UV-Index: Operationelle Prognose der solaren, biologisch-effektiven Ultraviolett-Strahlung in Österreich

Schauberger G., Schmalwieser A. W., Rubel F., Wang Y., Keck G.
Institut für Medizinische Physik, Veterinärmedizinische Universität Wien

Zusammenfassung

Seit Oktober 1995 wird in Österreich täglich eine Prognose des UV-Index für die drei Modelldomänen Österreich, Europa und weltweit, geltend für den darauf folgenden Tag, erstellt. Das verwendete Modell für den operationellen Betrieb sowie die hierfür notwendigen Eingangsparameter werden beschrieben. Eine Evaluierung des Prognosemodells und der aktuelle Stand der UV-Prognose in anderen Ländern wird angeführt. Durch Verknüpfung des UV-Index mit der täglich zu erwartenden UV-Dosis wird eine Empfehlung für den jeweils zu wählenden Lichtschutzfaktor eines Sonnenschutzmittels, aufgeschlüsselt nach den photobiologischen Haupttypen, gegeben. Die Eigeninitiative des Benutzers des UV-Index wird gefordert, indem er die jeweilige Bewölkungssituation abschätzen muß, um den vor Ort geltenden UV-Index auszuwählen.

Summary

Since October 1995 a daily forecast of the UV index for the following day is published for Austria, Europe and the Earth. The model as well as the input parameters are described. The evaluation of the model and the methods of the UV forecast in some other countries are discussed. By connecting the UV index with the sensitivity of the photobiological skin types, a recommendation is given to select a sun protection factor of a sunscreen to avoid overexposure of the skin. The user has to select, on his own initiative, the adequate value of the UV index for his site by paying attention to the attenuation of the UV intensity by cloud cover.

Keywords: Sonne, ultraviolette Strahlung, UV-Index, Lichtschutzfaktor, Prognose

Einleitung

Die solare Strahlung ist die dominierende Ursache für die Exposition der Bevölkerung mit ultravioletter Strahlung (UV). Für Österreich konnten Keck et al. [15] zeigen, daß etwa 50 % der UV-Exposition berufsbedingt sind, 36 % werden durch Freizeit- und 13 % durch Urlaubsaktivitäten im Freien verursacht. Da die UV-Exposition der Haut sehr stark vom Verhalten des Menschen abhängt und daher vielfach vermieden werden kann, sind Information und Aufklärung wesentliche Strahlenschutzmaßnahmen (z. B. „Sonne – plus – minus", [16]). Einer Prognose der biologisch-effektiven UV-Strahlung kommt daher besondere Bedeutung zu. Sie ermöglicht der Bevölkerung, das persönliche Verhalten auf die zu erwartende UV-Intensität abzustimmen. Dies kann als Beitrag für die Gesundheitsvorsorge, vor allem in Hinblick auf eine Reduktion des Auftretens von Hautkrebs, gesehen werden.

In mehreren Ländern werden daher operationelle Methoden für die Vorhersage des UV-Intensität in Form eines „UV-Index" (UVI) erarbeitet. Er ist eine dimensionslose Maßzahl, die proportional zur biologisch-effektiven Bestrahlungsstärke (W/m^2) der solaren UV-Strahlung ist. Durch die Wahl der spektralen biologischen Wirkungsfunktion ist die akute UV-Wirkung des Erythems [7] die relevante Größe. Ihr Zusammenhang mit Hautkrebs wird als gesichert angenommen [24]. Anläßlich einer WMO Tagung (Les Diablerets, Schweiz, 1994) wurde festgelegt: „A standard UV index should be based on: (1) Utilization of the McKinley-Diffey action spectrum normalized to 1 at 297 nm; (2) As a minimum requirement to report irradiance values at local solar noon; (3) The UV index is expressed by multiplying the erythemal effective irradiance in W/m^2 by 40 [14].

Material und Methode

Prognosemodell

Das österreichische Prognosemodell liefert für 16 diskrete Wellenlängen zwischen 297,5 und 380 nm die spektrale Bestrahlungsstärke (engl.: spectral irradiance [26]). Das Modell berücksichtigt die Sonnenhöhe, die Seehöhe sowie den Ozongehalt der Atmosphäre. Die von Bener [3] über lange Jahre durchgeführten spektralen Messungen bilden die Grundlage für das Modell (Davos, 46°48'N, 9°49'E, Seehöhe: 1590 m). Diffey [8] hat durch das Anpassen von Funktionen bzw. durch Interpolationsverfahren an den tabellierten Meßwerten ein parametrisiertes Modell entwickelt. Dieses liefert für die 16 Stützstellen die spektrale Bestrahlungsstärke der Gesamtstrahlung als Summe der diffusen und der direkten Strahlung. Die spektrale Bestrahlungsstärke [26] wird mit der spektralen Wirkungsfunktion des Erythems [7] gewichtet, um die biologisch-effektive Bestrahlungsstärke zu erhalten. Durch Multiplikation ihres Zahlenwertes in W/m^2 mit 40, d. h. durch Normierung auf 0,025 W/m^2, erhält man den UV-Index.

Die Sonnenhöhe ergibt sich aus der Tages- bzw. der Jahreszeit und den geographischen Koordinaten.

