

**Über die Verteilung der diffusen,
im Himmelsgewölbe gestreuten
ultravioletten Strahlung:**

**Spektrale Messungen und Szenarien
für eine medizinische Bewertung**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Henner Sandmann

Kiel 2002

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Sandmann, Henner

Über die Verteilung der diffusen, im Himmelsgewölbe gestreuten
ultravioletten Strahlung: Spektrale Messungen und Szenarien
für eine medizinische Bewertung / Henner Sandmann. - 1.Aufl.-
Kiel: Henner Sandmann, 2002, Zugl. Uni. Kiel, Diss., 2002

ISBN 3-00-009681-7

Alle Rechte vorbehalten. © 2002 Henner Sandmann, Kiel

ISBN 3-00-009681-7

Geschrieben in L^AT_EX, gesetzt in T_EX

Referent: Prof. Dr. V. Helbig

Korreferent: Prof. Dr. C. Stick

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Juli 2002

Zum Druck genehmigt: 15. Juli 2002

Der Dekan

Zusammenfassung

Die am Erdboden messbare UV-Strahlung zeichnet sich gegenüber dem sichtbaren Licht und der infraroten Wärmestrahlung durch eine Reihe von Besonderheiten aus: Sie ist aufgrund der starken Absorption in der Ozonschicht in hohem Maße von der Sonnenhöhe abhängig. Weiterhin besitzt insbesondere der kurzwellige UVB-Anteil die höchste biologische Wirksamkeit zur Erzeugung von Erythemen sowie zur Schädigung des Erbguts. Darüber hinaus gelangt UV-Strahlung aufgrund der starken Zunahme der Streuung zu kürzeren Wellenlängen hin in hohem Maße als diffuse Strahlung zum Erdboden. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Verteilung der diffus gestreuten UV-Strahlung über das Himmelsgewölbe erfasst und medizinisch bewertet. Die Messungen erfolgten durch ein Spektralradiometer, dessen Eingangsoptik mit vorgesetzter Blende automatisiert auf ausgewählte Punkte am Himmelsgewölbe gerichtet wurde. Eine numerische Interpolation ergab eine Kartierung des Himmelsgewölbes bei den Wellenlängen 307nm (UVB), 380nm (UVA) sowie zum Vergleich bei 550nm (VIS). Durch ergänzende Messungen mit geneigten, ebenen Empfängern wurde die auf unterschiedlich ausgerichtete Flächenelemente auftreffende Bestrahlungsstärke, stellvertretend für verschiedene Hautpartien des menschlichen Körpers, bestimmt. Auf der Grundlage der Messergebnisse wurde anhand verschiedener Szenarien berechnet, in welchem Ausmaß Abschattungen von Teilen des Himmelsgewölbes eine Reduzierung der empfangenen UV-Strahlung bewirken.

Summary

Ultraviolet radiation measurable close to ground level distinguishes itself from the visible light and the infrared thermal radiation by a number of certain characteristic features: Due to the large absorption rate in the ozone layer it strongly depends on the elevation of the sun. Furthermore the short-wave UVB radiation has the highest biological effectivity concerning the production of erythema as well as the damaging of genetic information. Moreover, UV radiation reaches the ground level in a large amount in form of diffused radiation due to the vast increase of scattered light to shorter wavelengths. Before this background the thesis on hand investigates the distribution of the diffusely scattered UV sky radiance and evaluates it from a medical point of view. The measurements were carried out with a spectral radiometer with a baffle system attached to its entrance optics that was directed automatically towards selected points at the sky. A numeric interpolation produced mappings of the sky at wavelengths of 307 nm (UVB), 380 nm (UVA) as well as at 550 nm (VIS) for reasons of comparison. By supplementary measurement with inclined, flat entrance optics the degree of radiation that hits upon surface elements in different positions - here representing different parts of the human skin - was determined. On the basis of the measurement results within different scenarios the extent to which shading of parts of the sky leads to a reduction in impinged radiation was calculated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Physikalische Grundlagen	5
2.1.1	Strahlungsgrößen	5
2.1.2	Astronomische Grundlagen	5
2.1.3	Extraterrestrische Strahlung der Sonne	12
2.1.4	Strahlungstransfer durch die Erdatmosphäre	14
2.1.4.1	Absorption der UV-Strahlung in der Ozonschicht	15
2.1.4.2	Rayleigh-Streuung und Mie-Streuung	19
2.2	Medizinische Grundlagen	22
2.2.1	Aufbau der Haut	22
2.2.2	Wirkungsfunktionen	24
2.2.3	Wirkungen und Risiken der UV-Strahlung	27
3	Materialien und Methoden	29
3.1	Beschreibung des Messortes	29
3.2	System zur Messung der UV-Strahlung	29
3.3	Kalibration der UV-Mess-Systeme	32
3.4	Pyranometer und Pyrhelimeter	32
3.5	Gerät zur Messung der Ozonsäule	34
3.6	Schwenkvorrichtung und –prozedur	34
3.6.1	Sonnennachführung	34
3.6.2	Messung entlang des Sonnenmeridians (Zenitscan)	36

3.6.3	Kartierung des Himmelsgewölbes (Skymapping)	36
3.7	Erfassung und Auswertung der Messdaten	36
4	Ergebnisse und Diskussion	39
4.1	Ergebnisse der methodischen Vorarbeiten	39
4.1.1	Genauigkeit der Eingangsoptik	39
4.1.2	Halbwertsbreite und Wellenlängengenauigkeit	40
4.2	Ergebnisse der spektralen Messungen	42
4.2.1	Jahresverlauf der UV- und Gesamtstrahlung	42
4.2.2	Sonnennachführung	44
4.2.3	Zenitscan	48
4.2.4	Zenitscan-Modus mit ebener Empfängerfläche	51
4.2.5	Kartierung des Himmelsgewölbes (Skymapping)	53
4.2.6	Skymapping-Modus mit ebener Empfängerfläche	63
4.3	Szenarien verschiedener Abschattungen	71
4.3.1	Verschattung durch Gebäude/Vegetation	71
4.3.2	Verschattung durch Strandkorb	74
4.3.3	Verschattung durch Sonnenschirm	76
5	Zusammenfassung und Ausblick	79
	Anhang	83
A	Verwendete Formelzeichen und Symbole	83
B	Abkürzungsverzeichnis	85
C	Technische Daten	86
D	Berechnung der Sonnenephemeriden	88
	Literaturverzeichnis	93
	Index	100
	Danksagung	103
	Lebenslauf	105
	Eidesstattliche Erklärung	107

Kapitel 1

Einleitung

Eine der ersten Definitionen des aus dem Griechischen stammenden Wortes Klima geht zurück auf den deutschen Naturforscher ALEXANDER VON HUMBOLDT (1769-1859), der 1831 schrieb [24]:

„Das Wort Klima umfasst in seiner allgemeinen Bedeutung alle Veränderungen in der Atmosphäre, von denen unsere Organe merklich affiziert werden; solche sind: die Temperatur, die Feuchtigkeit, die Veränderungen des barometrischen Druckes, der ruhige Luftzustand oder die Wirkungen ungleichnamiger Winde, die Reinheit der Atmosphäre oder ihre Vermengungen mit mehr oder minder ungesunden Gasaushauchungen, endlich der Grad eigentümlicher Durchsichtigkeit oder die Heiterkeit des Himmels [...].“

Bereits in dieser Definition sind alle wichtigen Vorgänge und Parameter enthalten, die den Klimabegriff kennzeichnen.¹ Selbst die Einbeziehung der 'mehr oder minder ungesunden' Luftverunreinigungen erscheint bereits äußerst modern. Wie sehr sich jedoch zu Beginn des 21. Jahrhunderts anthropogene Einflüsse auf das weltweite Klima auswirken würden, war für ALEXANDER VON HUMBOLDT nicht vorhersehbar. Begriffe wie Klimawandel, Treibhauseffekt, Ozonloch oder Zunahme von Hautkrebserkrankungen sind heutzutage beliebte Schlagwörter, die in zunehmendem Maße in Öffentlichkeit und Wissenschaft diskutiert werden.

Von großem Interesse ist dabei die in den letzten Jahren registrierte Abnahme der stratosphärischen Ozonkonzentration über den Polargebieten, insbesondere über der Antarktis. Die Mechanismen, die zum Abbau des Ozons in der Stratosphäre führen, wurden unter anderem von P.J. CRUTZEN, M.J. MOLINA und F.S. ROWLAND erforscht, denen dafür 1995 der Nobelpreis für Chemie verliehen wurde. Urheber des Ozonabbaus sind demnach anthropogene, in die Atmosphäre abgegebene Substanzen, die die natürlichen Gleichgewichtsreaktionen stören. Insbesondere die an der Erdoberfläche freigesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) sind es, die

¹Die heute übliche Definition des Klimabegriffes beinhaltet – zur Abgrenzung zu den Begriffen Witterung und Wetter – noch einen Beobachtungszeitraum von mehreren Dekaden.

auf hochwirksame Weise die Ozonkonzentration in der Stratosphäre herabsetzen. In der Troposphäre, dem untersten Stockwerk der Atmosphäre, sind die FCKW außerordentlich reaktionsträge. Erst nach Aufstieg in die darüber liegende Stratosphäre werden sie durch die dort vorhandene energiereiche ultraviolette Strahlung aufgebrochen. Insbesondere die aus den FCKW freigesetzten Chlor-Radikale greifen dann in die natürlichen Gleichgewichtsreaktionen zwischen Bildung und Zerstörung des Ozons ein, so dass als Folge dessen die Ozon-Konzentration sinkt [21].

Da die ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) jedoch zu einem großen Teil im Zuge dieser Reaktionen in der Ozonschicht absorbiert wird, bewirkt eine Abnahme der stratosphärischen Ozonkonzentration, dass in zunehmendem Maße kurzwellige, energiereiche UV-Strahlung bis zur Erdoberfläche gelangen kann. Im Rahmen einer energetischen Bilanzierung der gesamten von der Sonne emittierten Strahlung ist diese Zunahme verschwindend gering: Der Anteil der kurzwelligen UV-Strahlung an der gesamten, die Erdoberfläche erreichenden Strahlung beträgt gerade einmal 0.1 %. Eine mögliche Zunahme in der Größenordnung von 10 bis 20 % bewirkt somit eine Zunahme der Gesamtstrahlung im Promillebereich. Die Schwankung der am Erdboden auftreffenden Gesamtstrahlung bei wechselhafter Bewölkung kann vergleichsweise bis zu 80 % betragen [1].

Völlig anders ist eine Zunahme der UV-Strahlung zu bewerten, wenn deren biologische Wirksamkeit mit in Betracht gezogen wird: Allgemein gilt, dass mit kürzeren Wellenlängen, entsprechend zunehmender Frequenz, auch die Energie der Strahlung ansteigt. Die kurzwellige UV-Strahlung besitzt nun eine ausreichende Energie, um Molekülverbindungen aufzuspalten. Dieses äußert sich beispielsweise in photochemischen Reaktionen in der Atmosphäre, geht über die Alterung und Schädigung von Materialien und Werkstoffen, die der UV-Strahlung ausgesetzt sind, und reicht bis hin zu den biologischen Wirkungen auf Pflanzen, Tiere und Menschen. Die wichtigsten Chromophore, die in den lebenden Zellen die kurzwellige UV-Strahlung absorbieren, sind die Nukleinsäuren. Da diese unter anderem in Form der DNA die Erbsubstanz darstellen, können von der UV-Strahlung induzierte Veränderungen an der DNA genetische Schäden bewirken. Molekulare Reparaturmechanismen, die diese DNA-Schäden beseitigen sollen, arbeiten jedoch nicht immer fehlerfrei, so dass es zu UV-induzierten Mutationen der Erbinformation kommen kann, aus denen sich im Laufe eines Lebens Hauterkrankungen bis hin zum Hautkrebs herausbilden können.

Laut statistischer Auswertung der Jahresberichte des Saarländischen Krebsregisters ist in Deutschland in den Jahren von 1970 bis 1998 die Zahl der gemeldeten Hautkrebserkrankungen beim Stachelzellkarzinom um 144 %, beim Basalzellkarzinom um 469 % sowie beim Malignen Melanom um 198 % gemittelt über Männer und Frauen signifikant angestiegen [17]. Damit macht allein das Maligne Melanom in Deutschland ungefähr 2 % aller bösartigen Neubildungen aus und verursacht 1 % aller Krebstodesfälle [2]. Um mögliche Zusammenhänge zwischen einer Zunahme der am Erdboden messbaren UV-Strahlung aufgrund der Abnahme des stratosphärischen Ozons und dem Anstieg der Hautkrebserkrankungen nachzuweisen, ist es notwendig, über einen langen Zeitraum neben der Erfassung der Hautkrebsinzidenzen

auch die solare UV-Strahlung am Erdboden spektral aufgelöst zu vermessen und entsprechend ihrer biologischen Wirkung zu bewerten.

Diese Messungen werden im Rahmen des deutschlandweiten Solaren UV-Messnetzes, welches vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und vom Umweltbundesamt (UBA) betrieben wird, durchgeführt [71]. Die UV-Mess-Station des Instituts für Medizinische Klimatologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel in Westerland auf Sylt ist seit dem Aufbau des Messnetzes 1993 assoziiertes Mitglied des Messverbunds [75]. Insgesamt besteht das Messnetz aus neun über ganz Deutschland verteilte Stationen, die täglich von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang die bodennahe solare UV-Strahlung und die solare Gesamtstrahlung messen. Eine Auswertung der Messdaten zeigt, dass insbesondere in den Frühjahrsmonaten die Zahl vereinzelter Tage, an denen es zu einer Erhöhung der biologisch wirksamen UV-Strahlung um bis zu 20 Prozent gegenüber den saisonal zu erwartenden Werten gekommen ist, angestiegen ist. Betrachtet man hingegen die Sommermonate, so zeigt sich nur eine geringfügige Zunahme der UV-Strahlung in Deutschland [72].

