

Die ultraviolette Sonnenstrahlung, aktinische¹⁾ Komponente des Reizklimas

C. Stick

Vor genau 200 Jahren, im Februar 1801, entdeckte der Jenaer Forscher Johann Wilhelm Ritter die ultraviolette Sonnenstrahlung. Etwa hundert Jahre später, 1903, wurde der dritte Nobelpreis für Physiologie und Medizin an den Dänen Niels Rydberg Finsen verliehen, und zwar für seine Entdeckung, daß die Tuberkulose der Haut (Lupus vulgaris), die zur damaligen Zeit ebenso verbreitet wie unheilbar war, durch Bestrahlung mit Ultraviolettstrahlen geheilt werden konnte. Diese Entdeckung begründete die Anwendung der Sonnenstrahlung im Rahmen der Klimatherapie an der See und im Hochgebirge. Wieder knapp 100 Jahre später, 1995, wurde der Nobelpreis für Chemie an die drei Forscher Paul Crutzen, Mario Molina und Sherwood Rowland für ihre Arbeiten zur Atmosphärenchemie verliehen, unter anderem für ihre Beiträge zur Aufklärung der Mechanismen, die zu einer Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht führen. Die Ozonschicht ist ein wirksamer Filter, welcher die kürzesten und biologisch aggressiven UV-Strahlen der Sonne verschluckt, so daß sie den Erdboden nicht erreichen. Eine Ausdünnung der Ozonschicht würde diese Filterwirkung vermindern mit der Folge, daß die kurzwellige UV-Strahlung am Boden stärker würde. Hieran knüpft sich die Sorge, daß Hautschäden bis hin zu verschiedenen Hautkrebsarten vermehrt auftreten könnten.

Die jetzt 200jährige Geschichte zeigt also ganz unterschiedliche Aspekte der ultravioletten Sonnenstrahlung. Das trifft auch heute noch zu: Einerseits werden im Rahmen der Heliotherapie an der See und im Gebirge, aber auch mit künstlichen Strahlern chronische Hauterkrankungen behandelt, andererseits wird eine Zunahme der durch die Sonne bedingten Hautschäden beobachtet, so daß die Bevölkerung über die ultraviolette Sonnenstrahlung informiert und vor

¹⁾ aktinisch = strahlungswirksam, strahlungsbedingt

übertriebenem Sonnengenuß gewarnt werden muß. Beiden Aufgaben sind die Messungen im Institut für Medizinische Klimatologie gewidmet. Die Meßdaten werden automatisch ausgewertet und einerseits im Hausfernsehen der Asklepios Nordseeklinik zur Information von Patienten und Ärzten angezeigt, andererseits werden sie auf einem Monitor im Foyer des Sylt-ness Centers der allgemeinen Öffentlichkeit präsentiert. Eine weitere Aufgabe ergibt sich aus einer Kooperation mit dem Institut für Strahlenhygiene des Bundesamtes für Strahlenschutz. Das BfS betreibt gemeinsam mit dem Umweltbundesamt ein bundesweites Meßnetz zur langfristigen Erfassung der Ultraviolettstrahlung (Solares UV Monitoring Meßnetz des BfS/UBA, Neuherberg, Leitung: Dr. M. Steinmetz). Die Assoziation zu diesem Meßnetz dient dem Austausch von Meßdaten und Techniken und zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle.

Die eigentliche Hauptaufgabe der Messungen besteht aber darin, die Zusammensetzung der ultravioletten Sonnenstrahlung zu analysieren und diese wichtige Komponente des Meeresklimas im Hinblick auf die Wirkungen am Menschen zu quantifizieren.

Warum Sylt als Standort für Messungen der UV-Strahlung?

Der Standort Westerland, spezieller noch: der Standort Lornsenweg 9 auf dem westlichen Dünenwall der Insel Westerland, ist aus mehreren Gründen ideal geeignet, die ultraviolette Sonnenstrahlung zu messen. Erstens liegt Westerland in einem Reinluftgebiet. Atmosphärische Trübungen, die in Ballungsgebieten des Binnenlands durch erhöhte Luftbelastungen mit Schadstoffen auftreten, fehlen hier. Die Strahlung wird durch solche Einflüsse also nicht geschwächt. Auch ist die Sonnenstundenzahl auf Sylt wegen der vorgeschobenen Lage der Insel in die Nordsee höher als auf dem Festland. Die lokalen Gegebenheiten auf der Düne sind ebenfalls sehr günstig: Die Strahlung kann ohne Abschattung durch Gelände, Vegetation oder Gebäude aus dem gesamten Himmelsgewölbe