Die Orographie liegt weltweit mit einer Auflösung von 1.0° geographischer Länge und 0.5° geographischer Breite vor. Für Österreich wird das Modell in einer höheren Auflösung betrieben. Das Gitter hat eine Maschenweite von 1/32° x 1/24°, was einem Gitterabstand von 3 km entspricht. Der Einfluß der Seehöhe H (m) auf die UV-Bestrahlungsstärke ist durch einen Korrekturfaktor c_{SH} berücksichtigt:

$$c_{SH} = 0.16\ (H/1000)$$

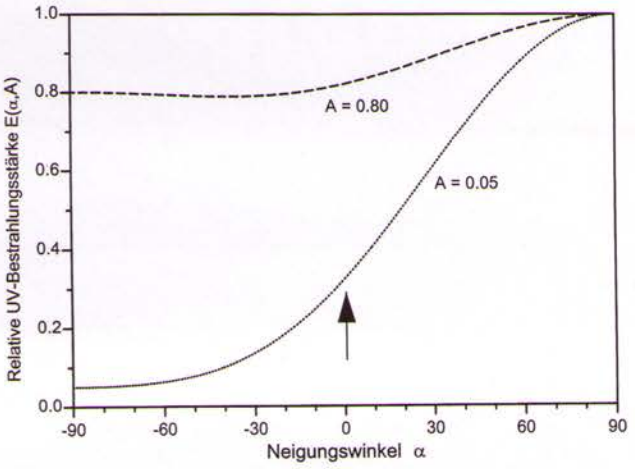

Abbildung 1 Einfluß des Neigungswinkels α der Empfangsfläche auf die relative Bestrahlungsstärke der UV-Globalstrahlung, bezogen auf die Bestrahlungsstärke der horizontalen Empfangsfläche, für schneebedeckten (A = 0.80) und schneefreien Boden (A = 0.05) [19]. Der Pfeil kennzeichnet eine vertikale Empfangsfläche.

Der Ozongehalt der Stratosphäre, als dritter Eingangsparameter, ist zeitlich und räumlich variabel. Daher sind sowohl Messungen des Ozongehaltes durch Satelliten als auch Modelle zur Prognose des Ozongehalts für die Prognosegüte des UV-Index von großer Bedeutung. Derzeit stehen ausschließlich Ozonwerte zur Verfügung, die aus TOVS-Messungen (TIROS Operational Vertical Sounder) des NOAA-14 Satelliten abgeleitet werden. Unter der Annahme der Persistenz werden die Ozondaten auf den Prognosezeitpunkt extrapoliert. Bei einem Datenausfall wird auf langjährige Mittelwerte der Ozonverteilung zurückgegriffen.

Das Prognosemodell liefert den UV-Index für ausgewählte Orte sowie auf den jeweiligen Gitterpunkten. Diese Feldverteilungen liegen für die österreichische Skala (3 km Gitterdistanz), die Europaskala (100 km) und die globale Skala (500 km) vor. Die globale Skala verläuft für die geographische Breite von – 90 °S bis 90 °N mit einem Gitterabstand von 1°, die geographische Länge (360°) mit einem Gitterabstand von 1° (181 x 360 Gitterpunkte). Die Europaskala deckt einen Bereich von 24°N bis 73°N und von 21°W bis 61°E ab, wodurch sich ein Gitter von 83 x 50 ergibt. Die Österreichskala hat eine Auflösung von jeweils 0.1° für die geographische Breite und Länge. Der Ausschnitt liegt zwischen 46.4°N und 49.0°N sowie 9.5°E und 17.1°E, wodurch sich ein Gitter von 27 x 77 ergibt.

Modellevaluierung

Zur Evaluierung des Prognosemodells des UV-Index werden Meßwerte der biologisch-effektiven solaren UV-Strahlung herangezogen, die mit Robertson-Berger Meßgeräten [4] kontinuierlich erfaßt wurden. Die spektrale Empfindlichkeit dieser Geräte entspricht etwa der der menschlichen Haut für die akute Wirkung des Erythems [7]. Solche Meßgeräte sind in Meßnetzen weltweit in Verwendung. Die Meßstation wird vom Institut für Medizinische Physik gemeinsam mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik seit dem Frühjahr 1995 betrieben. Seit 1996 ist auf dem neuen Standort der Veterinärmedizinischen Universität Wien (48° 15,47'N; 16° 25,98'E; Seehöhe: 153 m) eine weitere Meßstelle eingerichtet. Für die vorliegende Evaluierung wurden die Messungen zwischen März und Juli 1995 herangezogen.

Empfohlener Lichtschutzfaktor

Für die Abgabe einer Empfehlung für die Verwendung eines Sonnenschutzmittels ist der Übergang von der horizontalen Empfangsfläche auf eine geneigte Empfangsfläche notwendig. Die Bedeutung des UV-Reflexionsvermögens (UV-Albedo) für die Bestrahlungsstärke auf geneigte Flächen ist aus Abb. 1 ersichtlich [19]. Die Gegenüberstellung der relativen Bestrahlungsstärke über einem schneebedeckten Boden (UV-Albedo A = 0.80) und einem schnee-

freien Boden (A = 0.05) zeigt, daß mit kleiner werdendem Neigungswinkel die Differenz, die sich aus dem Einfluß der UV-Albedo ergibt, zunimmt. Die strichlierte Linie gibt den Faktor an, um den die UV-Belastung auf schneebedecktem Boden (z. B. beim Schifahren) gegenüber schneefreiem zunimmt. Detaillierte Angaben über das Reflexionsverhalten verschiedener Bodenbedeckungen für die UV-Strahlung sind bei Ambach und Eisner [1], Blumthaler und Ambach [5] sowie Schauberger [19] zu finden.

Internationaler Vergleich

In einer Erhebung (Frühjahr 1996) wurde der Status quo der operationellen UV-Prognose in allen jenen Ländern erhoben, in denen vorwiegend Menschen mit einem photobiologischen Hauttyp I bis IV leben [13].

Ergebnisse

Derzeit wird der UV-Index täglich für den darauf folgenden Tag berechnet und in Form von Tabellen und Graphiken den Massenmedien angeboten. Beispielhaft ist in Abb. 2 die Verteilung des UV-Index für Europa für den 10. Juli 1996 dargestellt. In der Graphik wird für vier Bewölkungsklassen (Symbole für wolkenlos, bewölkt, stark bewölkt und bedeckt) ein Zuordnungstabelle zwischen Farbe und UV-Index gegeben. Die Prognosedaten werden derzeit über den Teletext des ORF (ORF 1, Seite 669), als Bestandteil der Wettervorhersage in Radio und Fernsehen des ORF sowie

Tabelle 1 UV-Index für ausgewählte Orte. 24stündige Prognose für den 10. Juli 1996