Auch wenn die Messung der solaren UV-Strahlung in Deutschland nicht so lange zurückreicht wie die Erfassung der Hautkrebsinzidenzen, so zeigt dies doch, dass die Zunahme der Hautkrebserkrankungen auf andere Ursachen zurückgeführt werden muss. An erster Stelle steht dabei die erhöhte UV-Exposition, der sich ein großer Teil der Bevölkerung aufgrund eines geänderten Freizeit- und Sozialverhaltens aussetzt [18]. Mit Beginn der wachsenden Reisetätigkeit in den 50er und 60er Jahren in Europa wandelte sich das Schönheitsideal: „Vornehme Blässe“ wurde ersetzt durch intensive Bräune. Selbst in der heutigen Zeit, in der das Wissen um die Risiken, die mit der UV-Strahlung verbunden sind, wächst, steht Bräune immer noch als Synonym für Vitalität, Jugend, Fitness und Gesundheit. Einen derartigen Eindruck auf seine Mitmenschen zu machen, ist für viele äußerst erstrebenswert [33]. Im Zuge wachsender Mobilität werden darüber hinaus selbst in den Wintermonaten, wenn sich die körpereigenen Schutzmechanismen auf eine UV-Bestrahlungsstärke entsprechend unseren Breitengraden angepasst haben, häufig Fernreisen in äquatornahe Gebiete mit extrem hoher UV-Strahlung unternommen [57].

Die Messung der solaren UV-Strahlung am Erdboden erfolgt allgemein nach Richtlinien der World Meteorological Organisation mit horizontal ausgerichteten Empfängerflächen [87]. Als Messwert erfassen diese die so genannte Globalstrahlung, also die aus dem gesamten oberen Himmelshalbraum einfallende Strahlung, die sich aus einem direkten Anteil sowie einem indirekt im Himmelsgewölbe gestreuten Anteil zusammensetzt. Die Messung der Globalstrahlung beinhaltet somit keine Information darüber, aus welchem Bereich des Himmelsgewölbes die Strahlung zum Empfänger gelangt. Eine Unterteilung zwischen direkter und gestreuter Strahlung kann mit Hilfe eines Empfängers erfolgen, der mit einem Schattenring oder einer beweglichen Schattenkugel ausgestattet ist, so dass zu jeder Tageszeit der direkte Anteil ausgeblendet wird. Umgekehrt kann bei einer direkt auf die Sonne gerichteten Empfängerfläche, die mit einer Blende zur Unterdrückung der diffusen Strahlung ausgerüstet ist, der Anteil der direkten Sonnenstrahlung erfasst werden.

Eine räumlich aufgelöste Vermessung der diffus im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung ist deshalb von besonderer Bedeutung, da der menschliche Körper eine gekrümmte Oberfläche aufweist [29]. Im Gegensatz zu ebenen, horizontal ausgerichteten Empfängerflächen bietet der Mensch jedem Punkt am Himmelsgewölbe zur Strahlungsrichtung senkrechte Flächenelemente an. Beispielsweise die so genannten „Sonnenterrassen“ des menschlichen Körpers wie Nasen- und Handrücken, Stirn, Schultern, Dekolleté usw. sind dabei häufig senkrecht zur Sonne ausgerichtet. Vor diesem Hintergrund ist von besonderem Interesse,

- wie hoch das Verhältnis zwischen direktem und diffus im Himmelsgewölbe gestreuten Anteil an der Globalstrahlung im Tagesverlauf ist,
- wie hoch die maximalen Werte der solaren Strahlung sind, denen zur Strahlungsrichtung senkrechte Flächenelemente ausgesetzt sind und
- wie sich insbesondere die einzelnen Anteile der diffusen Streustrahlung räumlich über das Himmelsgewölbe verteilen.

Um diese Fragen zu beantworten, soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Mess-System zur Erfassung der solaren UV-Strahlung etabliert werden, dessen Eingangsoptik mit Hilfe einer zu programmierenden Schwenkvorrichtung automatisiert auf jeden beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe ausgerichtet werden kann. Zur Differenzierung zwischen direkter und diffuser Strahlung sollen Messungen mit verschiedenen Verschattungsvorrichtungen (Blende bzw. Schattenkugel) sowie bei unterschiedlicher Ausrichtung der Empfängerflächen durchgeführt werden. Dabei sind vor allem der kurz- sowie der langwellige UV-Bereich mit seinen unterschiedlichen biologischen Wirksamkeiten von Bedeutung. Da der Mensch über kein Wahrnehmungsorgan zur unmittelbaren Registrierung von UV-Strahlung verfügt, sollen zusätzlich Messungen im sichtbaren Bereich sowie Messungen der Gesamtstrahlung als Summe der Anteile aus dem ultravioletten, sichtbaren und dem infraroten Spektralbereich durchgeführt werden. Als Messzeitraum sind die Sommermonate zwischen Mai und August mit maximalen Werten der UV-Strahlung vorgesehen.

Mit Hilfe dieser Messungen lassen sich dann einerseits Szenarien ausarbeiten, wie geeignete Abschattungen der direkten und der indirekt im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung aussehen können, um einen effektiven Schutz vor Sonnenbränden bieten zu können. Andererseits kann die im Rahmen von Heliotherapien [61] medizinisch verordnete UV-Exposition genauer und gezielter dosiert und somit eine zu hohe Bestrahlung vermieden werden. In beiden Fällen führt die Beachtung der Verteilung der im Himmelsgewölbe gestreuten UV-Strahlung zu einer Reduzierung der UV-Exposition und somit zu einer Verringerung möglicher Spätfolgen für die Haut. Über diese medizinischen Aspekte hinaus lassen sich praktische Anwendungen der Messungen im Bereich der Materialwissenschaft bei der Bewitterung von Werkstoffen sowie im Bereich der Photovoltaik bei der optimalen Ausrichtung von Solaranlagen ableiten.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Strahlungsgrößen

Bei der energetischen Beschreibung eines Strahlungsfeldes, wie beispielsweise dem der Sonne, sind die in der folgenden Tabelle 2.1 auf Seite 6 definierten physikalischen Größen sowie die zugehörigen SI-Einheiten zu unterscheiden [14, 16].

2.1.2 Astronomische Grundlagen

Für einen durch seine geographische Länge λ und Breite ϕ definierten Beobachtungsort auf der Erdoberfläche ergibt sich aufgrund der Rotation der Erde um ihre eigene Achse und durch ihre Bahn auf der Ekliptik um die Sonne eine von der Tages- und Jahreszeit abhängige Position der Sonne am Himmel. Diese wird durch den Zenitwinkel θ als Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und Zenit sowie durch den Azimut α als Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und geographischer Nordrichtung festgelegt. Der Zenitwinkel θ nimmt dabei Werte von 0° (Zenit) bis 90° (Horizont) an. Der Azimut α wird im Rahmen dieser Arbeit von Nord beginnend über Ost, Süd, West zurück nach Nord, entsprechend von 0° über 90° , 180° , 270° bis 360° bzw. 0° gezählt.¹ An einigen Stellen wird zur besseren Anschauung anstelle des Zenitwinkels θ der Sonnenhöhenwinkel h als Winkel zwischen Sonnenmittelpunkt und Horizont verwendet, wobei rechnerisch gilt: $h = 90^\circ - \theta$. Alle in Kapitel 2.1.2 dargestellten Abbildungen wurden auf der Basis von Berechnungen der selbst programmierten Softwareroutine Sol-Pos 1.0 (vergl. Kap. 3.5, 3.6 sowie Anhang D) analog [23, 44] für die geographische Position der Mess-Station in Westerland auf Sylt erstellt.

¹Gelegentlich wird der Azimutwinkel in der Astronomie auch von Süd beginnend über West, Nord, Ost zurück nach Süd, entsprechend von 0° über 90° , 180° , 270° bis 360° bzw. 0° gezählt.

Größe	Bezeichnung	SI-Einheit	Erklärung
Stahlungsenergie W (Strahlungsmenge)		$\text{J} = \text{W} \cdot \text{s}$	Transportierte Energie eines Strahlungsfeldes
Strahlungsleistung ϕ (Strahlungsfluss)	$\phi = \frac{dW}{dt}$	W	Von einer Quelle emittierte bzw. Empfänger absorbierte Strahlungsleistung pro Zeit
Spezifische Ausstrahlung M	$M = \frac{d\phi}{dA}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Von einer Quelle pro Fläche emittierte Leistung
Bestrahlungsstärke E	$E = \frac{d\phi}{dA}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Von einem Empfänger pro Fläche absorbierte Leistung
Strahlstärke I	$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$	$\frac{\text{W}}{\text{sr}}$	Von einer Quelle pro Raumwinkel emittierte Leistung
Strahldichte L	$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega dA \cos \epsilon}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$	Von einem Empfänger pro Raumwinkel und Fläche absorbierte Leistung; $\epsilon \angle$ (Strahl, Normalen)
Bestrahlung H (Dosis)	$H = \frac{dW}{dA}$ $= \int E(t) dt$	$\frac{\text{J}}{\text{m}^2}$	Integral der Bestrahlungsstärke über die Zeit der Bestrahlung
Spektrale Bestrahlungsstärke E_λ	$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{nm}}$	Bestrahlungsstärke E pro Wellenlängenintervall $d\lambda$
Spektrale Strahldichte L_λ	$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$	$\frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2}$	Strahldichte L pro Wellenlängenintervall $d\lambda$
Photobiologisch-wirksame Bestrahlungsstärke E_{biol}	$E_{biol} = \int E_\lambda \cdot S_{biol}(\lambda) d\lambda$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Mit relativer spektraler Empfindlichkeit $S(\lambda)$ eines biologischen Vorgangs bewertete Bestrahlungsstärke
Photobiologisch-wirksame Bestrahlung H_{biol} (Dosis)	$H_{biol} = \int E(t)_{biol} dt$	$\frac{\text{J}}{\text{m}^2}$	Integral der biologisch-wirksamen Bestrahlungsstärke über die Zeit der Bestrahlung

Tab. 2.1: *Energetische Größen zur Beschreibung eines Strahlungsfeldes (nach [14, 16]).*

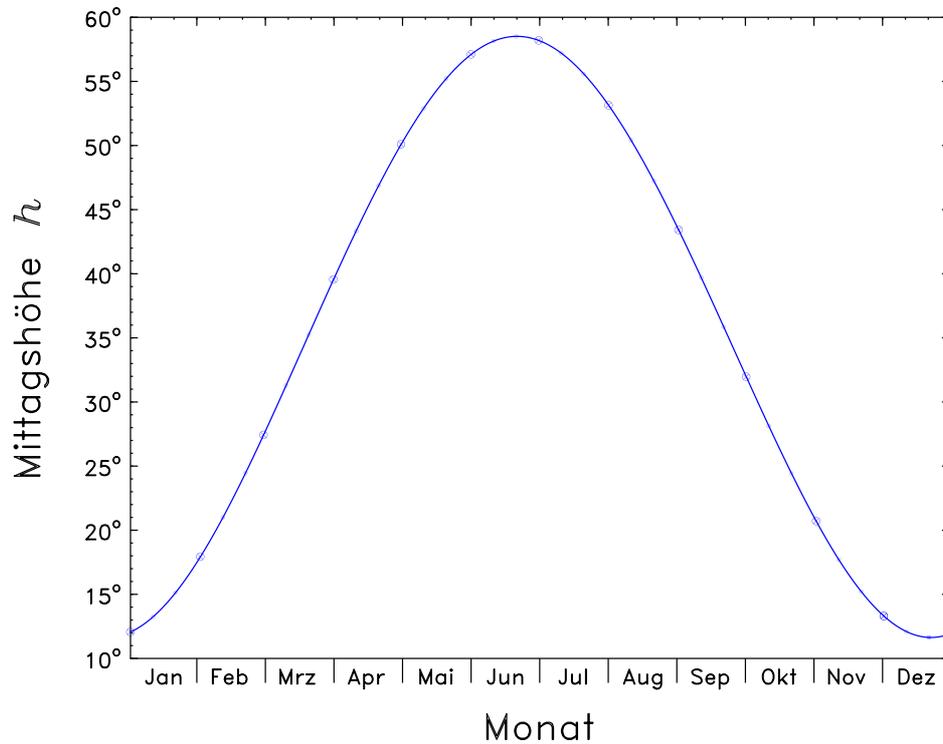


Abb. 2.1: Jahresverlauf der Mittagshöhe h für die Koordinaten der Mess-Station in Westerland auf Sylt.

Abbildung 2.1 zeigt den Jahresverlauf der Mittagshöhe, also des maximalen Sonnenhöhenwinkels zur Mittagszeit. Der Maximalwert h_{max} zum Sommeranfang am 21. Juni ergibt sich rechnerisch aus der geographischen Breite $\phi = 54.93^\circ\text{N}$ der Mess-Station und der Schiefe der Ekliptik von $23^\circ 27'$ zu

$$h_{max} = 90^\circ - \phi + 23.45^\circ = 58.52^\circ \quad (2.1)$$

Analog beträgt die niedrigste Mittagshöhe h_{min} zum Winteranfang am 22. Dezember

$$h_{min} = 90^\circ - \phi - 23.45^\circ = 11.62^\circ. \quad (2.2)$$

Eine andere Art der Darstellung zeigt Abbildung 2.2: Hier sind der Sonnenhöhenwinkel h bzw. der Zenitwinkel θ gegen den Azimut α für ausgewählte Tage aufgetragen. Als Parameter sind die Zeiten der entsprechenden Sonnenstände in MEZ angegeben. Man erkennt, dass in Westerland am 21. Juni (Sommersonnenwende) die Sonne im Nordosten bei einem Azimutwinkel von 45° aufgeht, im Tagesverlauf ihre höchste Mittagshöhe h_{max} erreicht und im Nordwesten bei einem Azimut von 315° untergeht. Am 21. März, also dem Frühlingsäquinoktium², geht die Sonne genau im Osten (90°) auf und im Westen (270°) unter. Dabei erreicht sie eine Mittagshöhe

²Äquinoktium: Tag- und Nachtbogen der Sonne beide mit 12 Stunden gleich lang.

