©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

Ber. nat.-med. Verein Innsbruck	Band 81	S. 7 – 14	Innsbruck, Okt. 1994

Spektrale Messungen des Höheneffektes der solaren UV-Strahlung im Raum Innsbruck

von

Walter AMBACH, Mario BLUMTHALER & Christian ANSELM *)

Spectral Measurements of the Altitude Effect of Solar UV-Irradiance in the Region of Innsbruck

Synopsis: Spectra of global and direct UV irradiance were measured under cloudless sky for varying solar elevations at two stations in the Tyrol (Innsbruck 577 m, Hafelekar 2300 m). The altitude effect of direct irradiance is significantly greater as that of global irradiance. There is a strong increase of the altitude effect of the direct irradiance with shorter wavelength, but a weak increase for that of the global irradiance. Applying a radiation transfer model, spectra of direct UV irradiance were calculated at varying solar elevations and different atmospheric conditions. Weighting these spectra with the erythema action spectrum, the erythema effective irradiance was determined. At high solar elevations the direct erythema effective irradiance yields an altitude effect of about 58 % per 1000 m, while the altitude effect of global erythema effective irradiance amounts to 18 % per 1000 m.

1. Einleitung:

Die Stationen Innsbruck (577 m) und Hafelekar (2300 m) eignen sich wegen der kurzen Horizontaldistanz von 2.5 km sehr gut zur experimentellen Bestimmung des Höheneffektes der solaren UV-Strahlung. Die Zunahme der UV-Strahlung mit der Seehöhe wurde an diesen Stationen mit einem hochauflösenden Doppelmonochromator in den Monaten Jänner bis März 1992 an wolkenlosen Tagen gemessen. Der Doppelmonochromator ermöglicht spektrale Messungen im Bereich 290 nm bis 350 nm in Schritten von 0,5 nm mit einer Halbwertsbreite von ± 0,4 nm. Es wurden die globale Strahlung auf die Horizontale und die direkte Strahlung getrennt gemessen.

Die Zunahme der UV-Strahlung mit der Höhe wird als Höheneffekt bezeichnet und als Quotient der Intensitäten I(HKR)/I(IBK) angegeben (HKR = Hafelekar, IBK = Innsbruck). Der Höheneffekt hängt von der Wellenlänge, der Sonnenhöhe, der Trübung der Atmosphäre, der Albedo des Geländes und dem troposphärischen Ozon ab. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Höheneffekt in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei verschiedenen atmosphärischen Bedingungen für die globale und die direkte Strahlung zu erfassen.

2. Spektraler Höheneffekt der globalen und direkten Strahlung aus Meßdaten:

UV-Spektren wurden an beiden Stationen getrennt für die globale und die direkte Strahlung gemessen. Da nur ein einziges Spektrometer zur Verfügung stand, wurden Messungen an verschiedenen Tagen mit möglichst gleichartigen atmosphärischen Bedingungen zur Beurteilung des Hö-

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

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

heneffektes herangezogen. Abb. 1 enthält als Beispiele Ergebnisse des Höheneffektes bei ca. 20° Sonnenhöhe. Die Struktur des Kurvenverlaufes ist durch eine geringfügige Wellenlängenverschiebung (<0,05 nm) der gemessenen Spektren in Berg- und Talstation bedingt. Der Höheneffekt ist für die direkte Strahlung wesentlich größer als für die globale Strahlung. Bei der direkten Strahlung ergibt sich eine starke Zunahme des Höheneffektes mit abnehmender Wellenlänge, bei der globalen Strahlung ist diese Zunahme nur schwach ausgeprägt.