	UV-Index	
	wolkenlos	bedeckt
Bagdad	11.5	5.7
Buenos Aires	2.6	1.3
Caracas	12.3	6.1
Kairo	11.5	5.7
Kapstadt	3.1	1.5
Los Angeles	11.6	5.8
Nairobi	12.9	6.4
Neu Dehli	12.2	6.1
New York	9.3	4.6
Peking	10.3	5.1
Rio de Janeiro	6.4	3.2
Sydney	2.9	1.4
Tokyo	10.4	5.2
Wien	8.4	4.2

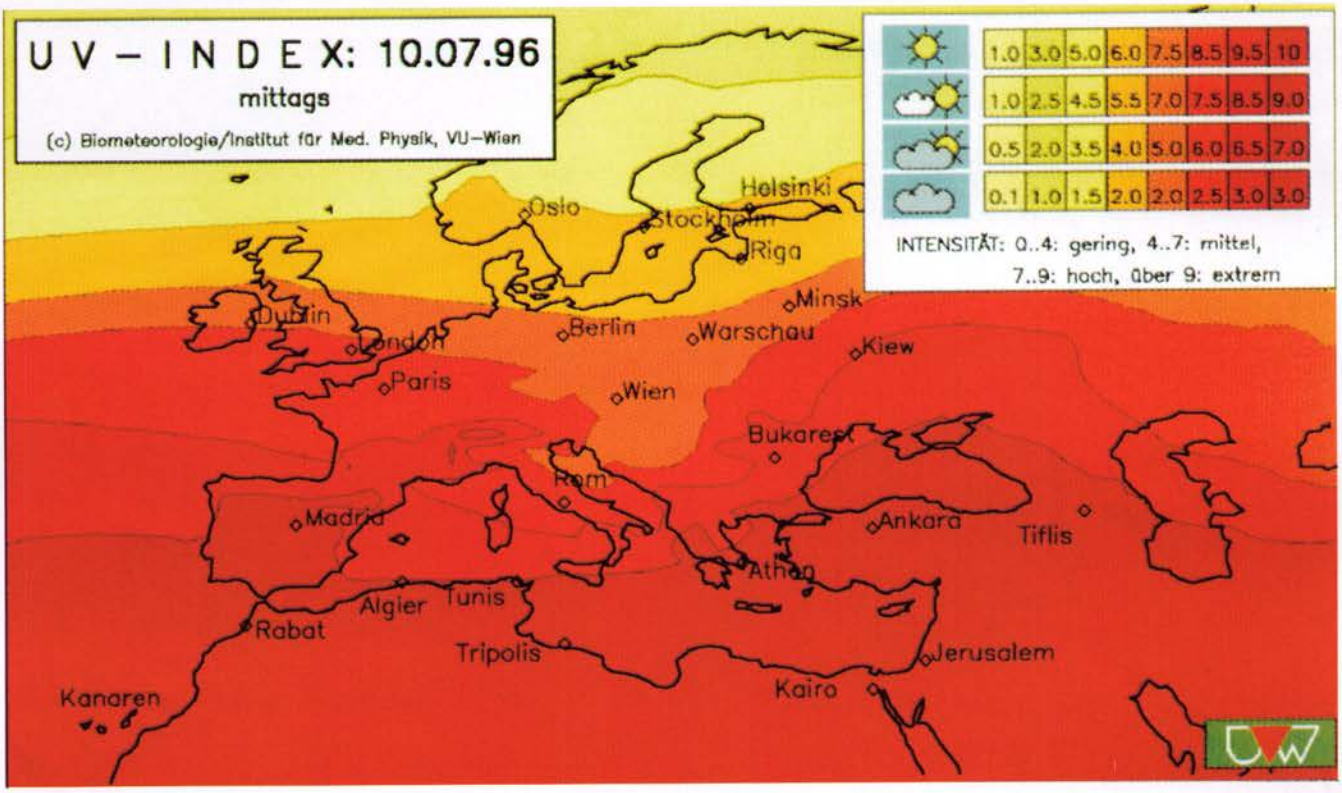

Abbildung 2 Verteilung des UV-Index am 10. Juli 1996 über Europa. (24stündige Prognose)

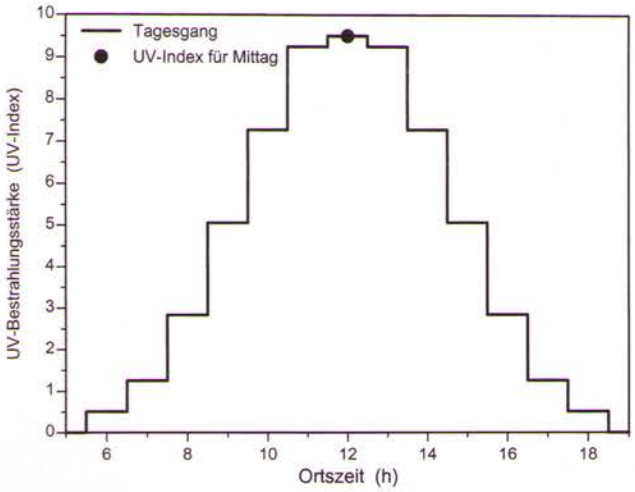

Abbildung 3 Tagesgang der UV-Bestrahlungsstärke (angegeben in UV-Index-Stufen) zur Bestimmung der täglichen UV-Dosis auf eine horizontale Fläche, berechnet aus dem prognostizierten UV-Index für 9. Juli 1996. Aus der Äquivalenz zwischen UV-Index und der Bestrahlungsstärke in MED/h (Minimale Erythemdosis) ergibt sich eine tägliche UV-Dosis von 22.2 MED auf eine horizontale Empfangsfläche. Der empfohlener Lichtschutzfaktor LSF für Hauttyp II ist daher 8.

Tabelle 2 Relative Empfindlichkeit der photobiologischen Hauttypen nach Greiter [13, 9] bezogen auf Hauttyp II

Hauttyp	Relative Empfindlichkeit
I	1.25
II	1.00
III	0.71
IV	0.56

Tabelle 3 Empfohlener Lichtschutzfaktor bei einem ganz tägigen Aufenthalt im Freien berechnet am Beispiel für Juli in Mitteleuropa unter der Annahme, daß die tägliche UV-Bestrahlung (UV-Dosis) für vertikale Flächen 3 MED nicht überschreitet.