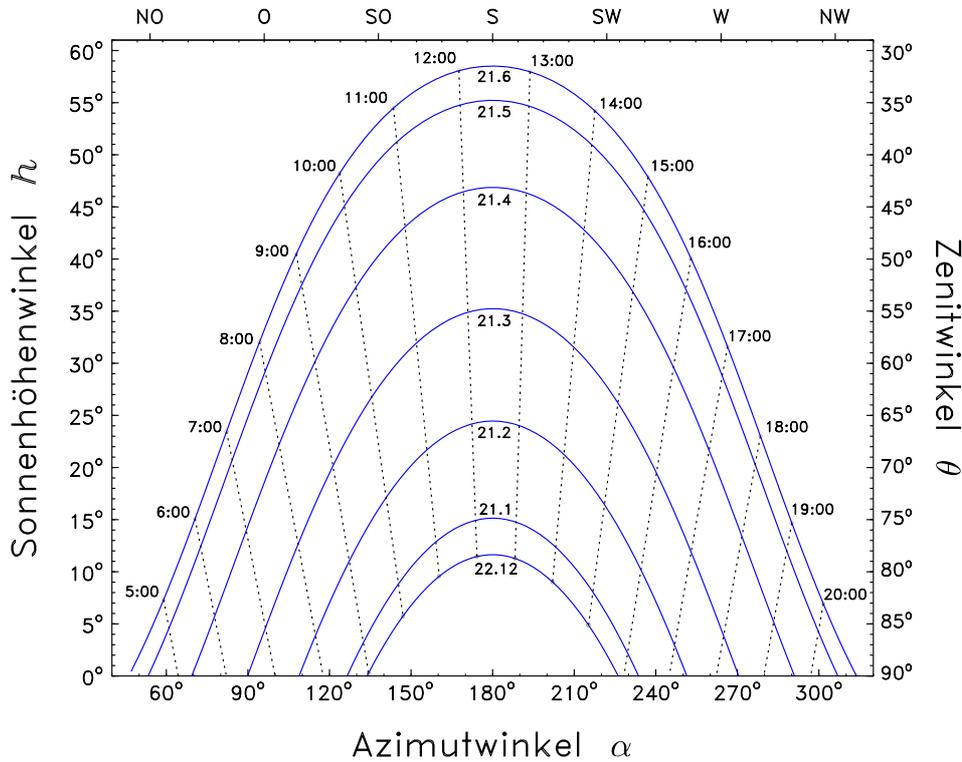


Abb. 2.2: Sonnenstandsdiagramm für die Mess-Station in Westerland auf Sylt. Zeiten in MEZ.

von 35.07° . Dies entspricht einem Azimutwinkel von 54.93° , der zum Zeitpunkt der Äquinoktien mit der geographischen Breite des Messortes übereinstimmt. Zur Wintersonnenwende am 22. Dezember geht die Sonne in Westerland im Südosten (135°) auf, erreicht ihre niedrigste Mittagshöhe h_{min} und geht im Südwesten (225°) unter.

Ebenfalls aus Abbildung 2.2 ersichtlich ist, dass die Zeit des Sonnenhöchststands (Kulminationszeit) in Westerland zwischen 12:00 und 13:00 MEZ liegt. Der Grund hierfür ist, dass innerhalb einer Zeitzone die mittlere Sonnenzeit eines einzigen Meridians (Längengreis) vereinbarungsgemäß auch für alle anderen Meridiane gilt. Innerhalb der Mitteleuropäische Zeitzone ist dies die mittlere Sonnenzeit des 15. östlichen Längengreises. Dies entspricht in Deutschland ungefähr der geographischen Länge von Görlitz (Sachsen). Demzufolge erreicht die Sonne auch nur dort exakt um 12:00 MEZ ihren Höchststand. Für alle westlich davon gelegenen Orte ist der Sonnenhöchststand um $\Delta \lambda \cdot 4$ min später, wobei $\Delta \lambda$ die Längendifferenz zum 15. Längengreis darstellt. Da die geographische Länge λ von Westerland 8.3° Ost beträgt, ist der Sonnenhöchststand hier im Mittel erst um 12:27³ MEZ.

Aufgrund der Schiefe der Ekliptik und dem ungleichförmigen Verlauf der Bahnbe-

³In La Coruña an der spanischen Atlantikküste ($\lambda \simeq 8^\circ$ West), welches auch der Mitteleuropäische Zeitzone angehört, ist Sonnenhöchststand sogar erst um 13:32 MEZ.

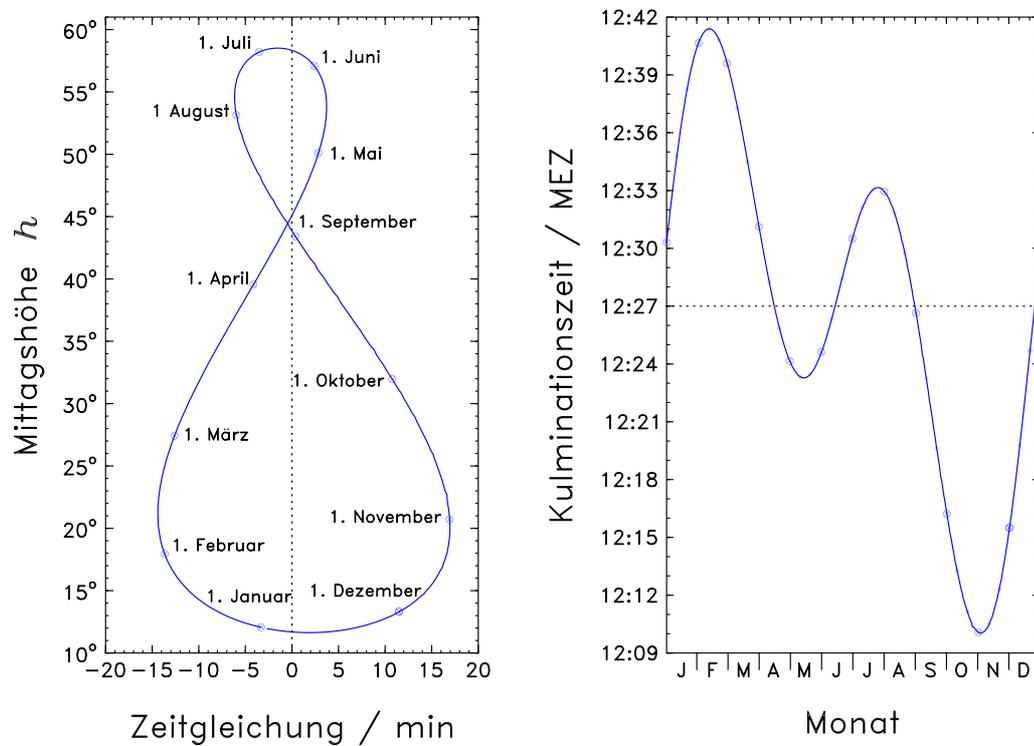


Abb. 2.3: Mittagshöhe h als Funktion der Zeitgleichung sowie Jahresverlauf der Kulminationszeit der Sonne.

wegung der Erde um die Sonne entsprechend dem 2. KEPLERSchen Gesetz⁴ verläuft auch die wahre Sonnenzeit (Zeit, die eine Sonnenuhr anzeigt) über das Jahr hinweg nicht gleichförmig. Aus diesem Grund wurde die mittlere Sonnenzeit eingeführt. Die Differenz zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit wird als Zeitgleichung bezeichnet. Diese ist in Abbildung 2.3 für die Koordinaten der Mess-Station in Westerland auf Sylt dargestellt. Die Zeit des Sonnenhöchststands schwankt demnach um die Mittlere Zeit um 12:27 MEZ. Die Extremwerte der Zeitgleichung, berechnet für das Jahr 2002, lauten:

	11. Februar	14. Mai	25. Juli	3. November
Zeitgleichung / min	-14.3	+3.75	-6.4	+16.4
Sonnenhöchststand / MEZ	12:41:23	12:23:16	12:33:09	12:10:02

Die folgende Abbildung 2.4 zeigt den Jahresverlauf der Zeiten des Sonnenauf- und Sonnenuntergangs sowie die daraus resultierende Tageslänge für Westerland auf

⁴Die Winkelgeschwindigkeit der Erde ist im Aphel (sonnenfernster Punkt, Entfernung 152.1 Mill. km) am geringsten und im Perihel (sonnennähester Punkt, Entfernung 147.1 Mill. km) am größten.

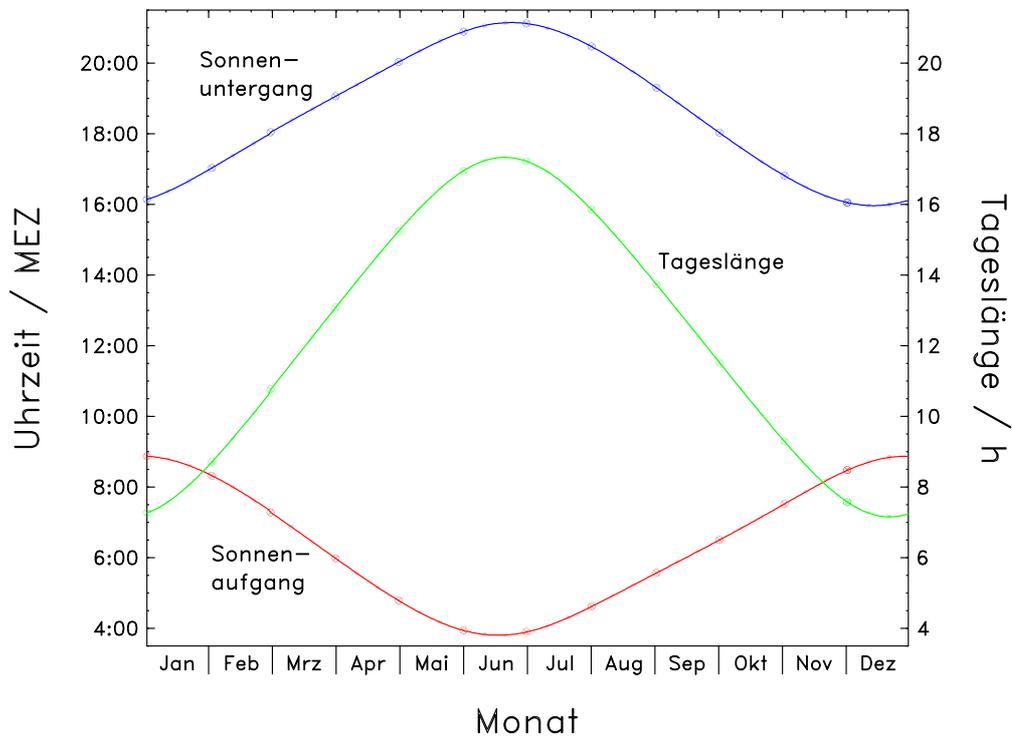


Abb. 2.4: Jahresverlauf der Zeit des Sonnenaufgangs, Sonnenuntergangs sowie der resultierenden Tageslänge für die Mess-Station in Westerland auf Sylt.

Sylt. Die Refraktion⁵ in der Erdatmosphäre, die eine scheinbare optische Anhebung der Sonne bewirkt, wurde dabei näherungsweise berücksichtigt [22, 82]. Für einen unmittelbar horizontal einfallenden Strahl beträgt die Refraktion etwa 34.9 Bogenminuten. Dies hat zur Folge, dass die Sonnenscheibe, deren mittlerer Winkeldurchmesser 32 Bogenminuten beträgt, tatsächlich schon vollständig unter dem Horizont steht, wenn sie sichtbar mit ihrem unteren Rand gerade den Horizont berührt. Mit zunehmendem Winkelabstand zum Horizont nimmt die Refraktion sehr schnell ab, wodurch die Verkürzung der vertikalen Achse (Stauchung) der untergehenden Sonnenscheibe erklärt wird. Bei einer am Äquator auftretenden Sonnenhöhe von 90° bzw. bei Sternen, die im Zenit stehen, ist die Refraktion Null. Da in Abbildung 2.4 der sichtbare Sonnenauf- bzw. -untergang unter Berücksichtigung der Refraktion dargestellt ist, ist die tatsächliche Tageslänge gegenüber einer rein astronomisch berechneten verlängert. Dieses zeigt sich zur Zeit der Äquinoktien: Die Tageslänge beträgt dann ungefähr 12 Stunden und 17 Minuten und nicht wie astronomisch berech-

⁵Zur Herleitung der terrestrischen Refraktion wird die Erdatmosphäre in einzelne Schichten aufgeteilt, deren optische Dichte mit zunehmender Höhe abnimmt. Aufgrund des SNELLIUSschen Brechungsgesetzes wird an jeder Grenzfläche das Licht zum Einfallslot hin gebrochen, so dass ein Himmelskörper einem Beobachter am Erdboden immer etwas höher am Himmel erscheint als er tatsächlich steht.