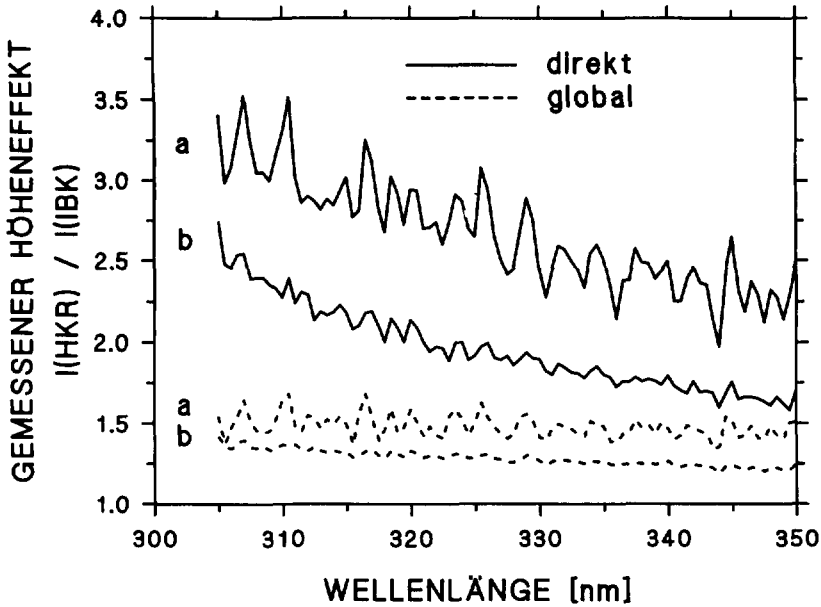

Abb. 1: Gemessener Höheneffekt als Quotient der Intensitäten auf der Bergstation Hafelekar (HKR, 2300 m ü.d.M.) und der Talstation in Innsbruck (IBK, 577 m ü.d.M.) für die direkte Strahlung (durchgezogene Linie) und für die globale Strahlung (strichlierte Linie) bei 20° Sonnenhöhe in Abhängigkeit der Wellenlänge an wolkenlosen Tagen. Messung: a) Innsbruck: 14. Jänner 1992; Hafelekar: 16. Jänner 1992. — b) Innsbruck: 28. Februar 1992; Hafelekar: 29. Februar 1992.

Der große Höheneffekt der direkten Strahlung ist durch Absorption und Streuung in der Luftschicht zwischen Berg- und Talstation verursacht, wobei der spektrale Verlauf hauptsächlich aus der Rayleigh-Streuung resultiert. Der geringere Höheneffekt der globalen Strahlung ergibt sich aus dem Umstand, daß der aus der direkten Strahlung gestreute Anteil den diffusen Strahlungsstrom an der Talstation erhöht. Der spektrale Höheneffekt der globalen Strahlung ist in guter Übereinstimmung mit Werten, die mit einem Robertson-Berger sunburn meter für die globale erythemwirksame Strahlung zwischen Innsbruck (577 m) und Jungfraujoch (3576 m) gemessen wurden. Der Vergleich kann für die Wellenlänge des optischen Schwerpunktes des Robertson-Berger sunburn meters (BERGER 1976) bei 307 nm durchgeführt werden. Aus Abb. 1 erhält man für die globale Strahlung als Höheneffekt 1,5 (Kurve a) und 1,3 (Kurve b). Dies entspricht einer Zunahme von 29 % und 17 % pro 1000 m Höhendifferenz. Im Vergleich dazu ist der Höheneffekt der erythemwirksamen Strahlung für maximale Tagessummen im Hochsommer aus Messungen in Innsbruck (577 m) und am Jungfraujoch (3576 m) etwa 18 % pro 1000 m Höhendifferenz (BLUMTHALER et al. 1992). Messungen von REITER et al. (1982) im Raum Garmisch-Partenkirchen ergeben

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

einen Höheneffekt zwischen 14 % und 27 % pro 1000 m Höhendifferenz für Tagessummen im Spektralbereich von 310 nm bis 340 nm, abhängig von der Wettersituation und Bewölkung.