Juli 48 °N UV-Index	Empfohlener Lichtschutzfaktor* für Hauttyp			
	I	II	III	IV
bis 2.0	3	2	2	1
2.0 bis 3.9	7	5	3	3
4.0 bis 6.9	12	8	6	4
7.0 bis 8.9	15	10	7	6
über 9.0	19	13	9	7

* Über schneebedecktem Boden sind die Werte des Lichtschutzfaktors zu verdoppeln.

über den WWW-Server der Veterinärmedizinischen Universität Wien (http://www-med-physik.vu-wien.ac.at) angeboten. Weiters können die Prognoseprodukte via Email, einen Mehrwert-Telephondienst (Österreich und Europa: 0450 199 156 655; Fernreiseziele: 0450 199 156 656) und Fax (0459 199 162 655) übermittelt bzw. abgerufen werden.

Neben der maximalen UV-Bestrahlungsstärke zur Mittagszeit (UV-Index) ist vor allem die tägliche UV-Dosis für die UV-Exposition des Menschen von Bedeutung. Die UV-Dosis eines Tages läßt sich aus dem Tagesgang der UV-Bestrahlungsstärke berechnen (Abb. 3). Diese Werte entsprechen der UV-Dosis auf eine horizontal orientierte Empfangsfläche. Da die relevanten Empfangsflächen jedoch vorwiegend vertikal orientiert sind, und auf solchen Flächen eine um etwa 2/3 reduzierte Bestrahlungsstärke im Vergleich zur Horizontalen gemessen wird, wird anhand dieses Reduktionsfaktors die Hautdosis abgeschätzt [19, 20, 21]. Unter der Annahme, daß die UV-Exposition bei einem ganztägigen Aufenthalt in der solaren Strahlung etwa 3 MED auf eine horizontale Empfangsfläche bzw. etwa 1 MED auf eine vertikale Empfangsfläche nicht überschreiten soll, wird unter Berücksichtigung der individuellen photobiologischen Empfindlichkeit (Tab. 2) der dafür notwendige Lichtschutzfaktor berechnet. Der Anwender kann anhand des prognostizierten UV-Index aus dieser Tabelle ein Sonnenschutzmittel mit entsprechendem Lichtschutzfaktor (für einen ganztägigen Aufenthalt im Freien) auswählen. Der Hinweis in Tab. 3, daß über schneebedeckten Boden der Lichtschutzfaktor zu verdoppeln ist, ergibt sich aus dem starken Reflexionsvermögen von Schnee für UV-Strahlung sowie dessen Einfluß auf geneigte Flächen (Abb. 1).

Modellevaluierung

Bei der Modellevaluierung muß zwischen zwei Arten von Fehlern unterschieden werden. Der Fehler erster Art ist durch das gewählte Strahlungsmodell bedingt. Dieser Modellfehler wurde für verschiedene Modelle bereits von einigen Autoren untersucht (z. B. [25]). Der Fehler zweiter Art wird durch die mangelnde Güte der Eingangsparameter verursacht. Im vorliegenden Modell ist der Ozongehalt der Atmosphäre, der für den Prognosezeitpunkt bekannt sein muß, die relevante Größe.

Für die Beurteilung des Fehlers erster Art wird, um den Einfluß der Ozonprognose zu eliminieren, der UV-Index mit dem aktuellen Wert des Ozongehalts für den Prognosezeitpunkt berechnet und mit dem Meßwert verglichen. In Abb. 4 a ist eine Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen dem hierdurch prognostizierten und dem gemessenen UV-Index dargestellt. Dabei wird angenommen, daß die spektrale Empfindlichkeit des Meßgeräts der der Haut (Erythem) entspricht. In Abb. 4 b ist hingegen der tatsäch-

liche Prognosefehler dargestellt, der sich sowohl aus dem Modellfehler (Abb. 4 a) als auch aus dem Prognosefehler des Ozongehalts ergibt.

Für die Abschätzung des Prognosefehlers des Ozongehalts der Atmosphäre wurde für den Standort von Wien der mittlere relative Fehler für die Persistenzannahme bis zu einem Zeitraum von 7 Tagen bestimmt (Tab. 4). Die Ergebnisse zeigen, daß die Persistenzannahme auch für einen Zeitraum bis zu 7 Tagen einen Prognosefehler für den Ozongehalt liefert, der unter 10 % liegt.

Weiters wurde die Güte der Prognose in einer Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit des österreichischen Modells mit dem niederländischen Modell [17] und dem kanadischen Modell [6] geprüft. Diese beiden Modelle sind statistische Modelle mit den zwei Eingangsparametern „Ozongehalt" und „Sonnenhöhe". In Abb. 5 sind die Häufigkeitsverteilungen für den Fehler der ersten Art (Fehler des Strahlungsmodells) für das niederländische (Abb. 5 a) und das kanadische Modell (Abb. 5 b) dargestellt.

Internationaler Vergleich

Das Ergebnis einer Erhebung (Stand: Frühjahr 1996) über die UV-Prognose ist im folgenden stichwortartig zusammengefaßt, wobei nur jene Ländern aufgeführt sind, die an der Erhebung teilgenommen haben:

Belgien: In Belgien erfolgt keine UV-Prognose. Ozonmessungen werden mit einem Brewer Spektralphotometer durchgeführt; **Deutschland**: Die UV-Prognose erfolgt mit einem Strahlungstransfermodell (Die Ozonprognose wird über ein 5schichtiges statistisches Modell der Temperaturverteilung (700, 500, 200, 100, 50 hPa) vorhergesagt. Die UV-Prognosedaten werden über die Massenmedien bundesweit und regional aufbereitet publiziert [10]; **Großbritannien**: Die UV-Prognose basiert auf dem kanadischen Modell. Der Ozongehalt der Atmosphäre wird über ein statistisches Modell berechnet. Die Parameter des Modells sind: Höhendifferenz zwischen dem 100 hPa- und 250 hPa-Niveau und die Temperaturen im 150 hPa- und 30 hPa-Niveau. Wieweit eine Veröffentlichung der UV-Prognose erfolgt, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden; **Irland:** Der operationelle Betrieb sollte im Sommer 1996 beginnen. Die Berechnung basiert auf dem kanadischen Modell. Die Prognosewerte sollen über die Massenmedien verbreitet werden; **Italien:** Keine UV-Prognose; **Kanada:** Das Modell für die UV-Prognose [6] ist ein statistisches Modell, in das die