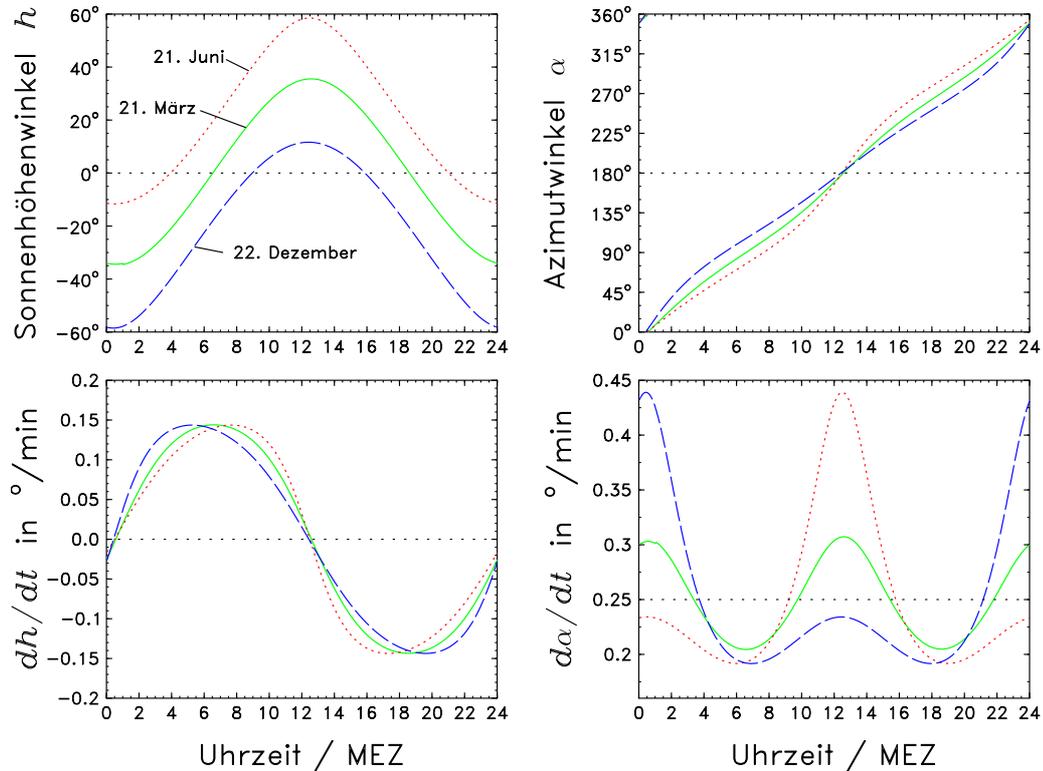


Abb. 2.5: Tagesverlauf der Sonnenhöhe h , des Azimuts α sowie deren zeitlichen Änderungen d/dt für den 21. Juni (\cdots), 21. März ($—$) und 22. Dezember ($---$).

net exakt 12 Stunden. Zur Zeit der Sommersonnenwende am 21. Juni ist die mögliche Sonnenscheindauer, also der Tagbogen der Sonne, mit etwa 17 Stunden und 22 Minuten maximal. Sonnenaufgang ist um 03:48 MEZ, Sonnenuntergang um 21:09 MEZ. Entgegengesetzte Verhältnisse herrschen zur Wintersonnenwende am 22. Dezember. Dann geht die Sonne erst um 8:50 MEZ auf und bereits um 16:01 MEZ wieder unter. Die mögliche Sonnenscheindauer beträgt 7 Stunden und 11 Minuten.

Von großem Interesse sind neben dem Tagesverlauf des Sonnenhöhen- und des Azimutwinkels insbesondere auch deren zeitlichen Änderungen. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchzuführenden Messungen im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung (vergl. Kapitel 3.6.3) müssen bezüglich ihrer Messdauer hierauf abgestimmt sein, um die Unschärfe der Winkelaufösung zu minimieren. In Abbildung 2.5 sind der Tagesverlauf des Sonnenhöhenwinkels h und dessen zeitliche Ableitung dh/dt sowie des Azimutwinkels α und dessen zeitliche Ableitung $d\alpha/dt$ für den 21. Juni, 21. März und 22. Dezember dargestellt.

Es zeigt sich, dass die zeitliche Änderung des Azimutwinkels α zur Zeit des Sonnenhöchststands am 21. Juni mit 0.44 Grad pro Minute ihren größten Wert annimmt. Innerhalb von sieben Minuten, der Dauer einer Skymap-Messung, wandert die Sonne folglich um etwa 3.1 Grad westwärts, zur Zeit der Äquinoktien noch

um ca. 2.2 Grad. Von größerer Bedeutung ist jedoch die zeitliche Änderung des Sonnenhöhenwinkels h . Zwei Stunden vor bzw. nach Sonnenhöchststand beträgt die zeitliche Änderung maximal 0.1 Grad pro Minute. Innerhalb von sieben Minuten beträgt die Höhenänderung der Sonne in diesem Zeitraum somit weniger als 0.7 Grad.

2.1.3 Extraterrestrische Strahlung der Sonne

Für das Leben auf der Erde stellt die Sonne praktisch die einzige natürliche Energiequelle dar. Weitere Energiequellen wie beispielsweise geotherme Energie des heißen Erdkerns sind im Vergleich dazu vernachlässigbar. Das Spektrum der von der Sonne emittierten elektromagnetischen Strahlung reicht von der kurzwelligen Röntgenstrahlung mit Wellenlängen unterhalb von 10 nm über den UV-Bereich, das sichtbare Licht und die Wärmestrahlung (Infrarot) bis hin zu der langwelligen Mikrowellen- und Radiowellenstrahlung mit Wellenlängen bis zu einigen hundert Metern. Das Emissionsspektrum der Sonne entspricht dabei näherungsweise⁶ dem eines Schwarzen Strahlers, einem idealisierten Körper, der alle einfallende Strahlung absorbiert (Absorptionsvermögen $A = 1$, Reflexionsvermögen $R = 0$) und sie in Bewegungsenergie seiner Atome und Moleküle umsetzt. Seine Abstrahlung hängt somit neben der Wellenlänge nur von seiner Temperatur ab. Für die spektrale Emission eines Schwarzen Strahlers als Funktion der Wellenlänge λ und der Temperatur T gilt das PLANCKSche Strahlungsgesetz in der Form [58]

$$E(\lambda, T) d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} d\lambda \quad (2.3)$$

mit: PLANCKSches Wirkungsquantum $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Js; BOLTZMANN-Konstante $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K und Lichtgeschwindigkeit $c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s. Abbildung 2.6 zeigt die spektrale Verteilung der Strahlung eines Schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 5800 Kelvin sowie ein außerhalb der Erdatmosphäre, von Satelliten gemessenes Sonnenspektrum (nach [83]). Aus dem PLANCKSchen Strahlungsgesetz lässt sich das WIENSche Verschiebungsgesetz ableiten, demzufolge sich mit steigender Temperatur des Schwarzen Strahlers das Maximum seiner spektralen Energieverteilung in Richtung zu kürzeren Wellenlängen verschiebt:

$$\lambda_{max} \cdot T = const. \quad \text{mit} \quad const. = 2.8978 \cdot 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K} \quad (2.4)$$

Durch Bestimmung dieses Maximums lässt sich auf diese Weise die Oberflächentemperatur der Sonne ermitteln. Entsprechend Abbildung 2.6 liegt das Maximum ihrer spektralen Energieverteilung bei etwa 500 nm, welches vom Menschen als blau-grünes Licht wahrgenommen wird. Hieraus errechnet sich eine Oberflächentemperatur der Sonne von annähernd 5800 K, entsprechend etwa 5500°C.

⁶Dass die Sonne kein idealer Schwarzer Strahler ist, zeigt sich am Effekt der Randverdunkelung: Am Sonnenrand sieht man in weniger tiefe und daher kühlere Schichten als in der Mitte der Sonnenscheibe, wodurch der Sonnenrand gegenüber der Mitte der Sonnenscheibe dunkler erscheint.

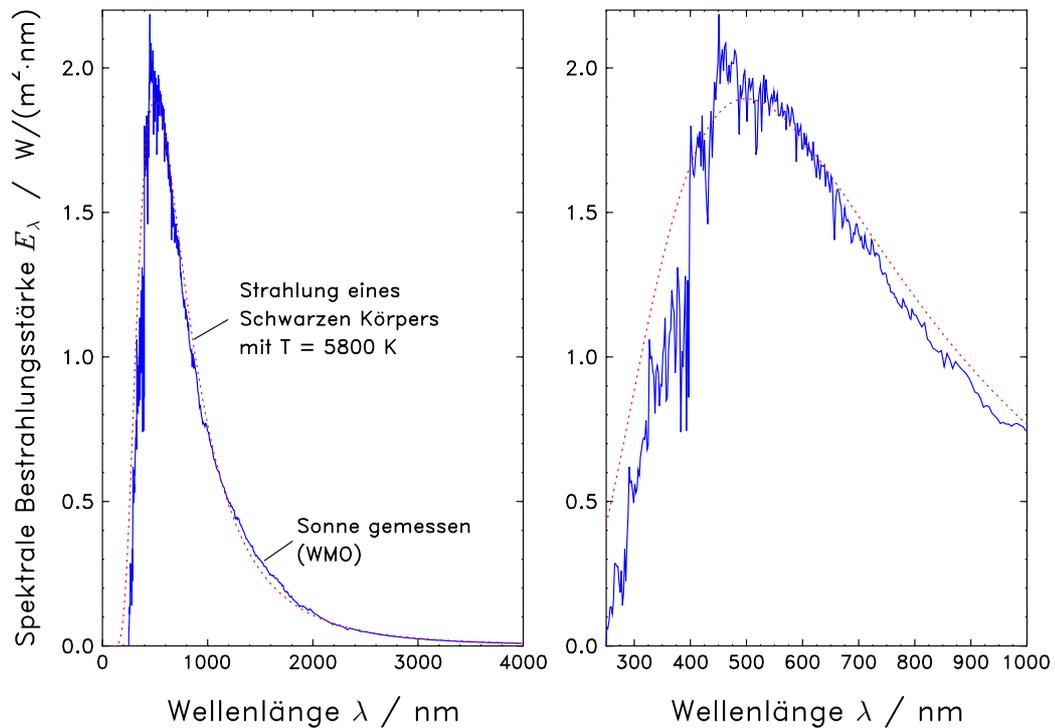


Abb. 2.6: *Extraterrestrische Bestrahlungsstärke der Sonne (—) (nach [83]) sowie berechnete Bestrahlungsstärke eines Schwarzen Strahlers mit $T = 5800\text{ K}$ (···), dargestellt mit unterschiedlichen Abszissenmaßstäben.*

Abbildung 2.6 zeigt weiterhin, dass der Verlauf des Sonnenspektrums durch deutlich sichtbare Einschnitte, den so genannten FRAUNHOFERSchen Linien, gekennzeichnet ist. Diese entstehen in der Atmosphäre der Sonne aufgrund von Absorption der emittierten Strahlung durch die dort vorkommenden Elemente. Nach Rückfall in den Grundzustand unter Emission von Strahlung tritt aufgrund der Isotropie der Abstrahlung eine Abschwächung in Durchstrahlungsrichtung ein. Die Wellenlänge der Strahlung ist dabei charakteristisch für das absorbierende Element oder Molekül sowie für dessen Ionisationszustand. Anhand der FRAUNHOFERSchen Linien lässt sich auf diese Weise die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre der Sonne bestimmen. Eine besonders intensiv ausgeprägte Linie befindet sich bei $\lambda = 393.36\text{ nm}$ (vergl. hierzu auch Abb. 2.7). Sie stammt von zweifach ionisiertem Kalzium Ca^{2+} und wird als Referenz für die Bestimmung der Wellenlängengenauigkeit der Spektralradiometer des Solaren UV-Messnetzes verwendet.

Die gesamte von der Sonne abgestrahlte Leistung beträgt etwa $P_{sol} \cong 3.8 \cdot 10^{26}\text{ W}$. Das Jahresmittel der spektralen Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung auf eine am Außenrand der Erdatmosphäre senkrecht zur Sonne ausgerichteten Fläche wird als extraterrestrische spektrale Bestrahlungsstärke bezeichnet. Eine Integration über alle Wellenlängen ergibt die extraterrestrische Gesamtstrahlung (Solarkonstante),

deren Wert angegeben wird mit

$$E_{ex} = \frac{P_{sol}}{4\pi\bar{R}^2} = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2. \quad (2.5)$$

Hierbei ist $\bar{R} = 1.491 \cdot 10^{11}$ m der mittlere Abstand zwischen Erde und Sonne. Die tatsächliche Einstrahlung am Außenrand der Atmosphäre schwankt aufgrund der im Jahresverlauf unterschiedlichen Entfernung um etwa ± 3.4 % um den Wert der Solarkonstante.

2.1.4 Strahlungstransfer durch die Erdatmosphäre

Die in die Erdatmosphäre eintretende solare Strahlung unterliegt dort vielfältigen Absorptions- und Streuprozessen, so dass nur ein Teil der Strahlung bis zur Erdoberfläche gelangt. Allgemein wird die Atmosphäre entsprechend ihrer vertikalen Temperaturverteilung in verschiedene Schichten eingeteilt [85]: Die unterste Schicht, die über Mitteleuropa bis in etwa 12 km Höhe reicht, wird als Troposphäre bezeichnet. In ihr nimmt die Temperatur mit steigender Höhe um etwa 6°C je Kilometer ab. In 12 km Höhe beträgt die Temperatur zwischen -60°C und -70°C . Da in der Troposphäre nahezu der gesamte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre enthalten ist, finden in ihr praktisch alle Wettererscheinungen wie Wolkenbildung, Regen, Sturm oder Gewitter statt. Die Obergrenze der Troposphäre, die Tropopause, die sich nur über einen geringen Höhenbereich erstreckt, ist dadurch gekennzeichnet, dass in ihr die Temperatur konstant verläuft. Diese sehr stabile Grenzschicht verhindert einen konvektiven Massenaustausch von der Troposphäre in die höheren Schichten, so dass auf diese Weise lediglich durch starke Aufwinde am Äquator und durch Vulkanausbrüche größere Mengen an Partikeln über die Tropopause hinaus in die nachfolgenden Schichten aufsteigen können. Zusätzlich zur Konvektion findet auch Transport durch Diffusion in die höheren Schichten statt.

Oberhalb der Tropopause folgt die Stratosphäre, in der die Temperatur als Folge der Absorption kurzweiliger extraterrestrischer Solarstrahlung wieder bis auf etwa 0°C bis $+10^\circ\text{C}$ in 50 km Höhe ansteigt. Dieser Temperaturanstieg erzeugt eine stabile Schichtung, so dass weitestgehend keine vertikale Luftbewegung mehr auftritt. Oberhalb der Stratosphäre befinden sich die Mesosphäre, die Thermosphäre (Ionosphäre) und bis in eine Höhe von etwa 3000 km die Exosphäre, woran sich der interstellare Raum anschließt. Da die letzteren für die Absorptions- und Streuprozesse keine entscheidende Rolle spielen, wird an dieser Stelle nicht näher auf sie eingegangen.