Spektrale Messungen von DIRMHIRN et al. (1993) in den Utah Rocky Mountains ergeben für die globale Strahlung ebenfalls einen geringeren Höheneffekt als für die direkte Strahlung. Für die diffuse Strahlung allein resultiert für Wellenlängen größer 310 nm eine Umkehrung des Höheneffektes mit niedrigeren Intensitäten an der Bergstation. Für Wellenlängen kleiner 310 nm zeigt sich hingegen ein normaler Höheneffekt mit niedrigeren Intensitäten an der Talstation.

3. Spektraler Höheneffekt der direkten Strahlung aus Modellrechnungen:

Zur Berechnung der atmosphärischen Transmission der direkten Strahlung im UV-Bereich wurde ein Schichtenmodell der Atmosphäre unter Berücksichtigung der Erdkrümmung entwickelt (ANSELM 1993). Dabei können die vertikalen Ozon- und Aerosolverteilungen und das Temperaturprofil frei gewählt werden. Für die Ozonabsorption werden die temperaturabhängigen Ozonabsorptionsquerschnitte verwendet (FINNLAYSON-PITTS & PITTS 1986). Die optische Aerosoldicke kann im UV-Bereich frei gewählt werden. Zur Berechnung der Spektren der direkten Strahlung wurde das extraterrestrische Spektrum nach VANHOOSIER et al. (1988) mit der Spaltfunktion des Spektrometers gefaltet. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, um den Gesamtozongehalt aus dem gemessenen spektralen Verlauf der direkten Strahlung zwischen 295 nm und 350 nm unter Verwendung des Modells zu bestimmen. Der so berechnete Ozongehalt stimmt mit unabhängigen Messungen besser als 2 % überein (HUBER et al. 1992).

In Abb. 2 werden von beiden Meßstationen (Hafelekar und Innsbruck) je zwei gemessene Spektren der direkten Strahlung bei verschiedenen Sonnenhöhen und bekanntem Gesamtozon mit aus dem Schichtmodell berechneten Spektren verglichen. Zur Anpassung des berechneten Spek-

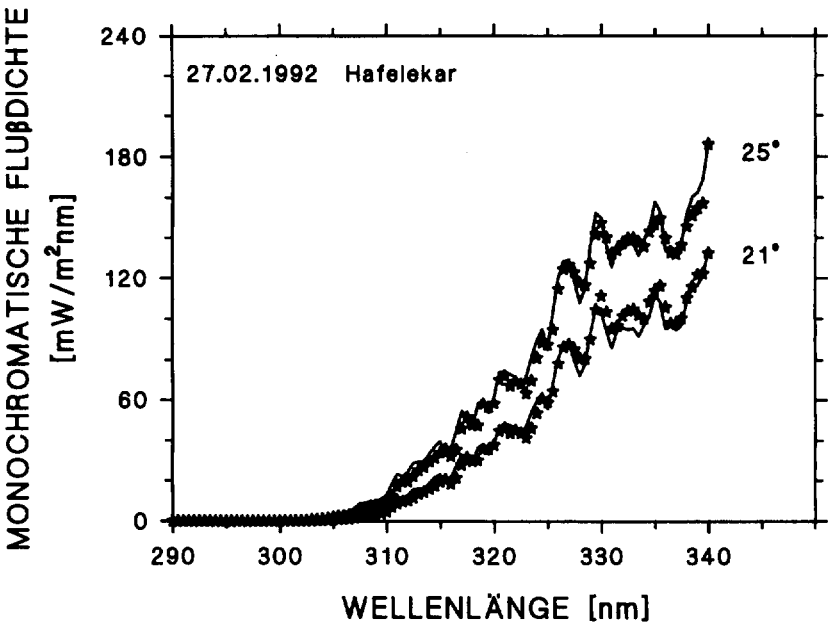

Abb. 2a: Vergleich von gemessenen UV-Spektren der direkten Strahlung (Stern) mit berechneten Spektren (durchgezogene Linie) für zwei Sonnenhöhen an der Bergstation Hafelekar (HKR, 2300 m ü.d.M.) an wolkenlosen Tagen.