einfallen und gemessen werden. Schließlich befindet sich das Institut in unmittelbarer Nähe des Strands, also dort, wo viele Menschen den größten Teil ihrer UV-Dosis empfangen, nämlich in ihrer Freizeit und im Urlaub. Wie erwähnt, werden die Meßwerte der UV-Strahlung seit Sommer 1996 im Foyer des Syltner Centers auf einem großen Präsentationsmonitor angezeigt. Die Information besteht aus einer Folge von zyklisch wiederkehrenden Bildschirmtafeln, auf denen die Meßwerte als Zahlen und in Form von Diagrammen gezeigt werden. Besonderes Interesse findet eine aufgrund der Meßdaten berechnete Vorhersage von Expositionszeiten. Diese geben an, nach welchen Zeiten voraussichtlich die Sonnenbrandschwellen erreicht sein werden, und zwar jeweils für die vier in Mitteleuropa vertretenen Hauttypen. Die Bildschirmfolge umfaßt zusätzlich Wetterdaten wie Luftdruck und Lufttemperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Daten, die ebenfalls im Institut für Medizinische Klimatologie gemessen werden und die für das Publikum an der See immer von besonderem Interesse sind. Die Bildschirmpräsentation wird durch eine Broschüre ergänzt, die den Besuchern weitere Informationen über die ultraviolette Sonnenstrahlung gibt. Es ist zu hoffen, daß diese Informationen die Kenntnisse über die Eigenheiten der UV-Strahlung verbessern und zu einem vernünftigen Umgang mit der Sonne, besonders zur Vermeidung von Sonnenbränden beitragen. Die erweiterte Version der UV-Information, die in den Hauskanal der unmittelbar dem Institut benachbarten Asklepios Nordseeklinik übertragen wird, ist speziell auf die Belange von Patienten mit Hauterkrankungen abgestimmt. Nach ärztlicher Anleitung können Patienten, die sich auf der Therapiedüne der Klinik der Sonne aussetzen, sich über die für die jeweilige Erkrankung günstigen Besonnungszeiten informieren und die Exposition aufgrund der aktuellen Meßdaten und der Vorausberechnungen dosieren. Für die Patienten mit Hauterkrankungen spielen verbesserte Kenntnisse der Eigenarten der hautwirksamen UV-Strahlung eine besonders wichtige Rolle. Somit dienen die UV-

Informationen den beiden oben angesprochenen Zielen, der therapeutischen Nutzung und dem Schutz der Gesundheit.

Wie wird die UV-Strahlung der Sonne gemessen? Wie ist die UV-Strahlung zusammengesetzt?

Im Universitätsinstitut wird die solare Ultraviolettstrahlung mit Spektralradiometern gemessen. Diese Geräte, sog. Monochromatoren, zerlegen das weiße Sonnenlicht in seine einzelnen Wellenlängenbestandteile und messen deren Bestrahlungsstärke. Da die Stärke im Ultraviolettspektrum der Sonne von den kürzesten zu den längsten Wellenlängen um fünf bis sechs Zehnerpotenzen zunimmt, muß die Trennung der Wellenlängen sehr genau sein, damit sichergestellt ist, daß auch tatsächlich nur die Bestrahlungsstärke der jeweiligen Wellenlänge erfaßt wird. Deswegen werden Doppelmonochromatoren verwendet, welche die Strahlung besonders sauber trennen. In einem Spektrum sind die Bestrahlungsstärken nach Wellenlängen sortiert aufgetragen.

Legende zu Abb. 1

oben: Spektren der solaren Ultraviolettstrahlung an einem wolkenlosen Tag kurz vor der Sommersonnenwende. Dargestellt sind die Bestrahlungsstärken in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei den Sonnenhöhenwinkeln 10° bis 50° und beim Sonnenhöchststand von $58,4^\circ$. An einigen Stellen des Spektrums erscheinen kleine Einschnitte. Am auffälligsten sind die zwei am rechten Ende des Spektrums bei 393 nm. Diese sog. Fraunhoferlinien sind Absorptionsbanden in der Sonnenatmosphäre. Für die Messungen dienen sie als Marker für die Wellenlängengenauigkeit.

unten: Dieselben Spektren wie oben in logarithmischer Skalierung. In dieser Darstellung wird die extrem steile Abnahme der Bestrahlungsstärken zu kürzeren Wellenlängen im UVB deutlich. Zusätzlich ist das standardisierte Wirkungsspektrum $S(\lambda)$ für das Erythem der Haut nach CIE eingetragen. Die kürzesten Wellenlängen mit der geringsten physikalischen Bestrahlungsstärke besitzen die größte biologische Wirksamkeit.