Tabelle 2.2 stellt die Verteilung der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke auf eine senkrecht zur Sonne ausgerichteten Fläche E_\perp der am Erdboden am 25.06.2001 bei einem Sonnenhöhenwinkel von $h = 58.5^\circ$ gemessenen Bestrahlungsstärke gegenüber. Die Spalte $E_\perp \cdot \sin(h)$ liefert die für den Messtag auf den herrschenden Einfallswinkel und den tatsächlichen Abstand Erde-Sonne korrigierten Werte. Die Einteilung der Wellenlängenbereiche erfolgt entsprechend WMO [87]. Diese unterscheidet sich zur Definition nach DIN [15] beim Übergang vom UVA- zum sichtbaren

Bezeichnung	nm	Extraterrestrisch			Westerland		Ratio
		E_{\perp}	$E_{\perp} \sin(h)$ (I)	Anteil	gemessen (II)	Anteil	$\frac{(II)}{(I)}$
		W/m ²	W/m ²	%	W/m ²	%	%
UVC	< 280	7.0	5.8	0.5	0.0	0.0	0.0
UVB	280 – 315	17.5	14.4	1.3	1.3	0.1	9.0
UVA	315 – 400	86.2	71.0	6.3	55.1	6.2	77.6
VIS	400 – 730	571.9	471.0	41.8	387.1	43.5	82.2
IR, Mikro-, Radiowellen	> 730	684.6	563.9	50.1	446.2	50.2	79.1
Gesamtstrahlung		1367.2	1126.1	100.0	889.7	100.0	79.0

Tab. 2.2: Verteilung der extraterrestrischen (nach [80, 83]) sowie der in Westerland am 25.06.2001 zur Zeit des Sonnenhöchststands gemessenen solaren Bestrahlungsstärke auf die entsprechend WMO [87] definierten Wellenlängenbereiche.

Spektralbereich (DIN: 380 nm) sowie beim Übergang vom sichtbaren zum IR-Bereich (DIN: 780 nm).

Der größte Teil der extraterrestrischen Gesamtstrahlung von zusammen 91.9 % entfällt auf den sichtbaren und den infraroten Bereich. Der UV-Bereich ist hingegen nur mit 8.1 % vertreten. Bei der in Westerland am 25.06.2001 gemessenen Strahlung reduziert sich der Anteil der UV-Strahlung auf 6.3 %. Das Verhältnis zwischen der in Westerland gemessenen und der extraterrestrischen Strahlung ist dabei im UVA-Bereich mit 77.6 % über 8fach höher als im UVB-Bereich, in dem lediglich 9.0 % der extraterrestrischen Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Strahlung aus dem UVC-Bereich gelangt nicht bis zur Erdoberfläche. Ähnlich der UVA-Strahlung verhält sich das sichtbare Licht, welches zu 82.2 % bis zur Erdoberfläche gelangt, sowie Strahlung aus dem IR-Bereich (79.1 %). Die gemessene Gesamtstrahlung von 889.7 W/m² liegt im Bereich der in Sylt aufgrund der geographischen Breite bei unbewölktem Himmel maximal möglichen Strahlung.

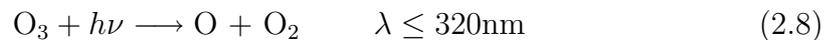
2.1.4.1 Absorption der UV-Strahlung in der Ozonschicht

Einer der wichtigsten Prozesse, der das Leben auf der Erde in der heutigen Form überhaupt erst ermöglicht, ist die bereits erwähnte Absorption der energiereichen solaren UV-Strahlung in der Stratosphäre. Innerhalb der Stratosphäre befindet sich in etwa 15 bis 50 km Höhe die so genannte Ozonschicht, die etwa 90 % des gesamten in der Erdatmosphäre vorkommenden Ozons enthält. Das Maximum der Ozonkonzentration befindet sich in Abhängigkeit von der geographischen Breite und der Jahreszeit in einer Höhe von etwa 22 km. Die Bildung und der Abbau stratosphärischen Ozons in der Ozonschicht wird in erster Linie durch die im Folgenden dargestell-

ten CHAPMAN-Reaktionen (2.6)–(2.9) beschrieben [26]: Ozon entsteht demnach aus der Dissoziation eines Sauerstoffmoleküls durch die in der Stratosphäre vorhandene kurzwellige UVC-Strahlung mit Wellenlängen unterhalb von 240 nm. In einem anschließenden Stoßprozess verbinden sich die entstandenen O-Radikale mit weiteren O₂-Molekülen zum Ozon. Als neutraler Stoßpartner M, der überschüssige Energiebeträge aufnehmen kann, tritt dabei häufig Stickstoff oder Sauerstoff auf:



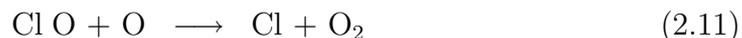
Ozon selbst wird ebenfalls durch solare UVB-Strahlung gespalten:



Die absorbierte Energie wird dabei als kinetische Energie auf die Dissziationsprodukte übertragen und so an die umgebende Luft als Wärme abgeführt. Die entstandenen O-Radikale können sich entsprechend (2.7) wieder zu Ozon verbinden oder aber durch Reaktionen mit O₃ weitere Ozonmoleküle dissoziieren:



Innerhalb der CHAPMAN-Reaktionen stehen somit Bildung und Dissoziation von Ozon im Gleichgewicht, so dass daraus kein Nettoverlust an stratosphärischem Ozon resultiert, obwohl die durchdringende UV-Strahlung maßgeblich reduziert wird. Die beschriebenen Gleichgewichtsreaktionen werden jedoch empfindlich durch das Vorhandensein der Fluorchlorkohlenwasserstoff-Verbindungen (FCKW) gestört. Aufgrund ihrer Reaktionsträgheit in der Troposphäre und der daraus folgenden außerordentlichen Stabilität können die FCKW erst nach Aufstieg in die Stratosphäre durch die dort vorhandene energiereiche UVC-Strahlung in ihre Bestandteile aufgespalten werden. Insbesondere die so frei gesetzten Chlor-Radikale Cl[•], die sich mit freien Sauerstoffatomen zu Chlormonoxid verbinden, bilden als Radikal und als Molekül ein Katalysatorpaar, welches den folgenden Katalysezyklus durchlaufen und dabei bereits in geringen Konzentrationen eine große Anzahl von Ozonmolekülen zerstören kann:



Als Folge dieser Reaktionen nimmt die stratosphärische Ozonkonzentration und somit deren Funktion als UV-Filter ab, wodurch wiederum der Anteil der UV-Strahlung an der Erdoberfläche zunimmt. Diese stark vereinfachte Darstellung berücksichtigt dabei noch nicht die saisonalen Schwankungen, Transportmechanismen des Ozons und das Ungleichgewicht zwischen Nord- und Südhalbkugel aufgrund unterschiedlicher meteorologischer und geographischer Verhältnisse. Für eine detaillierte Darstellung der sehr komplexen Vorgänge in der Atmosphäre sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (z.B. [6, 20, 21, 88]).

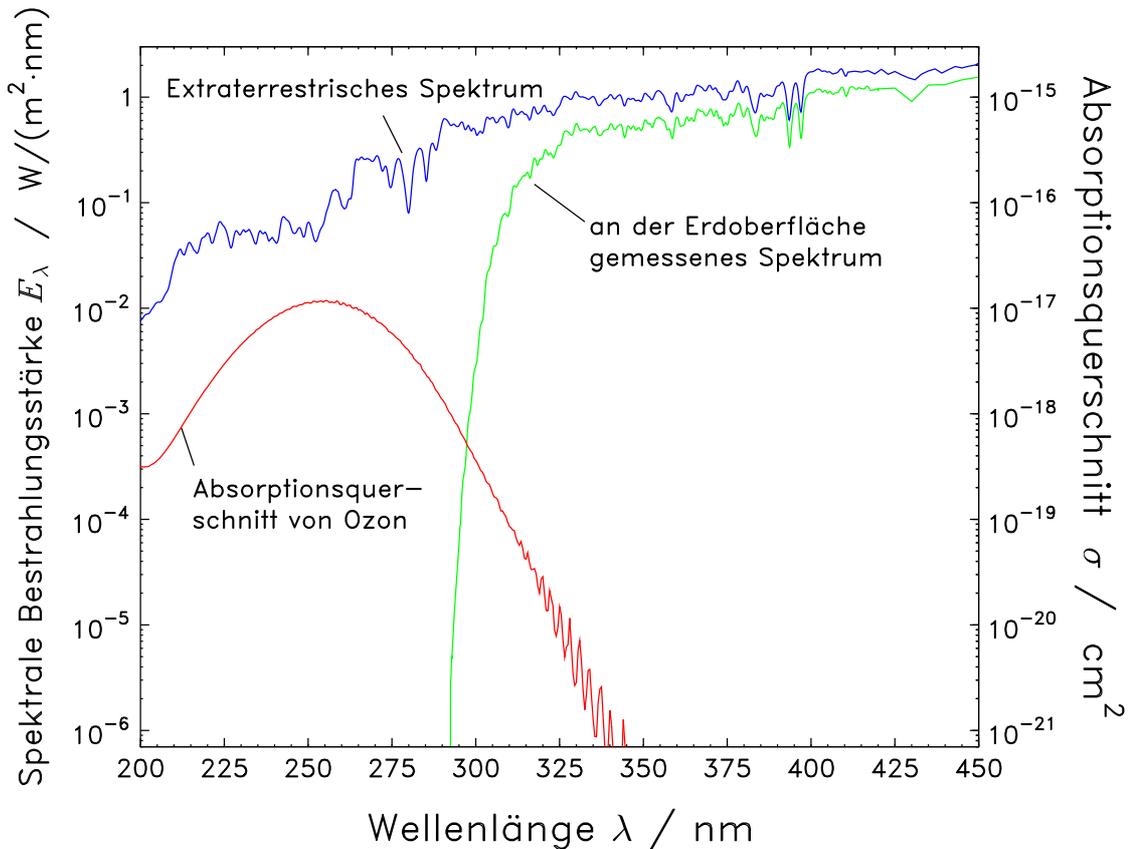


Abb. 2.7: Extraterrestrisches [80] sowie in Westerland kurz nach der Sommer-
sonnenwende zur Mittagszeit gemessenes solares Spektrum von 200 nm bis 450 nm.
Zusätzlich dargestellt ist der Absorptionsquerschnitt von Ozon [43].

Wie effektiv die Ozonschicht als UV-Filter wirkt, zeigt Abbildung 2.7. Dargestellt sind ein extraterrestrisches und ein in Westerland kurz nach der Sommer-
sonnenwende gemessenes solares UV-Spektrum sowie der Absorptionsquerschnitt
von Ozon. Das extraterrestrische Spektrum wurde im Rahmen einer Space-Shuttle-
Mission mit einem SUSIM-Gerät (Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor)
vermessen [10, 64, 80]. Die Daten für den Absorptionsquerschnitt des Ozons sind
der Veröffentlichung von L.T.MOLINA und M.J.MOLINA entnommen [43]. Deutlich
erkennbar ist, dass für Wellenlängen zwischen 330 nm und 410 nm das in Westerland
gemessene und das extraterrestrische Spektrum einen parallelen Verlauf aufweisen.
Für Wellenlängen unterhalb von 330 nm beginnt die Absorption durch das Ozon der-
art wirksam zu werden, dass zu kürzeren Wellenlängen hin die eintreffende Strahlung
immer stärker absorbiert wird. Unterhalb von etwa 290 nm gelangt schließlich keine
solare UV-Strahlung mehr bis zur Erdoberfläche. Der steile Abfall der spektralen
Bestrahlungsstärke, dessen Abnahme von 310 nm bis 290 nm etwa fünf Größenord-
nungen beträgt, wird auch als Ozon- oder UVB-Kante bezeichnet. Er verdankt seine
Entstehung dabei ausschließlich der Absorption der eintreffenden Strahlung in der
Ozonschicht.

Dass die am Erdboden gemessene UV-Strahlung im Bereich der UVB-Kante überexponentiell ansteigt, lässt sich wie folgt erklären: Beim Passieren einer infinitesimal dünnen Schicht der Dicke dz verringert sich der Strahlungsfluss ϕ aufgrund der Absorption in dieser Schicht um den Betrag $d\phi$:

$$d\phi = -\phi \cdot \rho \cdot \sigma \cdot dz \quad (2.13)$$

mit: Teilchendichte ρ in cm^{-3} und Wirkungsquerschnitt σ in cm^2 . Die Absorption in Schichten mit endlicher Dicke z erhält man durch Integration über z . Dieses führt zum LAMBERT-BEERSchen Gesetz für den Strahlungsfluss in homogenen Medien:

$$\phi(z) = \phi(0) \cdot e^{-\rho \cdot \sigma \cdot z} \quad (2.14)$$

Im Falle eines inhomogenen Mediums mit N verschiedenen Molekülsorten erweitert sich das Gesetz zu:

$$\phi(z) = \phi(0) \cdot e^{-\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \sigma_i \cdot z} \quad (2.15)$$

mit: ρ_i Teilchendichten und σ_i Absorptionsquerschnitte der einzelnen Molekülsorten. Dabei ist der Absorptionsquerschnitt von Ozon selbst eine Funktion der Wellenlänge, so dass sich das LAMBERT-BEERSche Gesetz für inhomogene Medien in der folgenden Form schreiben lässt:

$$\phi(z, \lambda) = \phi(0) \cdot e^{-\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \sigma_i(\lambda) \cdot z} \quad (2.16)$$

Der Absorptionsquerschnitt des Ozons steht dabei im negativen Exponenten. Da dieser im Bereich von 280 nm bis 340 nm näherungsweise exponentiell abnimmt (linear im logarithmischen Maßstab in Abb. 2.7), erfolgt für $z = \text{const.}$ eine Zunahme des Strahlungsflusses am Erdboden bei steigender Wellenlänge mit einem exponentiell wachsenden Exponenten, wodurch sich das steile Ansteigen der UVB-Kante ergibt.

Die Gesamtmenge des in der Atmosphäre enthaltenen Ozons wird in DOBSON-Units (DU) angegeben. Die Dimension einer DU errechnet sich über das ideale Gasgesetz zu 1 milliatm-cm. Dabei wird die gesamte vertikale Ozonkonzentration auf diejenige Schichtdicke umgerechnet, die diese Ozonmenge unter atmosphärischen Standardbedingungen (Luftdruck: $p_0 = 1013$ hPa, Temperatur: $T_0 = 0^\circ\text{C}$, Meereshöhe) einnehmen würde. Eine DOBSON-Unit entspricht dabei etwa 0.01 mm reiner Ozonsäule. Die gesamte Ozonschicht, die sich aufgrund des dort vorherrschenden geringen Drucks über eine Höhe von etwa 35 km ausdehnt, entspricht somit einer etwa 3 bis 4 mm hohen Ozonsäule, entsprechend Werten zwischen 300 und 400 DU. Dabei schwankt die Ozonsäule zwischen 390 DU in den Frühjahrsmonaten und 280 DU im Spätherbst. Die Monatsmittelwerte des Gesamt Ozons der Jahre 1979 bis 1983 zeigt Abbildung 2.8. Die entsprechenden Messungen wurden vom Meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt.