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

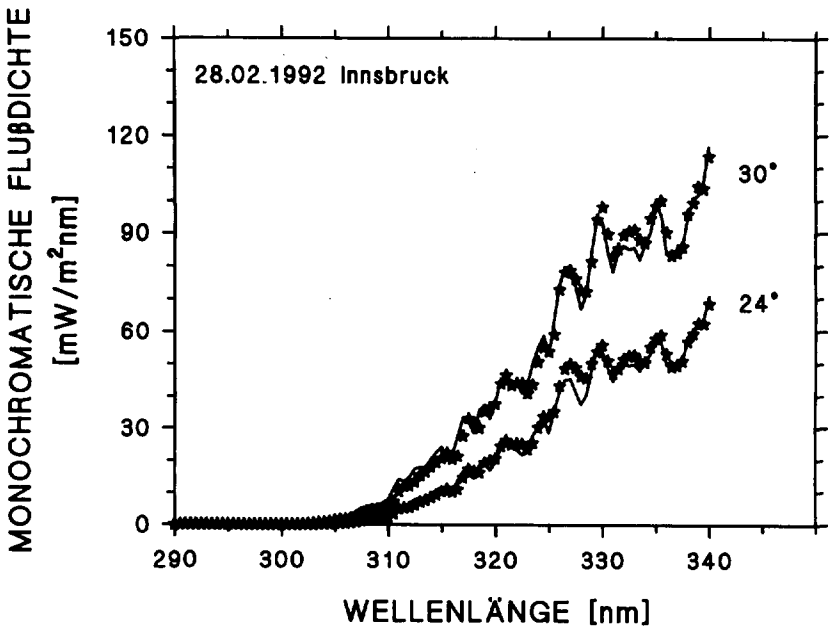

Abb. 2b: Vergleich von gemessenen UV-Spektren der direkten Strahlung (Stern) mit berechneten Spektren (durchgezogene Linie) für zwei Sonnenhöhen an der Talstation in Innsbruck (IBK, 577 m ü.d.M.) an wolkenlosen Tagen.

trums an die Meßpunkte wird die optische Aerosoldicke variiert. Die so erhaltene optische Aerosoldicke ist wegen der Wellenlängenabhängigkeit mit der mit der aktinometrisch gemessenen optischen Aerosoldicke bei 427 nm nicht identisch, liegt aber in der gleichen Größenordnung. Für 320 nm betragen die aus dem Modell bestimmten Werte der optischen Aerosoldicke 0,47 (Innsbruck) und 0,22 (Hafelekar), die bei 427 nm mit dem Aktinometer gemessenen optischen Aerosoldicken sind 0,37 nm (Innsbruck) und 0,17 nm (Hafelekar). Die kleineren Werte der Aerosoldicke bei 427 nm im Vergleich zu 320 nm entsprechen dem typischen spektralen Verlauf der optischen Aerosoldicke.

4. Einfluß atmosphärischer Bedingungen auf den Höheneffekt der direkten Strahlung:

Der Einfluß der Trübung und der Sonnenhöhe auf den spektralen Verlauf des Höheneffektes der direkten Strahlung ist in Abb. 3 dargestellt. Für kleinere Sonnenhöhen ist der Höheneffekt größer als für große Sonnenhöhen, weil ein größerer optischer Weg vorliegt. Bei Änderung der Sonnenhöhe von 30 Grad auf 60 Grad ist die Abnahme des Höheneffektes für alle Wellenlängen nur gering, bei Änderung von 10 Grad auf 15 Grad wesentlich ausgeprägter. Insgesamt ergibt sich eine Zunahme des Höheneffektes mit abnehmender Wellenlänge. Die Bezeichnungen "Starke Trübung" und "Geringe Trübung" entsprechen gemessenen Trübungen mit hohem bzw. niedrigem Aerosolgehalt an beiden Stationen in der Periode Jänner bis März 1992. Die entsprechenden optischen Dicken sind in der Tab. 1 zusammengefaßt. Der Gesamtozongehalt spielt für den Höheneffekt praktisch keine Rolle, weil die Absorption durch Ozon hauptsächlich in der Stratosphäre erfolgt. Die "Smogsituation" ist durch eine starke Trübung an der Talstation als Folge einer anthropogenen Luftverschmutzung und durch eine geringe Trübung in der Bergstation charakterisiert.

