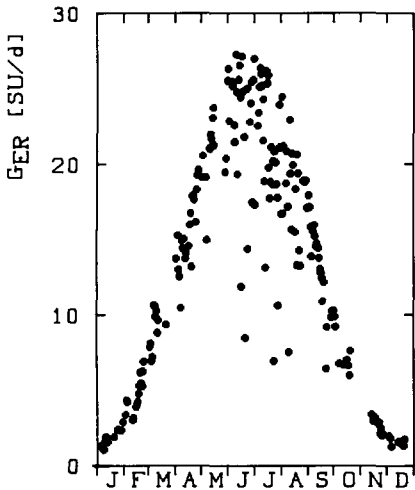


Abb. 5: Tagessummen der erythemwirksamen Strahlung im jahreszeitlichen Verlauf am Jungfrauoch und in Innsbruck.

prägtes Maximum (Abb. 6), (BLUMTHALER et al., 1985b). Die Ursache dafür ist die Ozonschicht, die bei hohem Sonnenstand eine geringe Schwächung der UV-B Strahlung bewirkt. Der Quotient G_{PIG}/G gibt den relativen Anteil der pigmentierenden Dosis G_{PIG} an der Globalstrahlung G . Dieser Anteil zeigt einen jahreszeitlich annähernd konstanten Wert, weil die UV-A Strahlung vom Ozon nicht absorbiert wird. Abweichungen von der Konstanz sind auf eine stärkere Streuung der UV-A Strahlung im Vergleich zur sichtbaren Strahlung zurückzuführen.

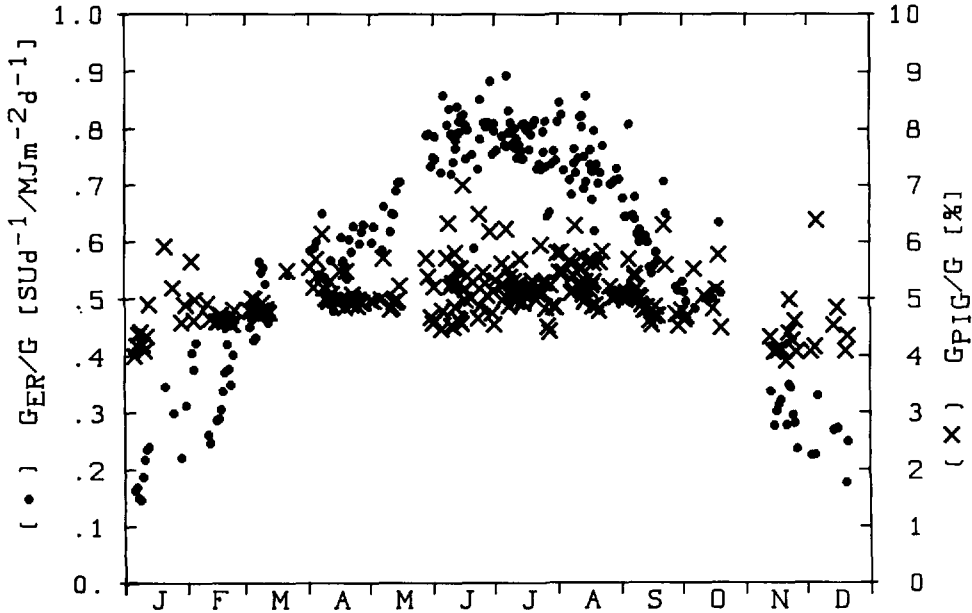


Abb. 6: Anteile der erythemwirksamen Strahlung (G_{ER}/G) und der pigmentierenden Strahlung (G_{PIG}/G) an der Globalstrahlung im jahreszeitlichen Verlauf. Volle Kreise: G_{ER}/G , Kreuze: G_{PIG}/G .