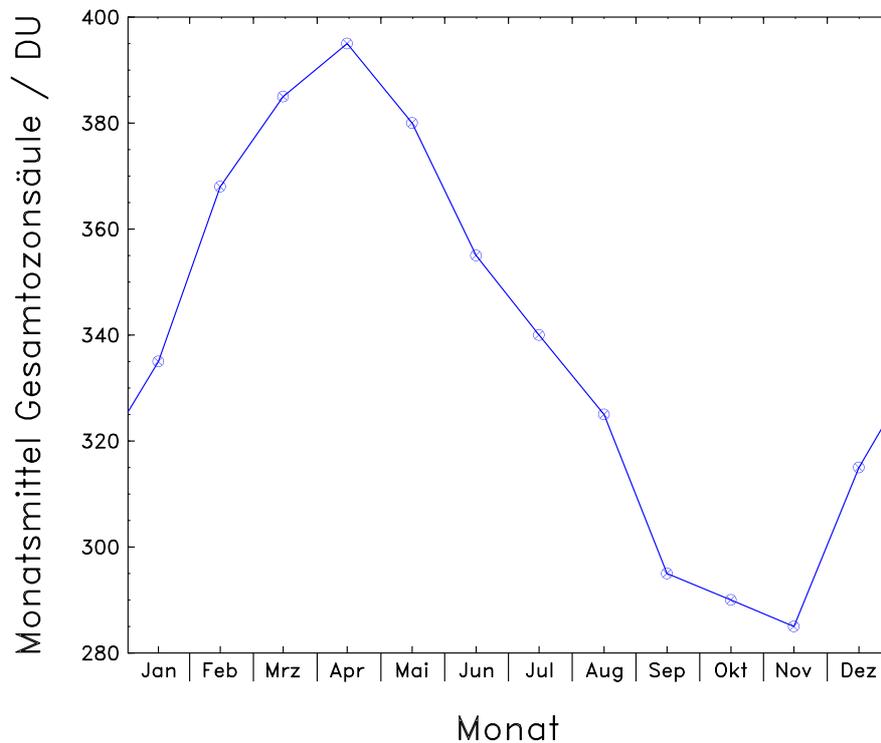


Abb. 2.8: Jahresverlauf der mittleren Monatswerte der Ozonsäule über Europa (50° Nord) von 1979 bis 1983 (nach [88]).

2.1.4.2 Rayleigh-Streuung und Mie-Streuung

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

An den Atomen oder Molekülen der Luft, deren Durchmesser mindestens eine Größenordnung kleiner als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist, kommt es zur so genannten RAYLEIGH-Streuung [49]. Diese lässt sich anhand des Modells eines schwingenden Dipols erklären: Im Feld eingestrahelter, unpolarisierter Transversalwellen werden die positiven und negativen Ladungen der Luftmoleküle angeregt, gegeneinander Schwingungen auszuführen. Jedes Molekül entspricht dabei aufgrund des oszillierenden induzierten Dipolmoments einem HERTZschen Dipol. Dieser strahlt seinerseits linear polarisierte Transversalwellen ab,⁷ wobei die Abstrahlung senkrecht zur Schwingungsrichtung maximal und in Schwingungsrichtung

⁷Auf die Polarisation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da die Eingangsoptik des Mess-Systems die zu messende Strahlung vollständig depolarisiert.

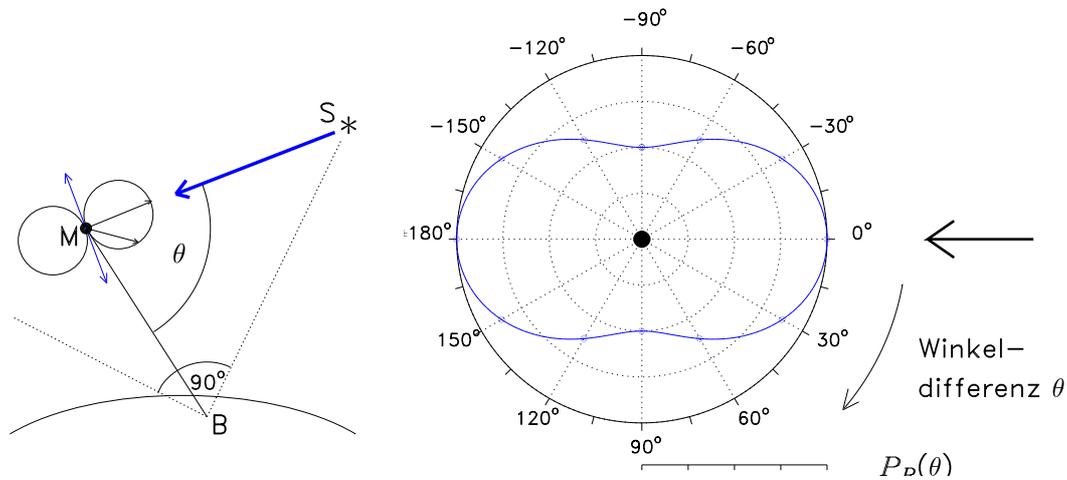


Abb. 2.9: Veranschaulichung (links) und Phasenfunktion $P_R(\theta)$ (rechts) der RAYLEIGH-Streuung.

Null ist. Da die Orientierung der Luftmoleküle in der Atmosphäre regellos verteilt ist, findet die Dipolstrahlung gleichmäßig in alle Raumrichtungen statt [31].

Betrachten wir ein Molekül M , das von einem Beobachter B in Richtung θ relativ zur Sonne S gesehen wird. Die Amplitude der durch die Transversalwellen induzierten Dipolstrahlung, die von B registriert wird, ist proportional zu $\cos\theta/r$. Für die dem Quadrat der Amplitude proportionale Intensität gilt somit: $I \propto \cos^2\theta/r^2$. Schwingt der Dipol von M senkrecht zur Richtung MS in der Ebene MSB , so ist die Dipolstrahlung maximal ($=1$). Schwingt der Dipol von M hingegen senkrecht zur Richtung MS und senkrecht zur Ebene MSB , so entspricht die Dipolstrahlung nur einem Anteil entsprechend $\cos^2\theta/r^2$. Die gestreute Strahlungsdichte ist demzufolge eine Funktion der Winkeldifferenz θ zwischen einfallender und gestreuter Strahlung und es gilt:

$$P_R(\theta) \propto 1 + \cos^2\theta \quad (2.17)$$

Die Strahldichte der Vorwärts- und Rückwärtsstreuung ist somit doppelt so groß wie die Streuung, die unter einem Winkel von $\theta = \pm 90^\circ$ zur Einfallsrichtung beobachtet werden kann. Des Weiteren lässt sich über den Streuquerschnitt der Dipolstrahlung herleiten, dass die Intensität I des Streulichts im Wesentlichen umgekehrt proportional zur vierten Potenz⁸ der Wellenlänge λ ist:

$$I_R(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.18)$$

Als Folge dessen wird Strahlung am kurzwelligen Ende des sichtbaren Bereichs bei einer Wellenlänge von 380 nm (violett) etwa 17.8 mal stärker gestreut als am langwelligen Ende bei 780 nm (dunkelrot). Hieraus resultiert einerseits der blaue Farbton

⁸Tatsächlich beträgt der Wellenlängenexponent 4.08, da die Theorie vom Vakuum-Brechungsindex $n = 1$ ausgeht.

des gestreuten Himmelslichts und andererseits als komplementäre Erscheinung die rote Farbe der tief am Horizont stehenden Sonne [5, 8, 36].

An atmosphärischen Schwebteilchen wie beispielsweise Nebel- oder Wolkentröpfchen sowie an Staubpartikeln (Aerosole), deren Durchmesser im Bereich der Wellenlänge der einfallenden Strahlung liegt, kommt es zur MIE-Streuung [40]. Diese Teilchen sind zu groß, um von einer transversalen Lichtwelle gleichmäßig polarisiert zu werden. Die Richtungsabhängigkeit wird wesentlich komplizierter, wobei bei zunehmender Teilchengröße die Vorwärtsstreuung dominiert:

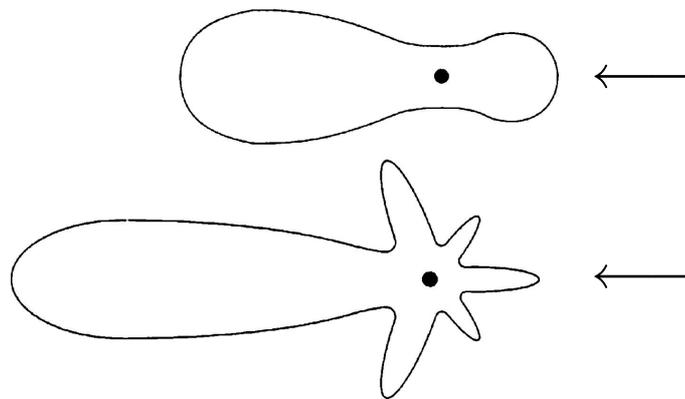


Abb. 2.10: Phasenfunktion $P_M(\theta)$ der MIE-Streuung (nach [25]); Oben: Größe der Streukörper etwa ein Viertel der Wellenlänge; Unten: Streukörper größer als die Wellenlänge.

Im Gegensatz zur RAYLEIGH-Streuung ist die Intensität der MIE-Streuung nicht oder nur kaum von der Wellenlänge abhängig. Daher ist MIE-gestreutes (weißes) Sonnenlicht ebenfalls (grau-)weiß wie beispielsweise in Wolken oder im Nebel. Auch die Aufhellung des Himmelsblau in Horizontnähe oder über Städten und Industrieanlagen erfolgt durch MIE-Streuung durch das in der Troposphäre enthaltene Aerosol.

2.2 Medizinische Grundlagen

2.2.1 Aufbau der Haut

Auf die Körperoberfläche auftreffende ultraviolette Strahlung dringt in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Intensität der Einstrahlung in unterschiedlich tiefe Schichten der Haut ein. Die längerwellige UVA-Strahlung kann dabei bis in die Unterhaut gelangen, die kurzwellige UVB-Strahlung hingegen wird bereits in der Hornschicht stärker absorbiert und gelangt entsprechend nur bis in die Stachelzellschicht. Der Grund der unterschiedlichen Eindringtiefen ist die wellenlängenabhängige Wechselwirkung der UV-Strahlung mit den photosensiblen Molekülen der Haut, wie beispielsweise Proteinen, Melanin oder der DNA. Die Unterteilung der Haut in ihre einzelnen Schichten ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

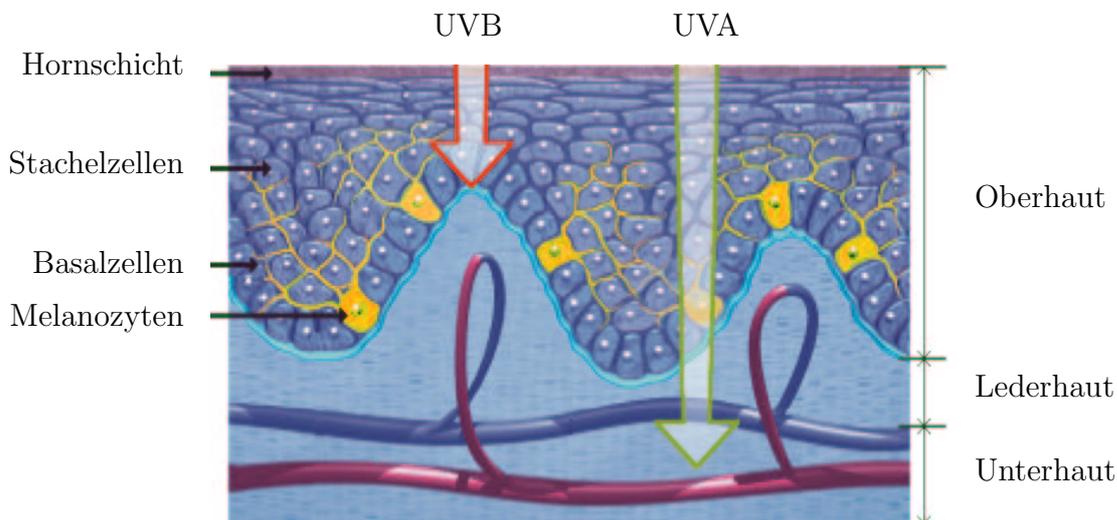


Abb. 2.11: Unterteilung der Hautschichten und Eindringvermögen der UV-Strahlung (nach [79]).

Grundsätzlich wird zwischen Unterhaut, Lederhaut und Oberhaut unterschieden. Die am tiefsten liegende Unterhaut, die überwiegend aus Bindegewebe und Fettzellen besteht, stellt die Verbindung zwischen der darüberliegenden Lederhaut und den Muskeln und Knochen her. In der Lederhaut (Dermis) befinden sich Blut- und Lymphgefäße, Nervenzellen, Schweiß- und Talgdrüsen. Die sichtbare Oberhaut (Epidermis) ist zwischen 0,1 mm (Augenlid) und etwa 1 mm (Fuß-Sohle) dick. Sie ist unterteilt in die Basalzell-, Stachelzell- und Hornschicht. Die Basalzellschicht besteht aus einer einzigen Lage sich ständig teilender Zellen. In einem etwa dreiwöchigen Zyklus werden diese Zellen an die Hautoberfläche transportiert, wobei sie zunehmend Keratin (Horn) bilden. Ihre Zellteilungsrate kommt schließlich zum Erliegen und der Zellkern löst sich auf. Die abgestorbenen, verhornten Zellen (Keratinocyten) werden dann als oberste Hornschicht im Zuge der Hauterneuerung abgerieben.