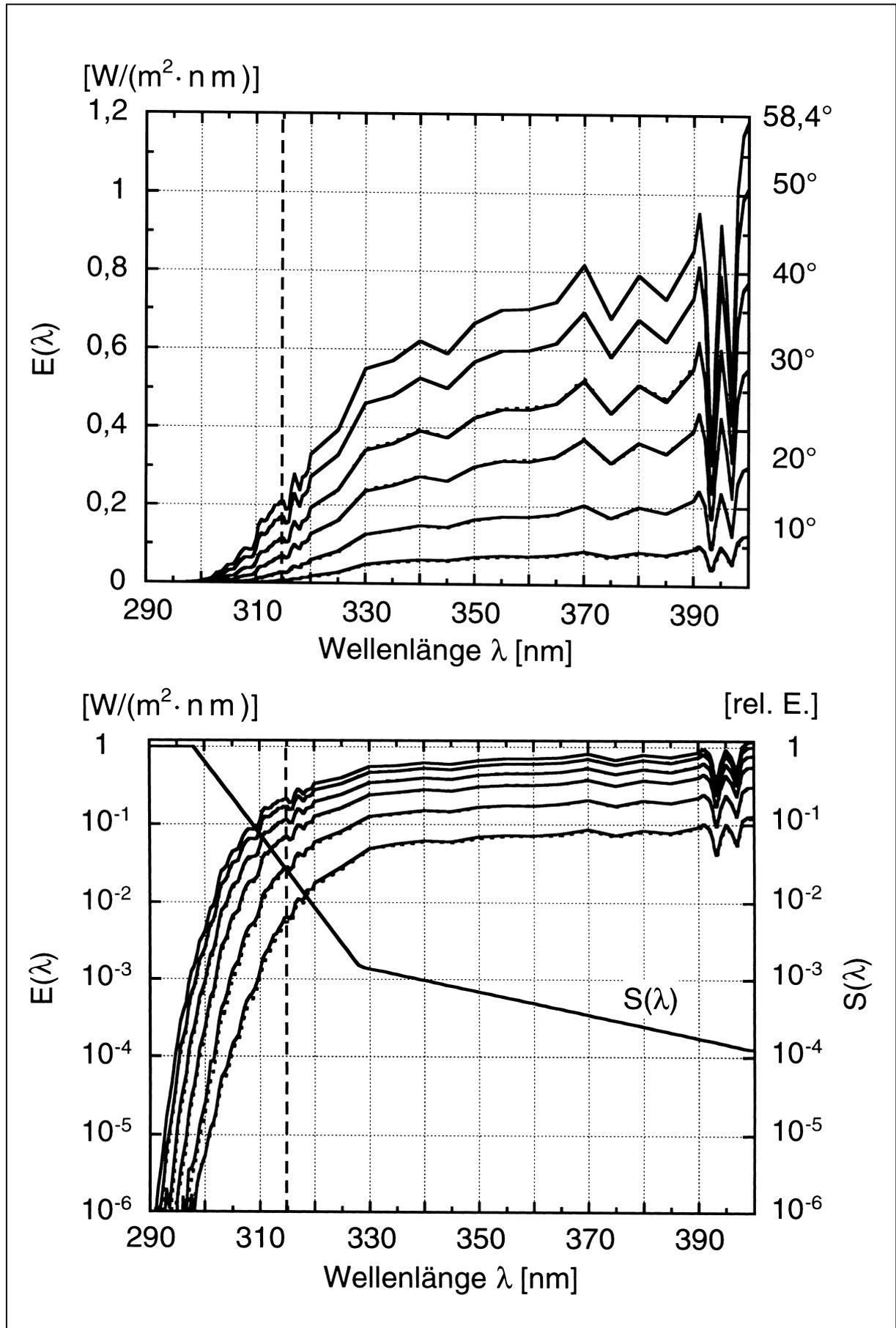


Abb. 1 oben zeigt UV-Spektren, die während eines schönen Frühsommertages kurz vor der Sonnenwende auf Sylt aufgenommen wurden. Das UV-Spektrum der Sonne reicht am Erdboden von 290 nm bis zum Übergang ins sichtbare violette Licht etwa zwischen 380 und 400 nm. Dargestellt sind die Spektren bei den Sonnenhöhen 10°, 20°, 30°, 40°, 50° und beim Sonnenhöchststand von 58,4°. Die Spektren, die am Vormittag aufgenommen wurden, sind als durchgezogene Linien dargestellt, die Spektren am Nachmittag bei gleicher Sonnenhöhe durch unterbrochene Linien. Die Werte stimmen so gut überein, daß die Kurven sich fast vollständig überlagern. An klaren Tagen wird die Zusammensetzung der Sonnenstrahlung also ganz von der Sonnenhöhe bestimmt. Die Grenze zwischen den Spektralbereichen UVA und UVB bei 315 nm ist als senkrechte punktierte Linie markiert.

Es wird deutlich, daß die UVA-Strahlung oberhalb von 315 nm den weitaus größten Teil der Strahlung ausmacht. Die Bestrahlungsstärke im UVB-Bereich ist so gering, daß es üblich ist, die Spektren im logarithmischen Maßstab abzubilden (Abb. 1 unten). In dieser Darstellung wird deutlich, daß die Spektren im UVB zu den kürzeren Wellenlängen steil abfallen, sie erscheinen regelrecht abgeschnitten. Bei $10^{-6} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ ist die Nachweisgrenze des Spektrometers erreicht²⁾. Die Bestrahlungsstärke beträgt bei den kürzesten Wellenlängen im Sonnenspektrum nur ein Millionstel verglichen mit den Werten, die am Übergang vom UVA zum sichtbaren Violett gemessen werden.