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

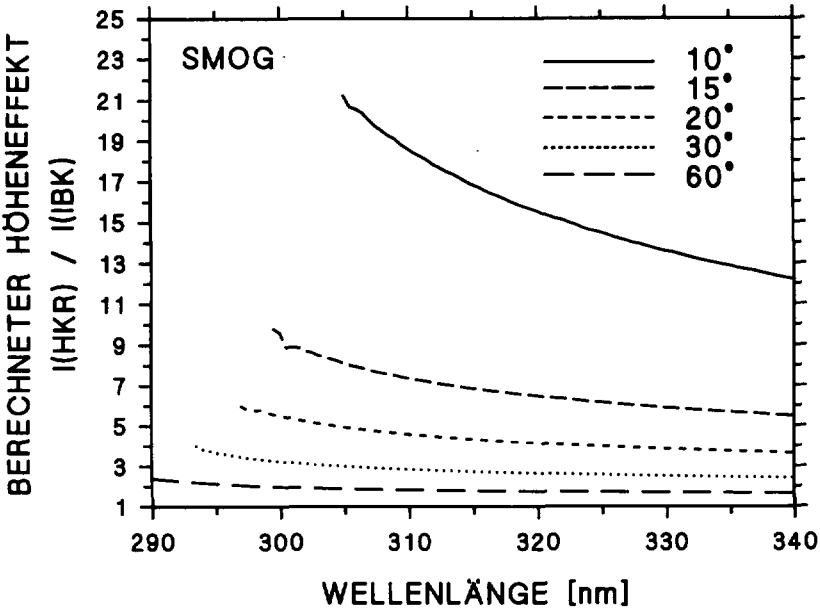

Abb. 3: Berechneter Höheneffekt der direkten Strahlung als Quotient der spektralen Intensitäten an der Bergstation Hafelekar (HKR, 2300 m ü.d.M.) und der Talstation in Innsbruck (IBK. 577 m ü.d.M.) in Abhängigkeit der Wellenlänge für fünf verschiedene Sonnenhöhen zwischen 10° und 60°.
3a) Smog. Modellparameter siehe Tab. 1.

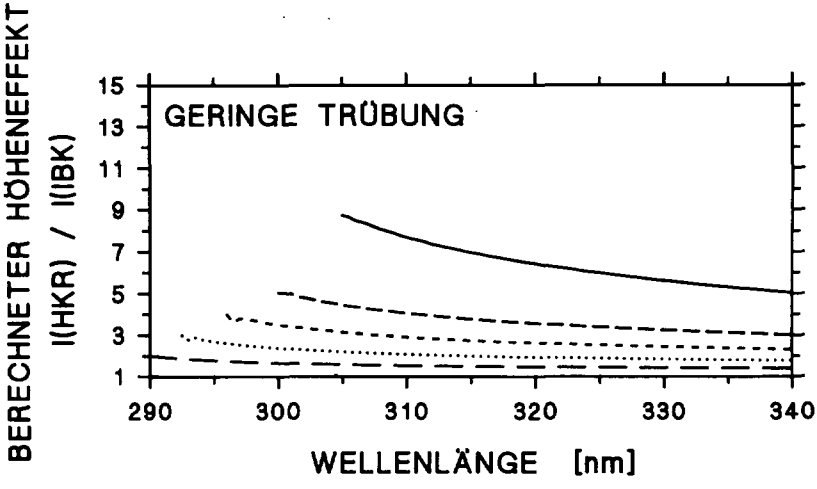

Abb. 3b: Geringe Trübung. Modellparameter siehe Tab. 1.