Ebenfalls in der Basalzellschicht befinden sich die Melanozyten (Pigmentzellen), die durch UV-Bestrahlung angeregt werden, Melanin zu produzieren. Dieses gelangt über kleine Arme (Dendriten) direkt in die Stachelzellen. Die dadurch eingefärbten Stachelzellen bewirken die sichtbare Bräunung der Haut (Sofortpigmentierung). Ebenfalls durch UV-Strahlung angeregt, beginnen die Pigmentzellen sich zu teilen. Durch die steigende Anzahl sowie einer Vergrößerung der Melanozyten wird mit einer Zeitverzögerung von einigen Tagen eine intensivere, länger anhaltende Bräunung der Haut erzielt. Die Spätpigmentierung ist ein natürlicher Schutzmechanismus, um darunter liegende Hautschichten vor der UV-Strahlung zu schützen. Einen noch effektiveren Schutz bewirkt die ebenfalls UV-induzierte Ausbildung der so genannten Lichtschwiele, einer nicht-sichtbaren Verdickung der obersten Hornschicht [50].

Im Zuge einer UV-Exposition kommt es zu photophysikalischen und photochemischen Prozessen in der Haut, bei denen die UV-Strahlung von der DNA, der Trägerin der Erbinformation und wichtigem hauteigenen Chromophor, absorbiert werden kann. UV-Strahlung kann aber auch Moleküle dissoziieren, so dass beispielsweise reaktive Sauerstoffverbindungen entstehen. Aus beiden Fällen können gravierende Schädigungen der Erbinformation der Zelle resultieren, wie beispielsweise Veränderungen in der molekularen Geometrie der DNA oder die Entstehung von DNA-Strangbrüchen. Die Zelle verfügt zwar über eigene molekulare Reparaturmechanismen [41]. Bei einer großen Zahl von Veränderungen arbeiten diese jedoch nicht immer vollständig fehlerfrei, oder sie können durch angeborene genetische Faktoren fehlreguliert sein. DNA-Schäden, die sich akkumulieren, können so im Laufe eines Lebens zur Ausbildung von Hauterkrankungen bis hin zum Hautkrebs führen.

Bereits bei Überschreiten einer bestimmten UV-Bestrahlungsdosis, der Minimalen Erythemalen Dosis (MED), treten akute Hautschäden auf, die nach einigen Stunden mit einer Rötung der Haut, dem Sonnenbrand, einhergehen. Diese entzündliche Hautrötung ist auf photochemische Prozesse, die mit der Bildung von Zellgiften verbunden ist, sowie auf eine gefäßerweiternde Wirkung der UV-Strahlung zurückzuführen. Sind die Schädigungen der DNA nach übermäßiger UV-Bestrahlung für Reparaturvorgänge zu weit fortgeschritten, so kommt es zum programmierten Zelltod, der Apoptose, bei der großflächige Hautareale absterben. Auch kann es aufgrund der immunsuppressiven Wirkung der UV-Strahlung leichter zu einem Auftreten von Infektionskrankheiten kommen. Ein Beispiel hierfür ist das Ausbrechen von Herpesviren im Lippenbereich nach übermäßiger UV-Exposition.

Die Empfindlichkeit der Haut gegenüber UV-Bestrahlung und somit das Einsetzen eines Sonnenbrandes hängt dabei entscheidend vom individuellen Hauttyp ab. Entsprechend der Reaktion auf natürliche UV-Bestrahlung und der Möglichkeit der Pigmentierung werden für die weiße Bevölkerung die in Tabelle 2.3 genannten Hauttypen unterschieden. Die jeweils angegebene Dauer bis zum Erreichen der minimalen Erythemdosis bezieht sich dabei auf eine Sonnenexposition in mittleren europäischen Breitengraden zur Zeit des Sonnenhöchststandes in den Sommermonaten. In Regionen nahe des Äquators sind diese Zeiten deutlich geringer [70].

Hauttyp	Bezeichnung	Beschreibung	Reaktion auf Sonnenexposition	Dauer bis MED
I	Keltischer Typ (2 %)	auffallend helle Haut, rötliche bis hellblonde Haare, blaue Augen	Immer Sonnenbrand, auch nach wiederholter Bestrahlung kaum Bräunung	5 bis 10 Minuten
II	Hellhäutiger Europäer (12 %)	helle Haut, blonde bis dunkelblonde Haare, blaue o. grüne Augen	Fast immer Sonnenbrand, mäßige Bräunung nach wiederholter Bestrahlung	10 bis 20 Minuten
III	Dunkelhäutiger Europäer (78 %)	helle bis hellbraune Haut, dunkelblonde – braune Haare, graue, braune Augen	Gelegentlich Sonnenbrand, fortschreitende Bräunung	20 bis 30 Minuten
IV	Mediterraner Typ (8 %)	hellbraune bis braun Haut, dunkelbraune bis schwarze Haare, dunkle Augen	Sehr selten Sonnenbrand, schnell einsetzende tiefe Bräunung	über 40 Minuten

Tab. 2.3: *Bezeichnung und Beschreibung der verschiedenen europäischen Hauttypen und der Reaktion auf UV-Bestrahlung. Darüber hinaus eingetragen ist die Dauer bis zum Erreichen der Sonnenbrandschwelle bei Sonnenexposition in mittleren europäischen Breitengraden zur Zeit des Sonnenhöchststands.*

2.2.2 Wirkungsfunktionen

Die unterschiedliche Wirksamkeit einzelner Wellenlängen, einen biologischen Vorgang wie beispielsweise die Ausbildung eines Erythems zu erzeugen, wird durch Wirkungsfunktionen beschrieben, wie sie in Abbildung 2.12 dargestellt sind. Es zeigt sich anhand der Wirkungsspektren für das Erythem [39] und zur Spätpigmentierung, dass weitestgehend nur UVB-Strahlung mit Wellenlängen unterhalb von etwa 320 nm für diese Effekte verantwortlich ist. Die innerhalb weniger Stunden nach UV-Bestrahlung einsetzende Sofortpigmentierung sowie der Effekt vorzeitiger Hautalterung werden hingegen überwiegend durch Strahlung aus dem UVA- sowie dem kurzwelligeren sichtbaren Spektralbereich verursacht. Der wirksamste Schutz vor UV-Bestrahlung wird somit durch denjenigen Wellenlängenbereich erzielt, der auch für das Ausbilden eines Sonnenbrands verantwortlich ist.⁹ Hieraus resultiert die allgemeine Empfehlung einer langsamen Gewöhnung der Haut an UV-Bestrahlung, um einen körpereigenen Schutz aufzubauen ohne jedoch die Erythemschwelle zu überschreiten [55].

⁹Hieran zeigt sich, dass Solarien, die UVB-Strahlung komplett durch entsprechende Filter unterdrücken, kaum einen effektiven Lichtschutz in der Haut aufbauen, sondern überwiegend eine kurzfristige Sofortpigmentierung sowie vorzeitige Hautalterung bewirken.

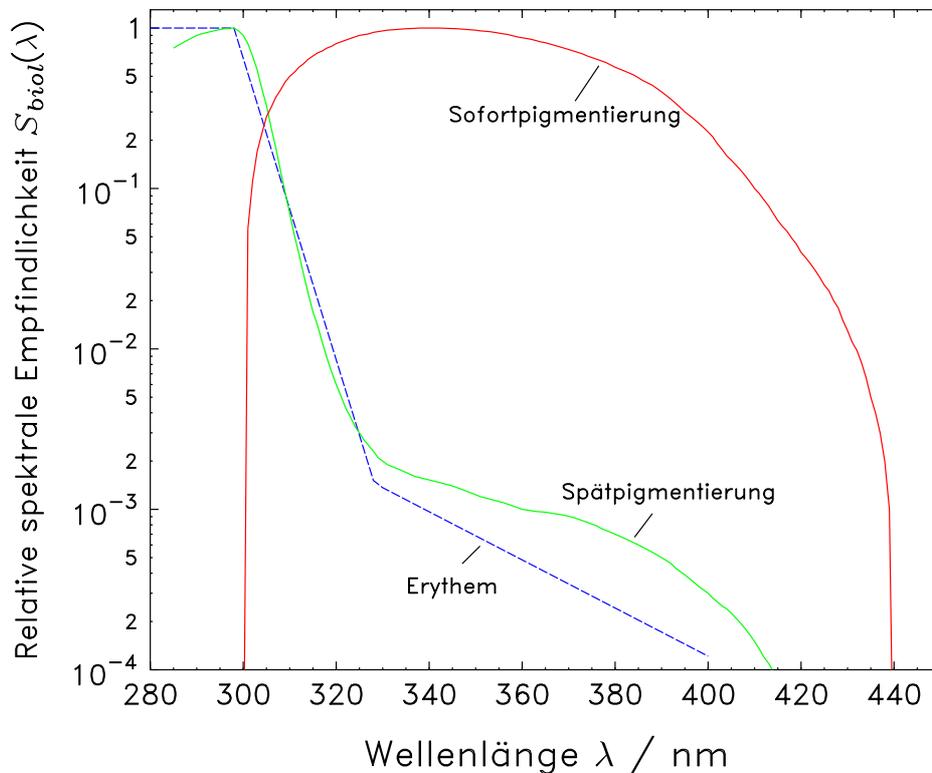


Abb. 2.12: Relative spektrale Empfindlichkeit $S_{biol}(\lambda)$ (Wirkungsfunktion) für die biologischen Prozesse der Sofort- und Spätpigmentierung sowie der Ausbildung eines Erythems (nach [16]).

Durch Vergleich der Absolutwerte der Erythemfunktion bei unterschiedlichen Wellenlängen zeigt sich, dass die Wirksamkeit im UVB-Bereich bei einer Wellenlänge von 300 nm fast 10.000-fach höher ist als am Beginn des sichtbaren Bereichs bei einer Wellenlänge von etwa 400 nm. Zur Ausbildung eines Sonnenbrands bedarf es hier also einer etwa 10.000-fach niedrigeren Bestrahlungsstärke bzw. einer entsprechend kürzeren Zeitdauer als bei Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 400 nm.

Welcher Wellenlängenbereich dabei im Tagesverlauf die höchste erythemale Wirksamkeit entwickelt, zeigt Abbildung 2.13. Dargestellt sind im oberen Bild neben der Erythemfunktion $S_{Er}(\lambda)$ sechs Spektren, die zur Zeit der Sommersonnenwende am 16.06.1999 bei Sonnenhöhenwinkeln von 10° bis 50° sowie bei 58.5° bei unbewölktem Himmel vermessen wurden. Beim Vergleich der beiden Spektren beim Sonnenhöhenwinkel von 10° und von 58.5° fällt auf, dass die Zunahme der spektralen Bestrahlungsstärke bei einer Wellenlänge von 380 nm etwa eine Größenordnung, bei 300 nm fast drei Größenordnungen beträgt. Die Begründung hierfür liegt in der kürzeren optischen Weglänge der eintreffenden Strahlung bei hohen Sonnenständen und der damit verbundenen Abnahme der Absorption in der Ozonschicht (vergl. Kap. 2.1.4.1).

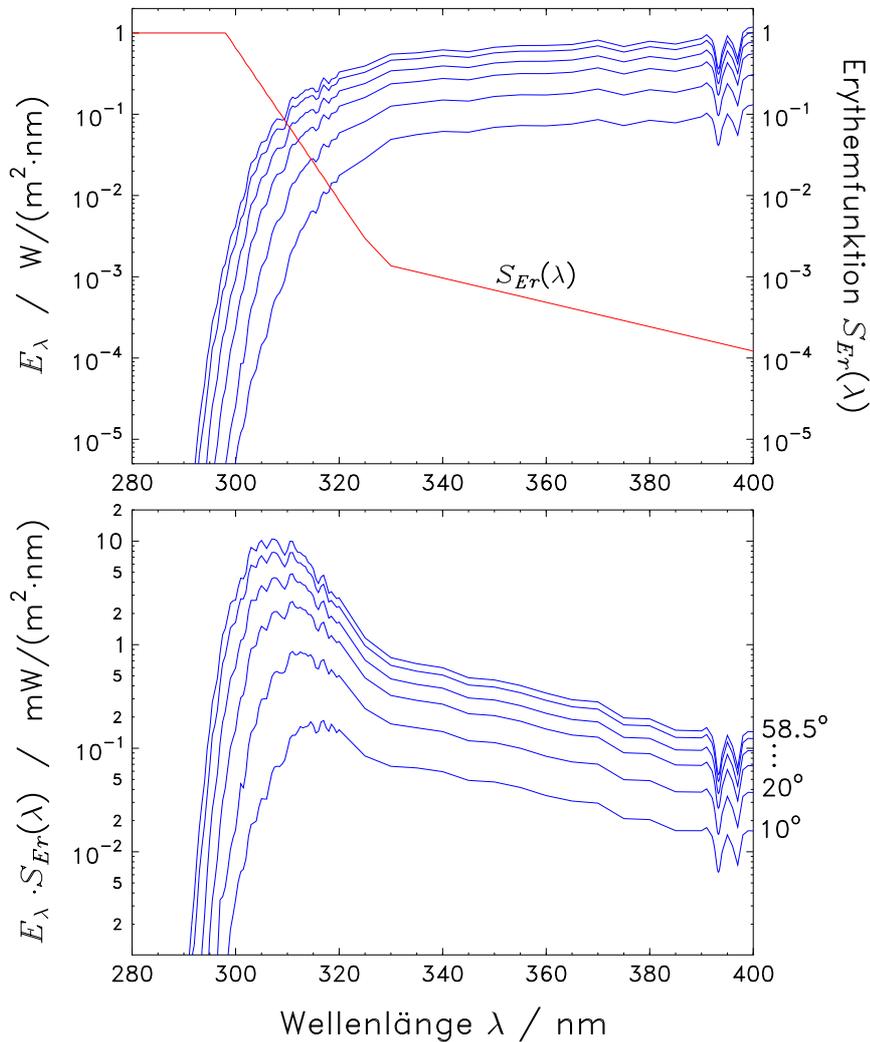


Abb. 2.13: *Oben: In Westerland bei Sonnenhöhenwinkeln von 10° bis 50° sowie bei 58.5° gemessene UV-Spektren sowie Wirkungsspektrum des Erythems. Unten: Produkt der gemessenen Spektren mit der Erythemfunktion.*

Die Spektren der erythemwirksamen spektralen Bestrahlungsstärke $E_\lambda \cdot S_{Er}(\lambda)$ (unteres Bild) ergeben sich aus der Multiplikation der gemessenen Spektren mit dem Wirkungsspektrum des Erythems. Es zeigt sich, dass bei Sonnenhöhenwinkeln von über 50° das Maximum der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke im UVB-Bereich bei einer Wellenlänge von etwa 307 nm liegt [78]. Die Intensität der UV-Strahlung nimmt dabei zur Zeit des Sonnenhöchststands maximale Werte an, so dass die Gefahr eines Sonnenbrandes in diesem Zeitraum am größten ist. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Messung der direkten sowie der diffus aus dem Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung bei dieser Wellenlänge von 307 nm durchgeführt.