Dieser ungewöhnlich steile Abfall der Bestrahlungsstärke liegt nicht in dem von der Sonne ausgesandten Spektrum, sondern wird von der Absorption durch das Ozon in der Atmosphäre bewirkt, vor allem durch das Ozon in der Stratosphäre

²⁾ W/m^2 = Watt pro Quadratmeter, Maß für Bestrahlungsstärke, i.e. die pro Sekunde auf die Fläche von einem Quadratmeter eingestrahelte Energie; nm = Nanometer, ein milliardstel Meter = 10^{-9} m, gebräuchliche Einheit für die Wellenlänge des Lichts

zwischen ca. 15 und 50 km Höhe, das als Ozonschicht in der Öffentlichkeit weite Bekanntheit erlangt hat. Die Absorption durch Ozon nimmt zu kürzeren Wellenlängen so stark zu, daß die Sonnenstrahlung unterhalb von 290 nm oder gar im UVC-Bereich die Atmosphäre überhaupt nicht mehr durchdringt, sondern völlig in der Ozonschicht verschluckt wird. Der steile Abfall im UVB wird deswegen auch kurz „Ozonkante“ genannt. Sie ist, wie oben erwähnt, einer der Gründe, warum die Wellenlängen bei der Zerlegung der Sonnenstrahlung so genau getrennt werden müssen.

Was sind die besonderen Eigenschaften der ultravioletten Sonnenstrahlung?

Für den Menschen sind die beiden wichtigsten Eigenschaften der Ultraviolettstrahlung, daß sie nicht wahrnehmbar ist, also weder sichtbar wie das Licht noch als Wärme fühlbar wie die Infrarotstrahlung ist. Deswegen läßt sich die Stärke der UV-Strahlung gefühlsmäßig überhaupt nicht einschätzen. Die zweite wichtige Eigenschaft ist ihre enorme biologische Wirksamkeit. Sie ist ein weiterer Grund, dessentwegen die kürzesten Wellenlängen im Sonnenspektrum ungeachtet ihrer geringen physikalischen Stärken so genau erfaßt werden müssen.

Die Kurve $S(\lambda)$ in Abb. 1 unten beschreibt die relative Wirksamkeit der verschiedenen Wellenlängen, an der menschlichen Haut einen Sonnenbrand zu erzeugen. Dieses Wirkungsspektrum für das Erythem ist als eine dreiteilige Exponentialfunktion international standardisiert worden: Die kürzesten Wellenlängen sind am stärksten wirksam. Im Bereich zwischen 298 und 328 nm fällt die relative Wirksamkeit steil ab. Danach erfolgt der Verlust der Wirksamkeit zu höheren Wellenlängen langsamer. Die Wellenlängen am Übergang von UVA zum sichtbaren Violett haben nur noch etwa ein Zehntausendstel der Wirksamkeit, welche die kürzesten Wellenlängen im UVB besitzen. Grob gesagt haben ausgerechnet die Wellenlängen mit den geringsten Bestrahlungsstärken im

solaren UV-Spektrum die stärksten biologischen Wirkungen. Gerade diese Wellenlängen werden beim Durchtritt durch die Lufthülle durch die physikalischen Prozesse anders behandelt als das Licht und die Infrarotstrahlung. Wie erwähnt spielt die Absorption durch das Ozon hierbei eine dominierende Rolle. Das Ausmaß der Absorption hängt entscheidend von der optischen Weglänge durch die Atmosphäre und damit von der Sonnenhöhe ab. Je höher der Sonnenstand, um so kürzer der Weg durch die Atmosphäre, um so geringer ist die Absorption und entsprechend um so stärker sind die kurzen Wellenlängen im Spektrum vertreten. Die „Ozonkante“ in Abb. 1 unten wird für die Spektren, die bei größerem Sonnenhöhenwinkel gemessen wurden, steiler und nach links verschoben. Die kurzwellige UVB-Strahlung nimmt entsprechend überproportional und sehr viel stärker mit der Sonnenhöhe zu als die UVA-Strahlung, die nicht durch Ozon geschwächt wird. Während die UVA-Strahlung im Bereich zwischen 330 nm und 400 nm von 10° Sonnenhöhe bis zum mittäglichen Sonnenhöchststand lediglich um rund das Zehnfache zunimmt, beträgt die Zunahme bei 300 nm im UVB das 800fache.