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

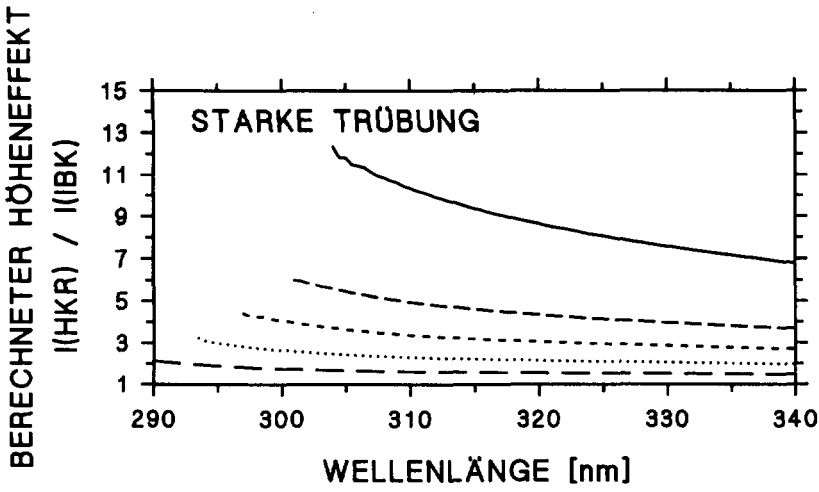

Abb. 3c: Starke Trübung. Modellparameter siehe Tab. 1.

Tab. 1: Modellparameter zur Berechnung von UV-Spektren für die direkte Strahlung (τ = optische Aerosoldicke, DU = Dobson Units).

	Innsbruck		Hafelekar	
	τ(320 nm)	τ(427 nm)	τ(320 nm)	τ(427 nm)
geringe Trübung	0.380	0.261	0.229	0.157
starke Trübung	0.537	0.369	0.333	0.229
Gesamtozon	300 DU	300 DU	300 DU	300 DU

Während bei starker Trübung gegenüber geringer Trübung der Höheneffekt des direkten Strahlungsstromes nur geringfügig erhöht ist, ergibt sich bei Smog insbesondere bei niedrigen Sonnenhöhen ein verstärkter Höheneffekt. Bei Smogsituation ist für 305 nm und 10° Sonnenhöhe der Höheneffekt um den Faktor 1,9 bis 2,3 gegenüber starker bzw. geringer Trübung verstärkt.

5. Höheneffekt der erythemwirksamen direkten Strahlung:

Für den in Abb. 3 dargestellten Höheneffekt der direkten Strahlung für geringe Trübung, starke Trübung und Smog wurden berechnete UV-Spektren des direkten Strahlungsstromes für die Berg- und Talstation mit dem Wirkungsspektrum für das Erythem nach MCKINLAY & DIFFEY (1987) gewichtet. Durch die Quotientenbildung der so berechneten Strahlungsströme erhält man in Abb. 4 den Höheneffekt der erythemwirksamen direkten Strahlung in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe. Die Modellparameter sind in Tab. 1 zusammengestellt. Während sich für große Sonnenhöhen ein relativ kleiner Bereich des Höheneffektes bei verschiedenen Trübungssituationen ergibt, ist der Höheneffekt für Sonnenhöhen kleiner 30 Grad für starke Trübung im Vergleich zur geringen Trübung wesentlich größer. Für die Smogsituation resultiert die stärkste Zunahme mit der Sonnenhöhe. Für Sonnenhöhen über 30 Grad kann als repräsentativer Höheneffekt des erythemwirksamen direkten Strahlungsstromes der Faktor 2 angegeben werden. Dies entspricht einer relativen Zunahme von 58 % pro 1000 m Seehöhe.