Tabelle 4 Mittlerer relativer Fehler der Ozonprognose $O_{3,mod}$ unter der Annahme der Persistenz für einen Zeitraum von 7 Tagen (Ozonmeßdaten $O_{3,mess}$ Sonnblick, Februar bis Juli 1995; Quelle: BM für Umwelt, Universität für Bodenkultur)

Prognosezeitraum	Mittlerer relativer Fehler $(O_{3,mess} - O_{3,mod}) / O_{3,mess}$
1	0.059
2	0.070
3	0.082
4	0.086
5	0.087
6	0.085
7	0.086

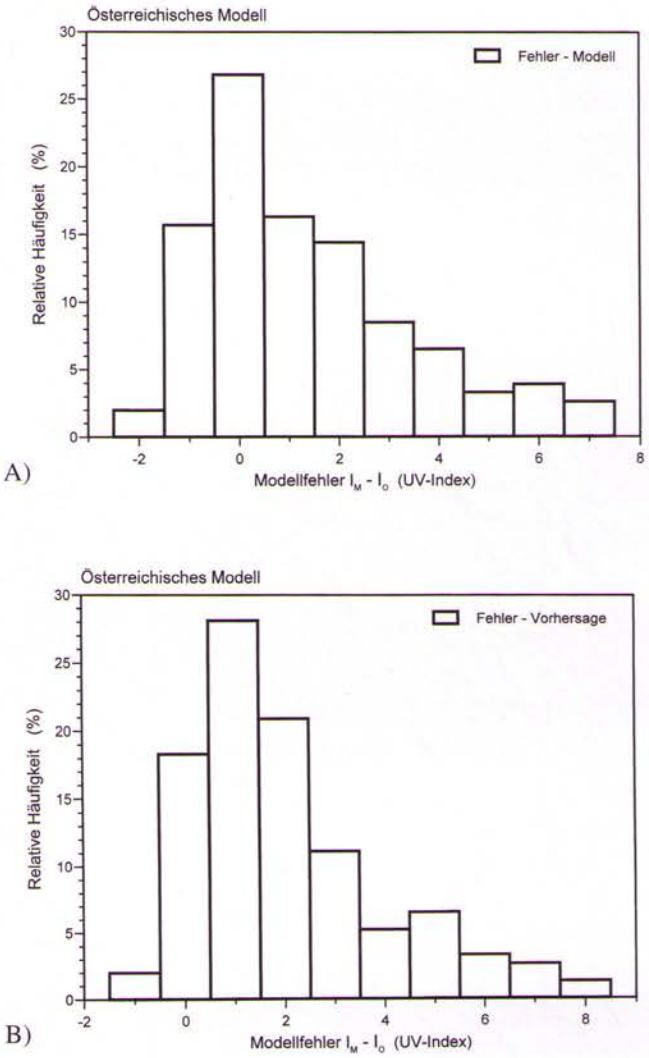

Abbildung 4 Relative Häufigkeitsverteilung (%) des Fehlers als Differenz zwischen dem prognostizierten UV-Index I_M und dem gemessenen UV-Index I_O. (A): Fehler der ersten Art (Fehler des Strahlungsmodells), (B): Gemeinsamer Fehler der ersten und zweiten Art (Prognosefehler), angegeben in UV-Indexstufen für den Zeitraum zwischen März und Juli 1995 für die Station Wien Hohe-Warte.

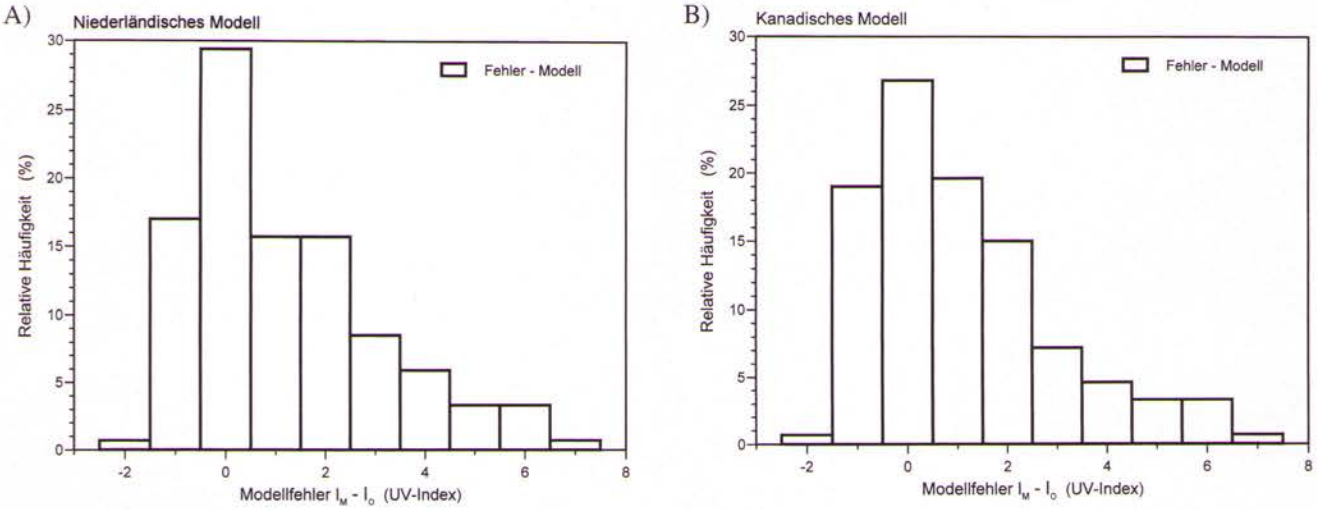

Abbildung 5 Relative Häufigkeitsverteilung (%) des Modellfehlers der ersten Art (Fehler des Strahlungsmodells) des niederländischen Modells (A) [6] und des kanadischen Modells (B) [17] als Differenz zwischen dem prognostizierten UV-Index I_M und dem gemessenen UV-Index I_O, angegeben in Indexstufen für den Zeitraum zwischen März und Juli 1995 für die Station Wien Hohe-Warte.