Die gesamte Wirkung der Strahlung aus dem UV-Bereich läßt sich dadurch zusammenfassen, daß die physikalisch gemessenen Spektren Wellenlänge für Wellenlänge mit dem Wirkungsspektrum für das Erythem gewichtet und anschließend über den ganzen ultravioletten Spektralbereich integriert werden. Das Ergebnis, die erythemerzeugende oder hautwirksame Strahlung ist im Tagesverlauf in Abb. 2 dargestellt. Zum Vergleich ist die gesamte Sonnenstrahlung, also die Summe aus UV-Strahlung, sichtbarem Licht und Infrarotstrahlung abgebildet (obere Kurve). Der Vergleich zeigt, daß die hautwirksame Strahlung am Vormittag zwar später, dann aber steiler bis auf das mittägliche Maximum ansteigt und am Nachmittag schneller wieder abfällt als die Gesamtstrahlung. Die Halbmaximalwerte der hautwirksamen Strahlung werden jeweils

etwa $1\frac{1}{2}$ bis $1\frac{3}{4}$ Stunden später überschritten bzw. nachmittags früher unterschritten als die entsprechenden 50%-Werte der Gesamtstrahlung.

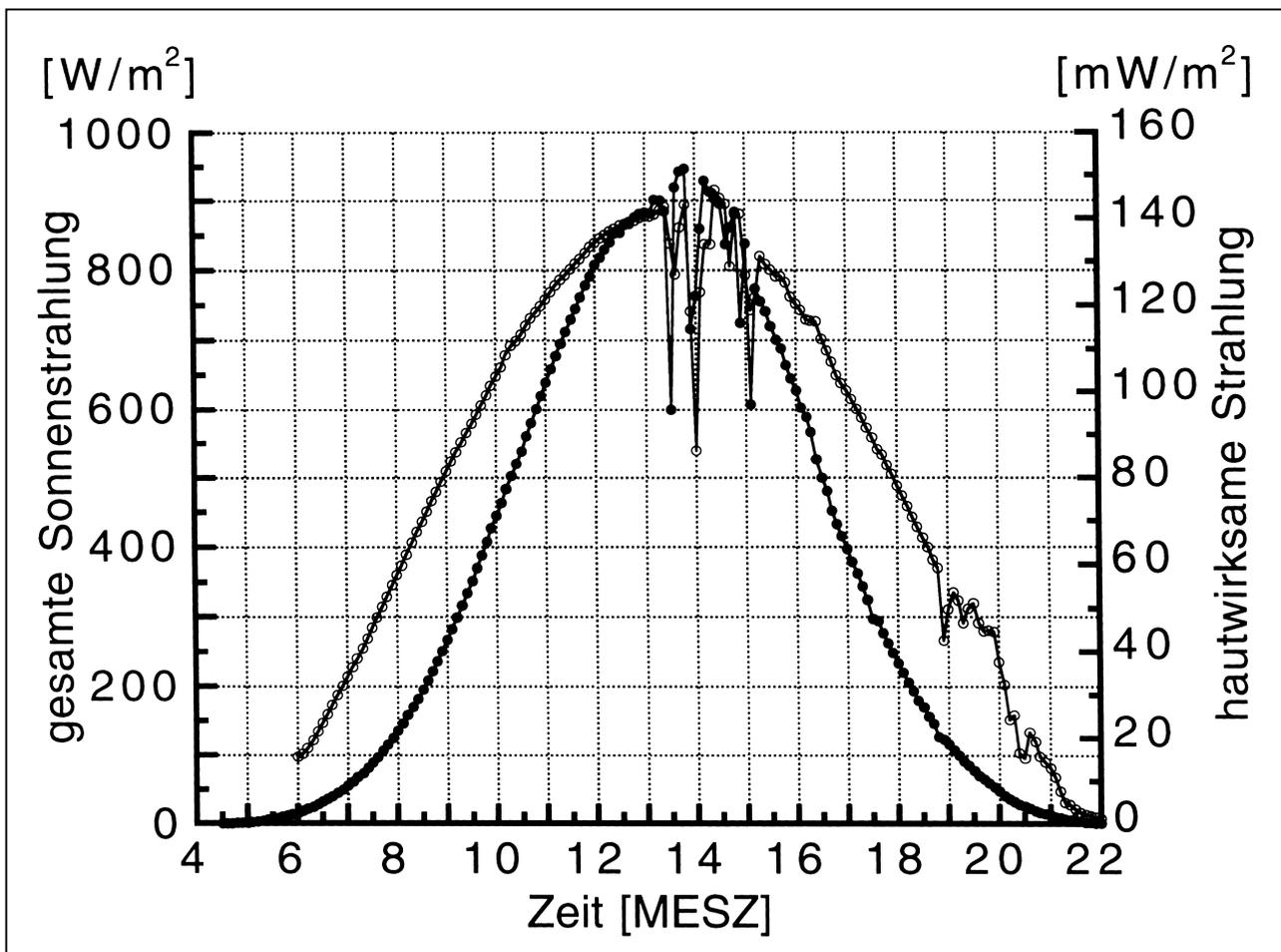


Abb. 2: Vergleich der Tagesgänge der Gesamtstrahlung (obere Kurve, Kreise) und der hautwirksamen Strahlung (untere Kurve, Punkte) während eines klaren Tages im Frühsommer auf Sylt. Kurz nach Sonnenhöchststand um 13:29 h mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ) zogen einzelne Wolken über Westerland. Es wird deutlich, daß die Strahlung durch die Abschattung nicht nur verringert, sondern durch die Reflexion an den Wolken teilweise auch verstärkt wird. Obwohl die Wolken möglicherweise den Eindruck vermitteln, die Strahlung sei gemindert, kann die Zeit bis zum Erreichen einer Sonnenbranddosis deswegen nur unwesentlich verlängert sein.