4. Auswirkungen auf den Menschen:

4.1. Pigmentierung als Schutzfaktor gegen erythemwirksame Strahlung:

Die Pigmentierung der Haut ist ein Schutzfilter für die eindringende UV-B Strahlung. Nach Durchstrahlen der Epidermis verbleiben bei 300 nm bei negroider Haut etwa 2 %, bei kaukasischer Haut etwa 9 % der auftreffenden Strahlung (PATHAK and FITZPATRICK, 1974). Die Pigmentierung wird sowohl durch UV-A Strahlung als auch durch UV-B Strahlung erreicht. Bei UV-A Strahlung setzt sie sich aus direkter und sekundärer Pigmentierung zusammen, während durch UV-B Strahlung nur sekundäre Pigmentierung entsteht. Direkte und sekundäre Pigmentierung unterscheiden sich wesentlich im zeitlichen Ablauf (SCHULZE, 1970). Während die direkte Pigmentierung kurz nach der Bestrahlung ein Maximum aufweist, stellt sich die sekundäre Pigmentierung erst nach Abklingen des Erythems ein (Abb. 7).

Tagessummen der erythemwirksamen und pigmentierenden Dosen sind als Monatsmittel im jahreszeitlichen Verlauf dargestellt, wobei die Dosen als Vielfaches der jeweiligen Schwellwertdosis zu verstehen sind (Abb. 8). Die erythemwirksamen Dosen von UV-A und UV-B sind kumulativ gezeichnet (Abb. 8c), ebenfalls die entsprechenden Dosen für sekundäre Pigmentierung (Abb. 8a).

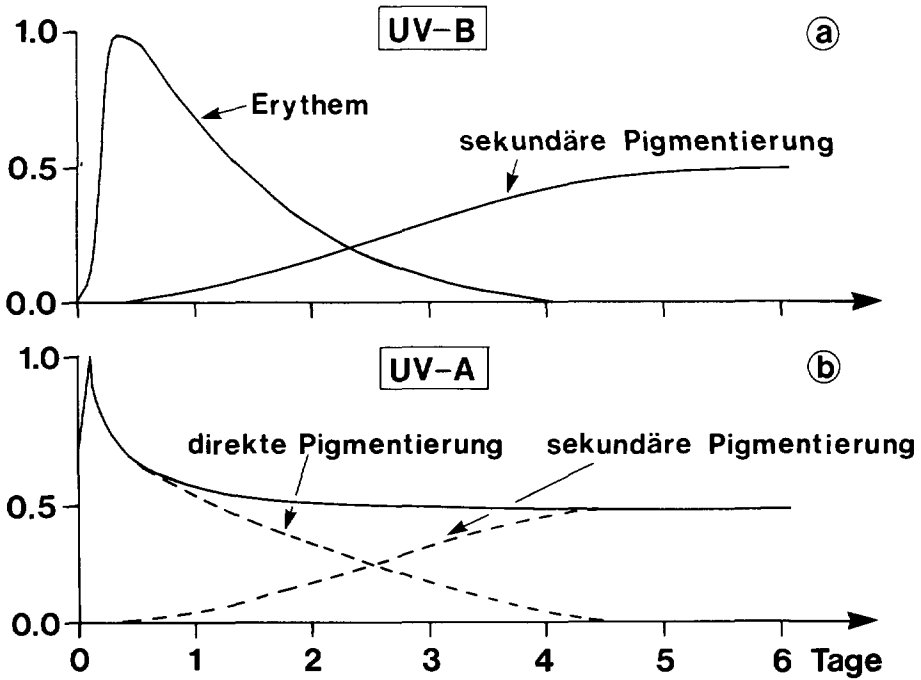


Abb. 7: a) Zeitlicher Verlauf des Erythems und der sekundären Pigmentierung durch UV-B Strahlung
 b) Zeitlicher Verlauf der direkten und sekundären Pigmentierung durch UV-A Strahlung
 Durchgezogene Linie ergibt die Summe beider Reaktionen.

Direkte Pigmentierung ergibt sich nur durch UV-A (Abb. 8b). Der Quotient $(G_{PID} + G_{PIS})/G_{ER}$ läßt sich als Schutzfaktor interpretieren (Abb. 8d). Große Werte des Quotienten bedeuten nämlich, daß die pigmentierende Dosis im Vergleich zur erythemwirksamen Dosis groß ist. Der jahreszeitliche Verlauf des Quotienten zeigt im Sommer ein ausgeprägtes Minimum (Abb. 8d). Daraus ergibt sich die Interpretation, daß beim Übergang vom Winter zum Sommer die erythemwirksame Dosis stärker ansteigt als die pigmentierende Dosis.