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

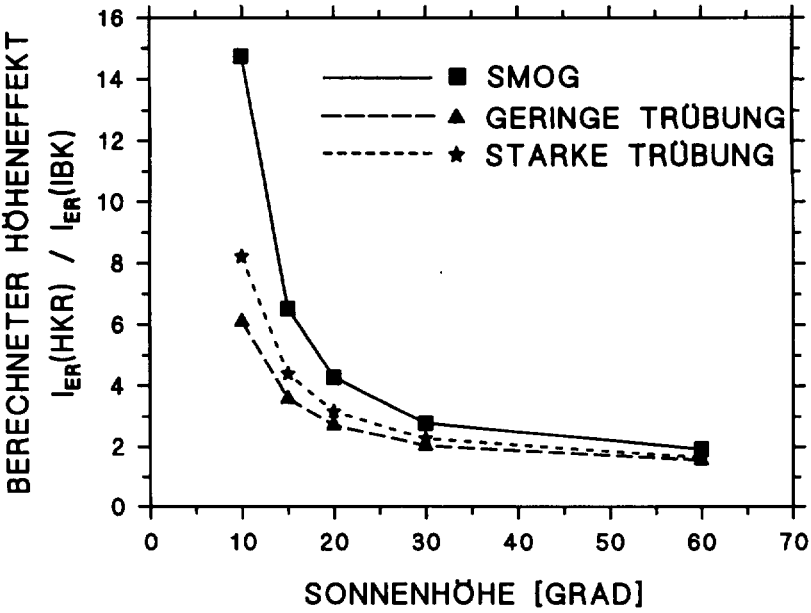

Abb. 4: Berechneter Höheneffekt der erythemwirksamen direkten Strahlung als Quotient der Intensitäten an der Bergstation Hafelekar (HKR, 2300 m ü. d. M.) und der Talstation in Innsbruck (IBK, 577 m ü. d. M.) in Abhängigkeit der Sonnenhöhe für drei verschiedene Trübungssituationen für wolkenlose Tage. Modellparameter siehe Tab. 1.

6. Schlußbemerkungen:

Für den Höheneffekt der solaren UV-Strahlung kann auch bei wolkenlosem Himmel kein einheitlicher Wert angegeben werden, weil er von der Wellenlänge, der Sonnenhöhe und der atmosphärischen Trübung abhängt. Für die direkte Strahlung ist der Höheneffekt bedeutend größer als für die globale Strahlung, was hauptsächlich auf die Transformation von direkter Strahlung in diffuse Strahlung durch Streuung in der Luftschicht zwischen Berg- und Talstation zustande kommt.

Für die UV-Belastung von Personen ist auch die rasch wechselnde Orientierung von bestrahlten Körperoberflächen zur Sonne von Bedeutung. Der Höheneffekt der globalen Strahlung ist für die Belastung entscheidender als der Höheneffekt der direkten Strahlung, weil die diffuse Strahlung, selbst bei wolkenlosem Himmel im Hochsommer, einen wesentlichen Beitrag zur UV-Belastung liefert. Bei wolkenlosem Himmel im Hochsommer beträgt der diffuse Anteil an der erythemwirksamen globalen Strahlung etwa 35 % (BLUMTHALER & AMBACH 1988). Im Gegensatz dazu beträgt dieser Anteil für die globale totale Strahlung 8 %. Außerdem ist zu bedenken, daß in aktuellen Situationen Berg- und Talstation verschiedene Bewölkungssituationen aufweisen können, wodurch der Höheneffekt wesentlich gestört wird.

D a n k : Der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wird für die finanzielle Unterstützung des Projektes "Spektrale Messungen der solaren UVA- und UVB-Strahlung im Hochgebirge" und Mag. M. Huber für die Mitarbeit gedankt. Das Spektrometer wurde aus Mitteln des Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung angeschafft.