Die hautwirksame Strahlung ist also um die Zeit des Sonnenhöchststandes konzentriert, während die Kurve der Gesamtstrahlung breiter verteilt ist. Auf diese Besonderheit der UV-Strahlung gründen sich die Empfehlungen der Dermatologen, im Sommer die Mittagssonne möglichst zu meiden.

Streuung: Auf Umwegen zum Ziel

Der zweite Prozeß, bei dem die kurzwellige UV-Strahlung erheblich anders als die längerwelligen Spektralbereiche behandelt werden, ist die Streuung. Durch die Streuung wird die Strahlung nicht verschluckt, sondern in andere Richtungen gelenkt, zum Teil zurück in den Weltraum. Es werden zwei verschiedene Arten der Streuung unterschieden. Die Mie-Streuung erfolgt beispielsweise an Wassertropfchen. Dabei werden alle Wellenlängen ähnlich behandelt, so daß Nebel oder Wolken weiß oder grau aussehen. Die andere Art Streuung, die Rayleigh-Streuung, erfolgt an den Luftmolekülen selbst, also an Teilchen, die viel kleiner sind als die Wellenlängen des Lichts. Die Rayleigh-Streuung ist für die blaue Farbe des Himmels verantwortlich, weil die kurzen Wellenlängen der blauen Strahlung sehr viel stärker gestreut werden als die langen Wellen der roten Strahlung. Wie die Absorption, so ist auch das Ausmaß der Streuung um so größer, je länger die optische Weglänge durch die Atmosphäre ist. Bei tief stehender Sonne sind die Blauanteile des weißen Sonnenlichts so weitgehend gestreut, daß der Himmel durch Streulicht zwar blau, die direkte Strahlung aus der Sonne aber rot erscheint. Die Wellenlängenabhängigkeit der Rayleigh-Streuung gilt nicht nur im sichtbaren Licht, sondern noch stärker im Ultraviolettbereich.

Dies ist der Grund für eine weitere Besonderheit der UV-Strahlung: In der Abb. 3a sind die Bestrahlungsstärken der direkten und diffusen hautwirksamen UV-Strahlung in Abhängigkeit vom Sonnenhöhenwinkel dargestellt. Aus dem Diagramm geht hervor, daß die erythemwirksame UV-Strahlung auf Sylt zum größeren Teil als diffuse Strahlung aus allen Richtungen des Himmelsgewölbes einstrahlt. Selbst bei den höchsten Sonnenständen übertrifft die diffus gestreute Strahlung den direkten Anteil. Die direkt einfallende Sonnenstrahlung macht also bei der hautwirksamen UV-Strahlung weniger als die Hälfte der auf eine horizontale Fläche fallenden Strahlung aus.