Für das große Erythemrisiko im Sommer gibt es mehrere Gründe. Erstens ist die triviale Tatsache zu nennen, daß im Sommer die gesamte solare Strahlung größer ist als im Winter. Zweitens ist der relative Anteil der erythemwirksamen Strahlung an der Globalstrahlung größer und drittens ist die erforderliche Schutzwirkung durch Pigmentierung im Sommer nicht in entsprechendem Maße erreichbar.

4.2. Photokeratitis⁶⁾:

Bei der Photokeratitis handelt es sich um eine kombinierte Entzündung der Hornhaut und der Bindehaut des Auges, die zwischen Frühjahr und Herbst bei schneebedecktem Gelände auftreten kann. Die keratitiswirksame Strahlung kann mit Hilfe des Aktivierungsspektrums der Photokeratitis und des UV-Spektrums der Sonne ermittelt werden (Abb. 9).

6) Schneeblindheit

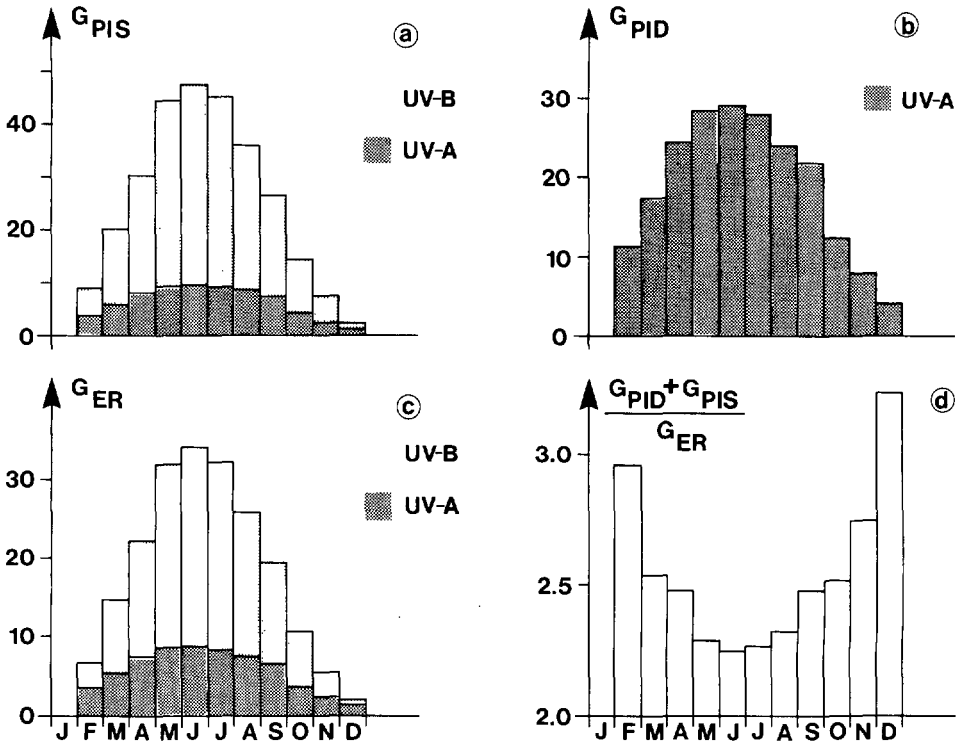


Abb. 8: Mittlere Tagessummen im jahreszeitlichen Verlauf in Einheiten der Schwellwertdosis.

- Sekundäre Pigmentierung durch UV-A und UV-B Strahlung.
- Direkte Pigmentierung durch UV-A Strahlung.
- Erythemwirkung durch UV-A und UV-B Strahlung.
- Quotient $(G_{PID} + G_{PIS})/G_{ER}$ für die Schutzwirkung durch Pigmentierung.