Ozonkonzentration und der Zenitwinkel der Sonne eingeht. Die Ozonprognose basiert auf einem statistischen Modell, in das die Temperaturen der Troposphäre und Stratosphäre bis zum 100 hPa-Niveau eingehen. In Kanada wird der UV-Index für wolkenlosen Himmel berechnet; **Niederlande:** Das niederländische Modell [17] entspricht in der Struktur dem kanadischen Modell. Die Ozonprognose basiert auf einem Regressionsansatz mit der potentiellen Vorticity als Eingangsparameter. Die UV-Prognose wird als Bestandteil der Wettervorhersage veröffentlicht; **Norwegen**: Keine UV-Prognose; **Schweden**: Die UV-Prognose basiert auf dem kanadischen Modell. Der Ozongehalt wird aus dem Ozongehalt der Atmosphäre des vorangegangenen Tages sowie der prognostizierten Temperaturverteilung in der unteren Stratosphäre für den nächsten Tag berechnet. Die UV-Prognosewerte werden per Email und Fax den interessierten Massenmedien zur Verfügung gestellt; **Schweiz**: Die UV-Prognose erfolgt mit einem statistischen Modell über den Ozongehalt der Atmosphäre und astronomische Parameter (Sonnenhöhe). Der Ozongehalt wird über einen Regressionsansatz aus der Temperatur im 100 und 700 hPa-Niveau und der potentiellen Vorticity berechnet. In Zukunft ist geplant, das Höhenprofil der Ozonkonzentration zu bestimmen und ein Strahlungstransfermodell zu verwenden. Die Prognosedaten werden über den Rundfunk, Teletext, Zeitungen, Telephon und Fax angeboten; **Slowenien:** Messung der solaren UVB-Strahlung, keine UV-Prognose; **Südafrika**: In Südafrika wird an einigen Stationen die biologisch-effektive UV-Strahlung gemessen. Diese Werte werden über die Massenmedien publiziert. Ein einfaches Modell zur UV-Prognose wird angewendet, bei dem unter der Annahme der Persistenz der gleiche Wert der solaren UV-Strahlung für den nächsten Tag angegeben wird. Dabei wird der Ozongehalt der Atmosphäre nicht berücksichtigt; **Ungarn**: UV-Prognose basiert auf dem kanadischen Modell. Die Ozonprognose wird anhand der zeitlichen Temperaturänderung in der Troposphäre und der Stratosphäre berechnet. Die 24stündige Prognose erfolgt für wolkenlosen und bewölkten Himmel. Folgende Angaben werden publiziert: UV-Index, mittlere Zeit für den Sonnenbrand, empfohlenen Schutzmaßnahmen. diese Angaben werden über den Rundfunk (Themenbereich: Umweltschutz, und Medizin, Wettervorhersage), per Teletext und durch Telephondienste verbreitet; **USA**: Die Prognose der UV-Strahlung erfolgt mit einem Strahlungstransfermodell [11]; Da der Rechenaufwand für dieses Modell sehr hoch ist, wird aus einer Bibliothek von Datensätzen ein entsprechender Fall anhand folgender Parameter ausgewählt. Ozongehalt, geographische Breite und Tag des Jahres. Der Ozongehalt der Atmosphäre für den nächsten Tag (24-stündige Prognose) wird mit einem Regressionsansatz mit der geopotentiellen Höhe der 500 hPa- und 100 hPa-Fläche sowie der Temperatur im 50 hPa-Niveau als Eingangsparameter berechnet.

Diskussion

Strahlungsmodelle

Die Modelle zur Berechnung der solaren UV-Strahlung können in drei Gruppen eingeteilt werden, wobei die Unterscheidungskriterien die jeweilige Modellstruktur, die Zahl der notwendigen Eingangsparameter sowie die dadurch bedingte Komplexität der Modelle sind.

Statistische Modelle: Diese Modelle basieren auf Regressionsansätzen mit wenigen Eingangsparametern. In diese Kategorien fallen das niederländische Modell [17] und das kanadische Modell [6]. Beide Modelle verwenden die Sonnenhöhe und den Ozongehalt der Atmosphäre als Prädiktoren. Die Modelle berechnen die biologisch-effektive UV-Bestrahlungsstärke für wolkenlosen Himmel. Die Datengrundlage stellt eine UV-Messung mit spektral-integrierenden Geräten dar. Obwohl für diese Modelle angegeben wird, daß die biologische Wirkungsfunktion die Erythemwirkung [7] ist, muß darauf hingewiesen werden, daß diese Modelle nur die spektrale Empfindlichkeit der Meßgeräte widerspiegeln können.

Physikalische Modelle mit parametrisierten Modellansätzen: Im Gegensatz zu den empirischen Modellen, bei denen die Strahlung spektral-integrierend berechnet wird, erfolgt hier die Berechnung für einzelne Wellenlängen. Die Modelle liefern daher die spektrale Bestrahlungsstärke an diesen Stützstellen. Dadurch besteht die Möglichkeit, auch andere Wirkungsfunktionen als die des Erythems [7] zu berücksichtigen. Deshalb können diese Modelle universeller eingesetzt werden. Beispiele für diesen Modellansatz sind das Modell von Green [12, 22] bzw. von Diffey [8]; letzteres wird für die operationelle Prognose der UV-Index in Österreich verwendet. Obwohl die Datengrundlagen der Modelle von Green und Diffey aus den 60er Jahren stammen, existieren derzeit keine vergleichbaren spektralen Messungen in diesem Umfang aus jüngerer Zeit.