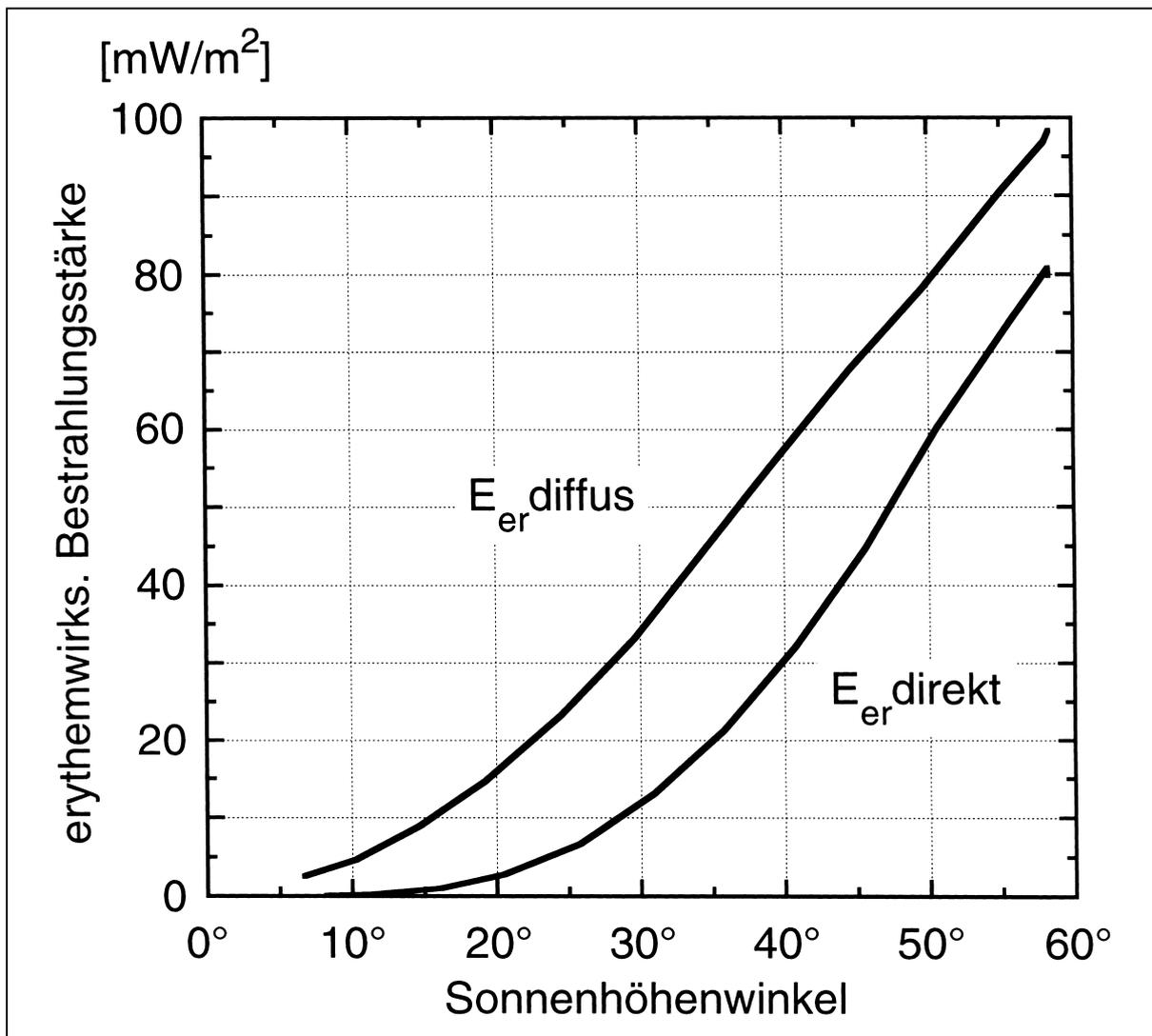


Abb. 3a: Die erythem erzeugende Sonnenstrahlung aufgeteilt in direkte und indirekt diffus gestreute Strahlung in Abhängigkeit vom Sonnenhöhenwinkel. Bei der nach ihrer biologischen Wirksamkeit gewichteten UV-Strahlung übertrifft der diffus aus dem Himmelsgewölbe gestreute Anteil bei allen Sonnenhöhenwinkeln die direkt mit den Sonnenstrahlen einfallende Strahlung.

Für die gesamte Sonnenstrahlung (UV-Strahlung, Licht und IR-Strahlung) sind die Verhältnisse dagegen völlig anders, wie der Vergleich in Abb. 3b zeigt. Hier macht die diffuse Strahlung an klaren Tagen lediglich einen Anteil von rund 12% aus.