©Naturwiss. med. Ver. Innsbruck, download unter www.biologiezentrum.at

7. Zusammenfassung:

Es wurden Spektren der globalen und der direkten UV-Strahlung an zwei Stationen in Tirol (Innsbruck, 577 m, Hafelekar, 2300 m) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe bei wolkenlosem Himmel gemessen. Der Höheneffekt ist für die direkte Strahlung bedeutend größer als für die globale Strahlung. Für den Höheneffekt der direkten Strahlung zeigt sich ein starker Anstieg mit kürzerer Wellenlänge, für die globale Strahlung ein schwacher Anstieg. Mit einem Strahlungstransfer-Modell wurden Spektren der direkten UV-Strahlung für verschiedene Sonnenhöhen für verschiedene atmosphärische Bedingungen berechnet. Durch Wichtung dieser Spektren mit dem Erythemwirkungsspektrum wurde die erythemwirksame Strahlung erhalten. Während sich für die erythemwirksame direkte Strahlung für größere Sonnenhöhen ein Höheneffekt von ca. 58 % pro 1000 m ergibt, ist der Höheneffekt der erythemwirksamen globalen Strahlung ca. 18 % pro 1000 m.

8. Anhang:

Globale Strahlung: diffuse und direkte Strahlung auf die Horizontale
Diffuse Strahlung: Himmelsstrahlung allein
Direkte Strahlung: Sonnenstrahlung allein
Totale Strahlung: Bereich 0.3—3.0 μm
Erythemwirksame Strahlung: Wichtung des Spektrums mit dem Wirkungsspektrum des humanen Erythems.

9. Literatur:

ANSELM, Ch. (1993): Spektrale Messungen des Höheneffektes der solaren UV-Strahlung im Raum Innsbruck und Entwicklung eines Strahlungsmodelles für den direkten Strahlungsstrom. — Diplomarbeit an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Univ. Innsbruck.

BERGER, D.S. (1976): The sunburning ultraviolet meter: Design and performance. — Photochem. Photobiol. **24:** 587 - 593.

BLUMTHALER, M. & W. AMBACH (1988): Human solar ultraviolet radiant exposure in high mountains. — Atm. Env. **22:** 749 - 753.

BLUMTHALER, M., W. AMBACH & W. REHWALD (1992): Solar UV-A and UV-B radiation fluxes at two Alpine stations at different altitudes. — Theor. Appl. Climatol. **46:** 39 - 44.

DIRMHIRN, I., C.R. SREEDHARAN & G. VENUGOPAL (1993): Spectral ultraviolet radiation instrument and preliminary measurements in mountainous terrain. — Theor. Appl. Climatol. **46:** 219 - 228.

FINNLAYSON-PITTS, B.J. & J.N. PITTS (1986): Atmospheric chemistry. fundamentals and experimental techniques. — John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.

HUBER, M., M. BLUMTHALER & W. AMBACH (1992): Solar UV-spectra in various environmental conditions. — XXIInd International Conference on Alpine Meteorology, 7.—11. September 1992, Toulouse, Tagungsband CIMA **92:** 413 - 415.

MCKINLAY, A.F. & B.L. DIFFEY (1987): A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. — Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) — Journal **6:** 17 - 22.

REITER, R. K. MÜNZERT & R. SLADKOVIC (1982): Results of 5-year concurrent recordings of global, diffuse, and UV-radiation at three levels (700, 1800, and 2999 m a.s.l.) in the Northern Alps. — Arch. Met. Geoph. Biocl. Ser. B, **30:** 1 - 28.

VANHOOSIER, M.E., J.-D.F. BARTOE, G.E. BRUECKNER & D.K. PRINZ (1988): Absolute Solar Spectral Irradiance 120 nm—400 nm (Results from the Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor — SUSIM-Experiment on Board Spacelab 2). — Astro. Lett. and Communications **27:** 163 - 168.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck

Jahr/Year: 1994

Band/Volume: 81

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

Artikel/Article: Spektrale Messungen des Höheneffektes der solaren UV-Strahlung im Raum Innsbruck. 7-14