Physikalische Modelle: Bei diesen sogenannten Strahlungstransfermodellen handelt es sich zumeist um strukturtreue Modellansätze, die die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre möglichst vollständig zu beschreiben versuchen. Für diese Säulenmodelle sind eine Vielzahl von Eingangsparametern erforderlich (z. B. die vertikale Verteilung der Temperatur, des Ozongehalts, des Aerosolgehalts usw.). Ein Beispiel dafür ist das Modell von Stamnes et al. [23]. Neben dem hohen Informationsbedarf über den Zustand der Atmosphäre ist auch die notwendige Rechenzeit ein limitierender Faktor für die Anwendung dieser Modelle. Für die perationelle Prognose des UV-Index wird daher meist auf einfachere Modelle zurückgegriffen.

Prognosegüte

Allgemein gilt ein Modell als gut justiert, wenn die Modellfehler symmetrisch verteilt sind, und zudem die größten Häufigkeiten für die Klasse mit den kleinsten Fehlern ermittelt werden. Im Fall des hier vorgestellten UV-Index gilt das nicht, da er für wolkenlosen Himmel gerechnet wurde. Der UV-Index gibt demnach die maximal mögliche UV-Strahlung an der Erdoberfläche an. Dadurch sollte die Prognose des UV-Index eine einhüllende Kurve für die Meßwerte der UV-Intensität darstellen.

Das Modell ist also genau dann als mangelhaft zu bewerten, wenn der beobachtete UV-Index größer ist als der prognostizierte. Abbildung 4 a zeigt, daß dies in etwa 2 % aller Fälle eintritt. Die Fehlerhäufigkeiten für positive Differenzen (prognostizierte Werte sind größer als Meßwerte) sind, wie schon erwähnt, auf die vom Modell derzeit nicht berücksichtigte Extinktion der UV-Strahlung durch die Bewölkung zurückzuführen. Dadurch entspricht der prognostizierte Wert (ohne Bewölkung) nicht unmittelbar den Meßwerten der solaren UV-Strahlung, da auch bewölkte Tage für die Modellevaluierung herangezogen wurden.

Der Einfluß des Fehlers der Ozonprognose auf die Prognosegüte des UV-Index läßt sich aufgrund des mittleren relativen Fehlers der Ozonprognose abschätzen. Weiters muß die Sensibilität der UV-Intensität in Abhängigkeit vom Ozongehalt der Atmosphäre bekannt sein. Diese wird durch den Radiation Amplification Factor RAF beschrieben. Er gibt die prozentuelle Änderung der biologisch-effektiven UV-Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der prozentuellen Änderung des Ozongehalts der Atmosphäre an und liegt bei etwa 1,0 [18]. Daraus ergibt sich, daß der mittlere Fehler der zweiten Art (Fehler, der sich aus der Prognose des Ozongehalts der Atmosphäre ergibt) etwa dem des mittleren relativen Fehlers der Ozonprognose entspricht (Tab. 4). Der Fehler, der sich durch die Schwankung des Ozongehalts von Tag zu Tag ergibt, wurde nicht getrennt analysiert.

Anhand des Modellfehlers (Fehler erster Art) erfolgte ein Vergleich des österreichischen Modells (Abb. 4 a) mit den beiden statistischen Modellen aus den Niederlanden ([17]; Abb. 5 a) und Kanada ([6]; Abb. 5 b). Die drei Häufigkeitsverteilungen zeigen, daß das österreichische Modell so kalibriert wurde, daß die im Strahlenschutz geforderte größtmögliche Sicherheit gewährleistet ist.

In einigen Ländern (z. B. USA, Deutschland) wird der UV-Index nicht für wolkenlosen Himmel berechnet, wie das von der WHO bzw. WMO vorgeschlagen wird, sondern unter Einbeziehung der Bewölkung [2]. Der Nachteil dieser Vorgangsweise liegt einerseits in der großen Unsicherheit der Bewölkungsprognose und andererseits in der unzureichenden Angabe des Bedeckungsgrades zur Berechnung der Extinktion durch Wolken. So zeigt sich, daß in Abhängigkeit von der Schichtdicke der Bewölkung auch bei völlig bedecktem Himmel (8/8 Bedeckungsgrad) die Extinktion nahezu zwischen 0 und 1 schwanken kann [17]. Daher würde die Einbindung der Bewölkungsprognose einen weiteren Fehler der UV-Prognose bedingen. Die Unsicherheit der Bewölkungsprognose würde durch ihren dominierenden Einfluß alle anderen Einflußfaktoren (Ozongehalt, Sonnenhöhe etc.) überdecken und damit zum allein entscheidenden Prädiktor des Prognosemodells werden.

Für das österreichische Prognosemodell wurde ein anderer Weg eingeschlagen. Der UV-Index wird für vier Bewölkungsklassen angegeben. Bei der graphischen Darstellung des UV-Index (Abb. 2) besteht die Möglichkeit durch entsprechende Symbole diese Zuordnung zu erleichtern. Diese Vorgangsweise ermöglicht es dem Anwender die aktuelle Wetterlage in die jeweilige UV-Prognose einzubinden. Dar-

über hinaus ist es wünschenswert, daß der Nutzer des UV-Index durch Beobachtung seiner Bewölkungssituation einen Eigenanteil an Verantwortung übernimmt und nicht blindlings einen am Bildschirm angegebenen Zahlenwert (für wolkenlosen Himmel) anwendet, auch wenn es regnet.

Ausblick

Die UV-Prognose wird in ähnlicher Form bereits von einigen europäischen Wetterdiensten sowie in Kanada und USA durchgeführt. Diese breite internationale Übereinstimmung in der Vorgangsweise erleichtert sicherlich die Akzeptanz des UV-Index durch die Bevölkerung. Eine Koordinierung bei den verwendeten Prognosemodellen sowie bei der Präsentation des UV-Index ist ein Ziel der COST-Aktion 714 „UV-B Forecast" für den europäischen Raum.