Aus Messungen ist bekannt, daß die Albedo⁷⁾ einer sauberen, trockenen Schneeoberfläche für UV-B Strahlung bis zu 100 % betragen kann und damit deutlich über der Albedo für Globalstrahlung liegt. Demgegenüber ist die UV-B Albedo für apere Gelände kleiner als für Globalstrahlung (BLUMTHALER und AMBACH, 1985). Es wurde im folgenden angenommen, daß das Auge einer schneebedeckten horizontalen Oberfläche zugewandt ist. In Abb. 10 sind die keratitiswirksamen Intensitäten zu Mittag für die Solstitien und die Äquinoktien für schneebedecktes und apere Gelände dargestellt, wobei die UV-B Albedo für Schneeoberflächen zu 95 %, für apere Oberflächen zu 6 % angenommen wurde. Besonders auffallend ist der große Unterschied der Intensitäten bei schneebedeckter und aperer Oberfläche. Dieser Unterschied läßt verstehen, daß die Photokeratitis praktisch nur bei schneebedecktem Gelände auftritt, weil bei apere Gelände die Schwellwertdosis im Verlauf eines Tages auch im Sommer nicht erreicht wird.

4.3. Katarakt:

UV-Strahlung ist eine mögliche Ursache für die Katarakt. Das Aktivierungsspektrum der Katarakt ist jedoch wegen der langen Latenzzeit der Genesis nur ungenügend bekannt. In Tierversu-

7) Reflexionsvermögen

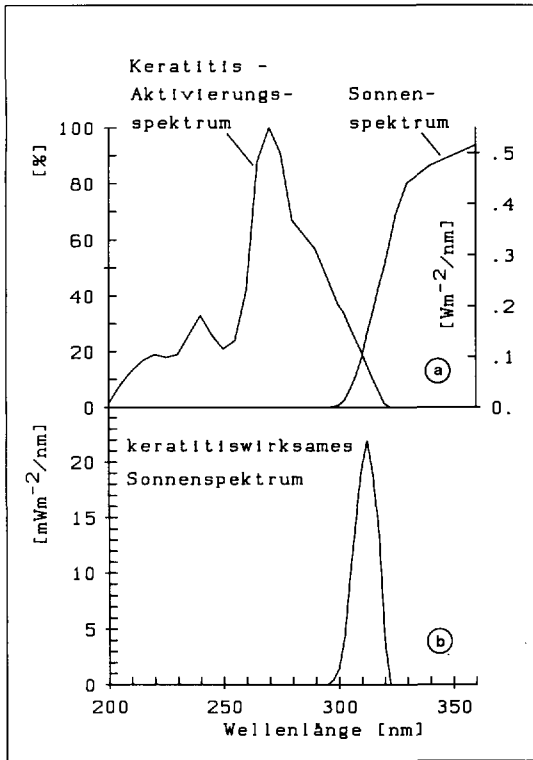


Abb.9: a) Keratitis Aktivierungsspektrum nach DIN 5031 (1979) und Sonnenspektrum für 60° Sonnenhöhe und 0.32 cm O₃ nach BENER (1972).

b) Keratitiswirksames Sonnenspektrum berechnet durch Multiplikation beider Kurven von Abb. 9a.

chen wurde ein Aktivierungsspektrum bestimmt, das eine hohe Wirksamkeit von UV-B Strahlung und eine wesentlich geringere Wirksamkeit von UV-A Strahlung ergibt (BACHEM, 1956). Das berechnete effektive Aktivierungsspektrum vor Sonne zeigt jedoch, daß wegen des starken Anstiegs der UV-A Intensität im Sonnenspektrum mit zunehmender Wellenlänge beide UV-Bereiche in gleicher Weise zu berücksichtigen sind (Abb. 11).