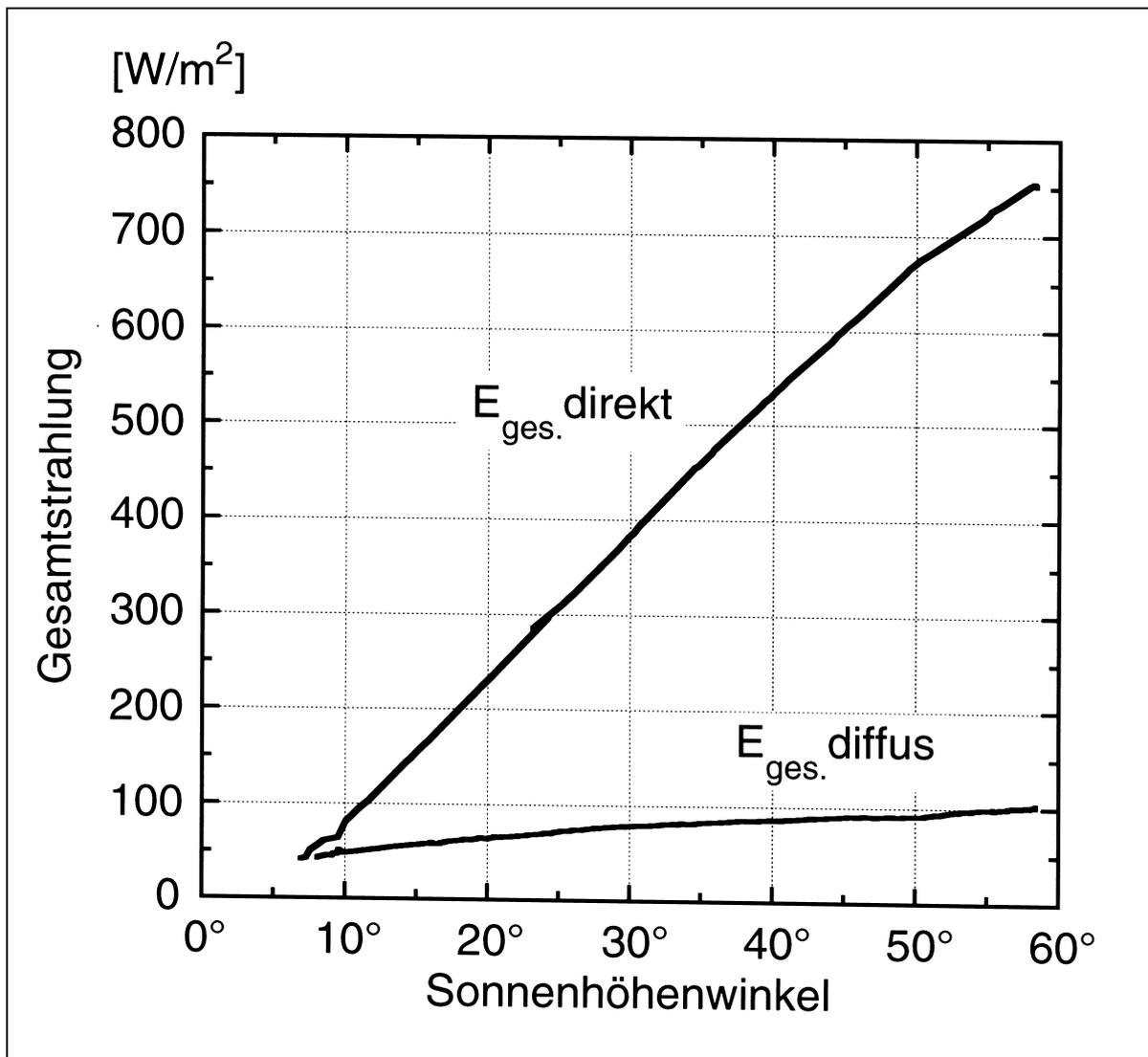


Abb. 3b: Die Abhängigkeit von direkter und indirekt diffuser Strahlung vom Sonnenhöhenwinkel für die gesamte Sonnenstrahlung (UV-Strahlung, sichtbares Licht und Infrarotstrahlung). Anders als bei der hautwirksamen Strahlung überwiegt hier die direkte Strahlung. Die diffuse Strahlung erreicht beim Sonnenhöhenwinkel von knapp 60° lediglich etwa 12% der Globalstrahlung (Summe aus direkter und diffuser Sonnenstrahlung).

Die genaue Verteilung der gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe wird zur Zeit im Institut für Medizinische Klimatologie im Rahmen einer Dissertation von einem Mitarbeiter untersucht. Aus den Ergebnissen wird abzuleiten sein, wie weit Abschattungen nach verschiedenen Richtungen die aufgenommene hautwirksame UV-Strahlung mindern.

Warum bräunt man an der See so schnell oder verbrennt gar?

Die dargestellten Besonderheiten der UV-Strahlung können auch zur Erklärung der allgemeinen Erfahrung beitragen, daß man an der See besonders schnell bräunt respektive leicht einen Sonnenbrand erleidet. Wegen des hohen Anteils diffuser Strahlung hängt die auf die Haut treffende Strahlung wesentlich davon ab, wie groß die Fläche des Himmelsgewölbes ist, aus der die Strahlung eintreffen kann. Jede Abschattung durch Berge, Gebäude oder Vegetation mindert die diffuse Strahlung. Der weite Horizont an der See läßt die hautwirksame Strahlung dagegen ungehindert einfallen. Die UV-Strahlung mit ihrer starken biologischen Wirkung ist somit während des Sommerhalbjahrs ein wichtiger Faktor des sog. Reizklimas an der See.

Die übrigen Eigenschaften dieses Klimas, einerseits ausgeglichene Lufttemperaturen als im Binnenland und andererseits der fast stets wehende Wind, führen dazu, daß es auch im Hochsommer so gut wie nie zu Hitzebelastungen kommt. Im Gegenteil, der Wärmegenuß der Sonnenstrahlung ist meist notwendig, um sich in Badekleidung längere Zeit am Strand aufhalten zu können. Die kühlende Wirkung des Windes täuscht über die Stärke der nicht wahrnehmbaren UV-Strahlung hinweg. So setzt man sich an der See der Sonne leicht für Zeiten aus, in denen man im Binnenland allein wegen der Überwärmung längst den Schatten aufgesucht hätte.

Einen wahrscheinlich nicht zu vernachlässigenden Anteil der UV-Strahlung, die auf die Haut trifft, hat auch die Reflexion durch den weißen Sand. Die Reflexion durch Wasser ist dagegen wahrscheinlich geringer. Da die Mitteilungen in der Literatur zu diesen Fragen jedoch teils widersprüchlich, teils unvollständig sind, werden genauere Untersuchungen hierzu mit Hilfe spektraler Messungen im Institut für Medizinische Klimatologie geplant.



Foto: C. Stick

Strahlungsmeßgeräte auf dem Dach des Instituts für Medizinische Klimatologie