Der UV-Index sollte als ein Bestandteil einer Informationskampagne der Bevölkerung angesehen werden, um ein gesundheitsbewußtes Verhalten im Hinblick auf eine solare UV-Strahlung zu erreichen. Diese angestrebte Verhaltensänderung sollte langfristig eine Reduktion der UV-Exposition der Gesamtbevölkerung erzielen. In einem Zeitraum von mehreren Jahrzehnten (Latenzzeit) könnte damit der beobachteten Zunahme der Inzidenz von Hautkrebs entgegengewirkt werden [15].

Danksagung

Diese Projekt wurde durch das österreichische Bundesministerium für Gesundheit und Konsumentenschutz gefördert.

Literatur

[1] Ambach, W.; Eisner, H.: Albedo verschiedener Schneeoberflächen für erythemwirksame solare Strahlung. Wetter und Leben, **38** (1986) 1-4

[2] Austin, J.; Barwell, B. R.; Cox, S. J.; Hughes, P. A.; Knight, J. R.; Ross, G.; Sinclair, P.; Webb, A. R.: The diaognosis and forecast of clear sky ultraviolet levels at the Earth's surface. Met Apps **1** (1994) 321-336

[3] Bener, P.: Approximate values of intensity of natural radiation for different amounts of atmospheric ozone. European Research Office, US Army, London 1972

[4] Berger, D. S.: The sunburning ultraviolet meter: design and performance. Photochem. Photobiol. **24** (1976) 587-593

[5] Blumthaler, M.; Ambach, W.: Solar UVB-albedo of various surfaces. Photochem. Photobiol. **48** (1988) 85-88

[6] Burrows, W. R.; Valeé, M.; Wardis, D. I.; Kerr, J. B.; Wilson, L. J.; Tarasick, D. W.: The Canadian operational procedure for forecastin total ozone and UV radiation. Met Apps **1** (1994) 247-265

[7] CIE: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. CIE Research Note. CIE Journal **6** (1987) 17-22

[8] Diffey, B. L.: The calculation of the spectral distribution of natural ultraviolet radiation under clear day conditions. Phy. Med. Biol. **22** (1977) 309-316

[9] DIN 5050 Teil 1: Solarien und Heimsonnen. Meßverfahren, Typeneinteilung und Kennzeichnung. Beuth, Berlin 1992

[10] Feister, U.: Model calculations and measurements of chemically and biologically effective UV radiation reaching the ground. Deutscher Wetterdienst, Offenbach 1994

[11] Frederick, J. E.; Erlick, C.: Trends in interannual variations in erythemal sunlight, 1978-1993. Photochem. Photobiol. **62** (1995) 476-484

[12] Green, A. E. S.; Cross, K. R.; Smith, L. A.: Improved analytic characterization of ultraviolet skylight. Photochem. Photobiol. **31** (1980) 59-65

[13] Greiter, F.: Sonne und Gesundheit. Gustav Fischer, Stuttgart, New York 1984 S 28

[14] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection): Global solar UV index. WHO, WMO, UNEP, ICNIRP-1/95 Oberschleißheim, 1995

[15] Keck, G.; Cabaj, A.; Schauberger, G.; UV-Exposition der österreichischen Bevölkerung durch solare Strahlung in Beruf, Freizeit und Urlaub sowie durch die Nutzung von Solarien. Beiträge 1/92 – Lebensmittelangelegenheiten, Veterinärverwaltung, Strahlenschutz. Hrsg.: Bundesministerium für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz, Wien 1992

[16] Keck, G.; Cabaj, A.; Schauberger, G.: Sonne – plus – minus, Informationsbroschüre des Bundesministeriums für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz, Wien, 1993.

[17] Kuik, F.; Kelder, H.: Spectral ultraviolet radiation measurements and correlation with atmospheric parameters. KNMI, Scientific Report WR 94-05, De Bilt 1994

[18] Madronich, S.; Björn, L. O.; Ilyas, M.; Caldwell, M. M.: Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the earth surface: In: UNEP: Environmental effects of ozone depletion: 1991 update. Kenya 1991

[19] Schauberger, G.: Model for the global irradiance of the solar biologically-effective ultra-violet-radiation on inclined surfaces. Photochem. and Photobiol. **52** (1990) 1029-1032

[20] Schauberger, G.; Keck, G.: Beitrag zur Bestimmung der solaren UV-Belastung der Haut: Eine epidemiologische Betrachtung zur Ätiologie des Basalioms. Aktuelle Dermatol. **16** (1990) 289-328

[21] Schauberger, G.; Keck, G.: Beitrag zur Abschätzung der effektiven Hautdosis des Menschen im solaren UV-Strahlungsfeld. Wetter und Leben **43** (1991) 189-201

[22] Schippnick, P. F.; Green, A. E. S.: Analytical characterization of spectral actinic flux and spectral irradiance in the middle ultraviolet. Photochem. Photobiol. **35** (1982) 89-101

[23] Stamnes, K.; Tsay, S. C.; Wiscombe, W.; Jayaweera, K.: Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. Appl. Opt. **27** (1988) 2502-2509

[24] van der Leun, J. C.: UV-Carcinogenesis. Photochem. Photobiol., **39** (1984) 861-868

[25] Weihs, P.; Webb, A. R.: Comparison of Green and Lowtran radiation schemes with a discrete ordinate method UV model. Photochem. Photobiol. **64** (1996) 642-648

[26] International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association: Review of the concepts, quantities, units and terminology for non-ionizing radiation protection. Health Physics **49** (1985) 1329-1362

Eingegangen am 27.2.1997; zum Druck angenommen am 10.7.1997

Korrespondenzanschrift:
Univ.-Doz. Dr. G. Schauberger
Institut für Medizinische Physik
Veterinärmedizinische Universität Wien
Veterinärplatz 1
A-1210 Wien

Erratum

W. Roser et al.: Dosimetrie ionisierender Strahlen mittels ^{1}H-MRS – eine neue Technik zur raschen lokalisierten Dosisbestimmung. Z. Med. Phys. **7** (1997) 99–103.
Das auf Seite 101, Spalte 1, Zeile 2 angegebene Volumen für die lokalisierte STEAM Sequenz beträgt nicht 1,5 cm^3, sondern, wie die Autoren angegeben hatten, (1,5 cm)^3.

Die Schriftleitung