5. Schlußbemerkungen:

Das Strahlungsklima der solaren UV-Strahlung weist charakteristische Unterschiede zur Globalstrahlung auf. Es ist wesentlich, daß trotz der geringen Energie im UV-Bereich wichtige biologische Reaktionen verursacht werden, wobei neben der Vitamin-D Bildung vor allem risikobehaftete Reaktionen auftreten. Das unterschiedliche Strahlungsklima der solaren UV-Strahlung gegenüber der Globalstrahlung ist auf die absorbierende Wirkung der Ozonschicht für UV-B Strahlung zurückzuführen. Systematische Änderungen der Ozonkonzentrationen zufolge atmosphärischer Kontamination beeinflussen sehr stark die solaren UV-B Intensitäten (CALLIS and NATARAJAN, 1986). Am Beispiel des Erythems wurden Berechnungen durchgeführt, die den Zusammenhang einer Abnahme des Ozons und der Zunahme der erythemwirksamen Strahlung ergeben. Es

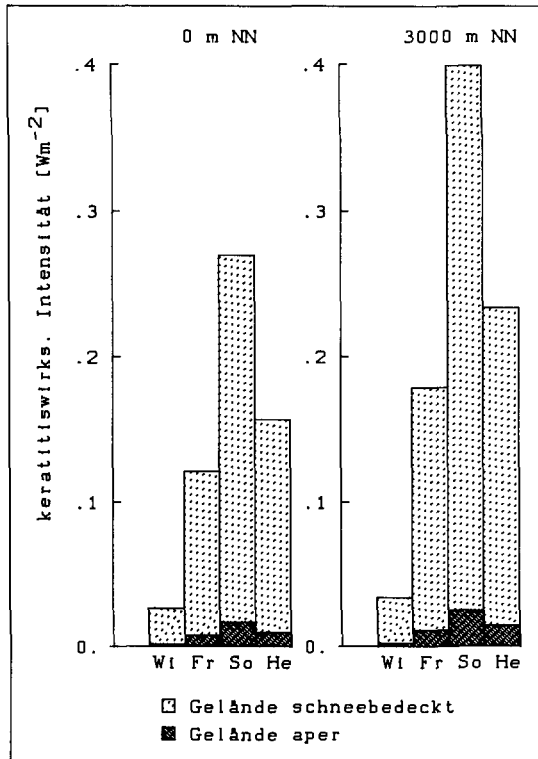


Abb. 10: Keratitiswirksame Intensitäten zu Mittag zu den Solstitien und Äquinoktien für Meeresniveau und 3000 m NN. Das Auge betrachtet horizontale Oberflächen verschiedener Albedo. Punktiertes Bereich: schneebedecktes Gelände (Albedo 95 %). Schraffierter Bereich: aperes Gelände (Albedo 6 %).

resultiert eine nichtlineare Beziehung. Beispielsweise zeigt sich bei einer Ozonabnahme um 20 % eine Zunahme der erythemwirksamen Strahlung um 40 % (AMBACH, 1983). Dieses Ergebnis ist insofern von Bedeutung, als das Aktivierungsspektrum für die karzinogene Wirkung ähnlich dem des Erythems angenommen werden kann, so daß die für das Erythem abgeleiteten Ergebnisse auf die karzinogene Wirkung übertragbar sind.

D a n k : Die Autoren danken der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Wien) und der Legerlotz-Stiftung für die finanzielle Unterstützung sowie der Direktion der Hochalpinen Forschungsstation Jungfrauojoch für die freundliche Aufnahme.

Z u s a m m e n f a s s u n g : Wichtige biologische Reaktionen, die durch solare UV-Strahlung verursacht werden, sind das Erythem, die direkte und sekundäre Pigmentierung sowie die Photokeratitis. Katarakt und karzinogene Wirkung können sich mit großer Latenzzeit ergeben. Meßwerte der solaren UV-Strahlung am Jungfrauojoch (3576 m NN) und in Innsbruck (577 m NN) werden im Zusammenhang mit diesen biologischen Wirkungen der UV-Strahlung diskutiert. Die Zunahme der erythemwirksamen Strahlung mit der Seehöhe beträgt 24 %/1000 m, jene der Globalstrahlung nur 9 %/1000 m. Besonders hohe Bestrahlungsdosen ergeben sich im schneebedeckten Gelände, weil trockener Neuschnee für erythemwirksame Strahlung eine mittlere Albedo von 95 % hat.

KATARAKTWIRKSAMES SONNENSPEKTRUM

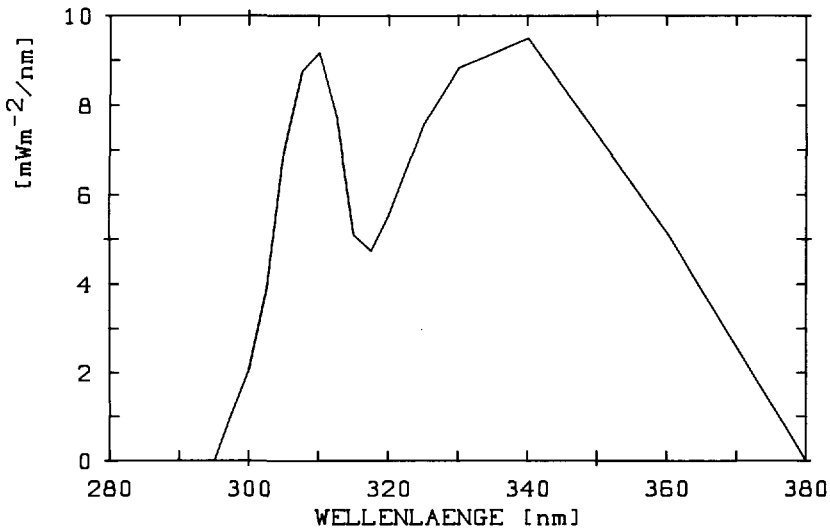


Abb. 11: Effektives Aktivierungsspektrum vor Sonne für Katarakt (BACHEM, 1956). Sonnenspektrum für 60°
Sonnenhöhe und 0.32 cm O₃ (BENER, 1972).

Literatur:

- AMBACH, W. (1983) Zur erhöhten erythemwirksamen Dosis bei Abnahme der Ozonkonzentration in der Atmosphäre. — *Med. Welt*, **34**: 204 - 206.
- BACHEM, A. (1956): Ophthalmic Ultraviolet Action Spectra. — *Am. Journal of Ophthalmology*, Vol. **41**: 969 - 975.
- BENER, P. (1972): Approximate Values of intensity of natural ultraviolet Radiation for different amounts of atmospheric ozone. — Final Technical Report. Contr. DAJA37-68-C-1017, Davos, June 1972.
- BERGER, D.S. (1976): The Sunburning Ultraviolet Meter: Design and Performance. — *Photochem. Photobiol.*, **24**: 587 - 593.
- BLUMTHALER, M. und W. AMBACH (1985): Neuere Messungen der Albedo verschiedener Oberflächen für erythemwirksame Strahlung. — *Annalen der Meteorologie* Nr. **22**, Offenbach a. Main.
- BLUMTHALER, M., W. REHWALD and W. AMBACH (1985a): Seasonal variations of erythema dose at two Alpine stations in different altitudes. — *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology*, Ser. B **35**: 389 - 397.
- BLUMTHALER, M., W. AMBACH and H. CANAVAL (1985b): Seasonal variation of solar UV-radiation at a high mountain station. — *Photochem. Photobiol.*, **42**: 147 - 152.
- CALLIS, L.B. and M. NATARAJAN (1986): Ozone and nitrogen dioxide changes in the stratosphere during 1979 - 84. — *Nature* Vol., **323**: 772 - 777.
- DIN 5031 (1979): Deutsche Normen. Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 10.
- DRUMMOND, A.J. and H.A. WADE (1969): Instrumentation for the Measurement of Solar Ultraviolet Radiation. — In: URBACH, F.: *The Biologic Effects of Ultraviolet Radiation*, pp. 391 - 407, Oxford: Pergamon Press.
- PATHAK, M. and T. FITZPATRICK (1974): The Role of Natural Photoprotective Agents in Human Skin. — In: *Sunlight and Man*, Ed. T.B. FITZPATRICK, ed. by University of Tokyo Press, pp. 725 - 750.
- SCHULZE, R. (1970): *Strahlenklima der Erde*. — D. Steinkopff Verlag, Darmstadt.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1987

Band/Volume: [74](#)

Autor(en)/Author(s): Ambach Walter, Blumthaler Mario

Artikel/Article: [Solare UV-Strahlung im Hochgebirge und ihre Bedeutung für den Menschen. 7-17](#)