Darüber hinaus wird bei einer Wellenlänge von 380 nm im UVA-Bereich gemessen, da hier die absolute Bestrahlungsstärke im UV-Bereich am höchsten ist und die

Wirkungsfunktion der Sofortpigmentierung noch im Bereich von etwa 60 % liegt. Um die Eigenschaften der ultravioletten Strahlung mit denen des sichtbaren Bereichs vergleichen zu können, werden zusätzlich Messungen bei einer Wellenlänge von 550 nm, also im Bereich der maximalen Empfindlichkeit des menschlichen Auges, durchgeführt.

2.2.3 Wirkungen und Risiken der UV-Strahlung

Zu den positiven Wirkungen der UV-Strahlung auf den Menschen gehören die Vitamin-D₃-Synthese, die Verbesserung der Heilung von Hauterkrankungen wie Neurodermitis oder Psoriasis (Schuppenflechte) sowie der Einfluss auf das psychische Wohlbefinden [11, 60]. Letzterer ist dabei jedoch überwiegend auf den sichtbaren und den wärmenden, infraroten Strahlungsanteil zurückzuführen.

Bei einer Beurteilung der Wirkungen der UV-Strahlung überwiegen jedoch die gesundheitlichen Risiken: Nach jahrelanger und häufig übermäßiger UV-Exposition kann es zu dauerhaften Veränderungen an der Haut kommen, wobei die Ausbildung von Hautkrebs die schwerwiegendste Spätfolge übermäßiger UV-Bestrahlung darstellt [86]. Je nachdem welche Zellart der Oberhaut geschädigt ist, werden drei Krebsarten unterschieden: Basalzellkrebs, Stachelzellkrebs (Plattenepithelkarzinom) sowie Malignes Melanom (Entartung der Melanozyten, Schwarzer Hautkrebs). Die beiden ersten Krebsarten werden auch als nicht-maligne Melanome bezeichnet, da sie nur in sehr geringem Maße Metastasen bilden. Sowohl beim Stachelzellkarzinom als auch beim Basalzellkarzinom ist der Zusammenhang zwischen UV-Exposition und Ausbildung des Hautkrebses eindeutig erwiesen [42]. Sie treten fast ausschließlich in Hautregionen auf, die häufig der Sonne ausgesetzt sind (Gesicht, Ohren, Handrücken usw.). Da sich beide Karzinome langsam über viele Jahre hinweg ausbilden, treten sie überwiegend in höherem Lebensalter ab dem 6. Lebensjahrzehnt auf. Die Sterblichkeitsrate liegt bei weniger als 1 % [12, 79]. Die Inzidenz (Anzahl der neu aufgetretenen Fälle) ist in Deutschland seit 1970 deutlich angestiegen, wie aus Abbildung 2.14 hervorgeht. Die Werte basieren dabei auf einer Auswertung der Jahresberichte des Epidemiologischen Krebsregisters Saarland [17].

Als bösartige Neubildung der Melanozyten tritt das Maligne Melanom im Gegensatz zu den Karzinomen häufig auch an bedeckten Körperstellen auf. Dennoch besteht kein Zweifel daran, dass übermäßige UV-Exposition insbesondere in der Kindheit die Entstehung des Malignen Melanoms begünstigt, obwohl die eigentlichen Entstehungsmechanismen noch unklar sind [27]. Besonders Personen mit sehr vielen Pigmentmalen und hellem Hauttyp haben ein bis zu 100-fach erhöhtes Risiko, im Laufe ihres Lebens ein Malignes Melanom zu entwickeln [13, 79]. Dabei kann das Melanom bereits im 3. oder 4. Lebensjahrzehnt auftreten. Bei einer frühen Diagnose liegt die Überlebenswahrscheinlichkeit bei über 90 %, bei fortgeschrittener Metastasierung sinkt sie rapide auf unter 10 % [2]. Auch beim Malignen Melanom ist die Zahl der Inzidenzen in Deutschland seit 1970 deutlich angestiegen.

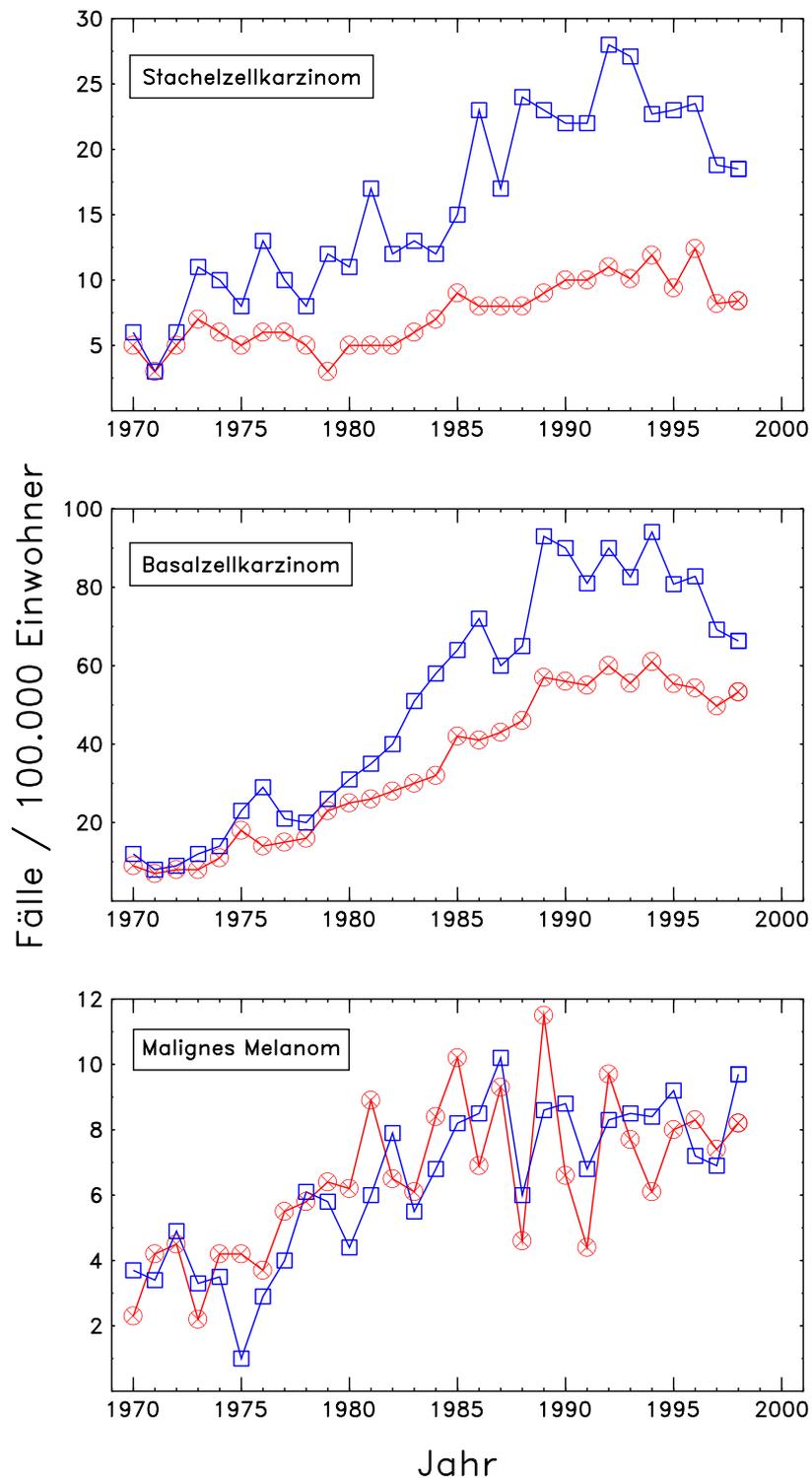


Abb. 2.14: Entwicklung der altersstandardisierten Inzidenz von Stachelzellkarzinom, Basalzellkarzinom sowie Malignem Melanom für Männer (\square) und Frauen (\otimes) in Deutschland zwischen 1970 und 1998 entsprechend den Jahresberichten des Saarländischen Krebsregisters [17].

Kapitel 3

Materialien und Methoden

3.1 Beschreibung des Messortes

Alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen der Gesamt- sowie der UV-Strahlung erfolgten auf der Nordseeinsel Sylt im Institut für Medizinische Klimatologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Die geographischen Koordinaten lauten: $\phi = 54.93^\circ$ nördliche Breite und $\lambda = 8.31^\circ$ östliche Länge. Aufgrund ihrer vorgeschobenen Lage gehört Sylt zu den sonnenreichsten Plätzen Deutschlands [45]. Das Institut befindet sich etwa eineinhalb Kilometer nördlich der Stadt Westerland ca. 200 Meter vom Flutsaum des Strandes entfernt (vergl. Abb. 3.1). Die direkte Strandnähe der Mess-Station bietet dabei den Vorteil, unmittelbar dort die UV-Strahlung zu erfassen, wo sich Urlauber und Strandspaziergänger in hohem Maße in ihrer Freizeit der Sonnenstrahlung aussetzen [74].

Die Messplattform des Instituts befindet sich auf dem Dach des Gebäudes auf Höhe der Oberkante der Düne 22 Meter über dem Meeresspiegel. Abschattungen des Horizonts durch die Düne oder aufgrund hoher Bäume oder Gebäude sind zu vernachlässigen. Der Horizont ist in fast allen Himmelsrichtungen einsehbar, nur in östlicher Richtung erheben sich Bäume etwa ein Grad über den Horizont hinaus. Die Abschattung der Gesamtfläche des Himmels errechnet sich daraus zu $<0.3\%$.

3.2 System zur Messung der UV-Strahlung

Die Eingangsoptik des UV-Mess-Systems besteht aus einem Teflon-Diffusor, der Strahlung aus dem gesamten 2π -Himmelsgewölbe erfasst. Über einen vier Meter langen Lichtwellenleiter gelangt diese zum Eingangsspalt des Spektralradiometers, einem Doppelmonochromator in Czerny-Turner-Anordnung. Hierin wird das vom Eintrittsspalt kommende Licht durch einen Hohlspiegel zu einem parallelen Lichtbündel geformt, welches dann auf ein holographisches Reflexionsgitter fällt. Die 2400 Linien/mm des Gitters können als kohärente Lichtquellen angesehen werden, so dass es

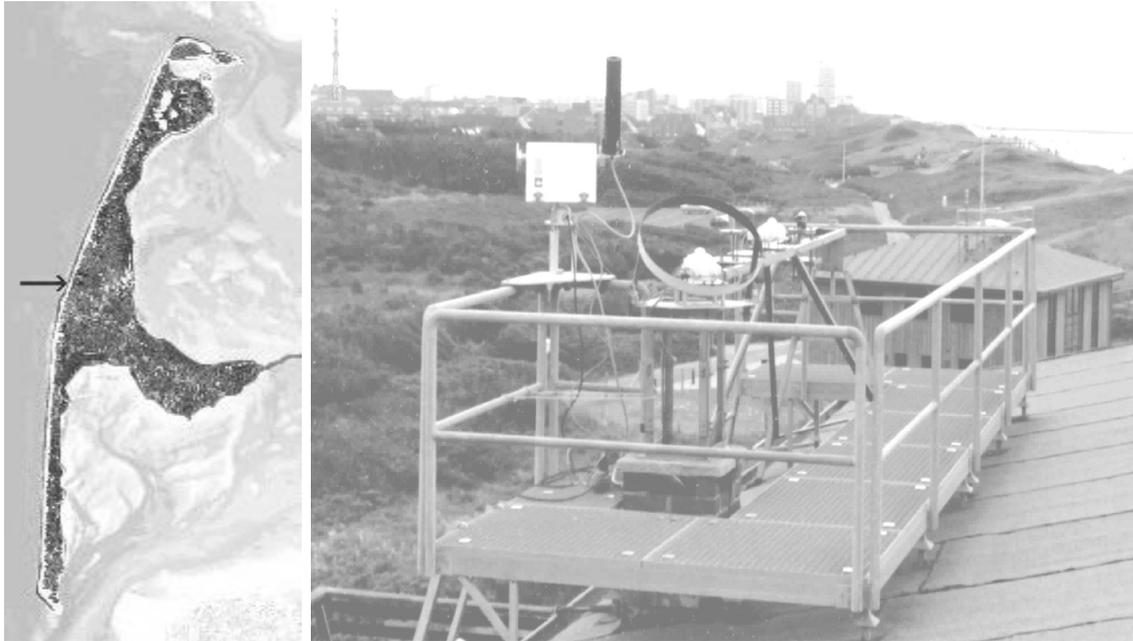


Abb. 3.1: *Links:* Lage des Instituts für Medizinische Klimatologie auf der Nordseeinsel Sylt; *Rechts:* Messplattform des Instituts mit den verschiedenen Messgeräten und Eingangsoptiken. Im Hintergrund erkennbar ist die Stadt Westerland sowie am rechten oberen Bildrand der Dünenwall der Insel und dahinter die Nordsee.

bei einem Einfallswinkel α zur konstruktiven Interferenz für alle Winkel β kommt, für die gilt:

$$d \cdot (\sin \alpha \pm \sin \beta) = n \cdot \lambda \quad (3.1)$$

Hierin ist d die Gitterkonstante und n die Beugungsordnung. Ein zweiter Hohlspiegel fokussiert das parallele Lichtbündel auf den Austrittsspalt. Um eine möglichst gute Unterdrückung des Streulichtanteils zu erzielen, wird ein Doppelmonochromator verwendet, wobei der Austrittsspalt des ersten gleichzeitig den Eintrittsspalt des zweiten Monochromators darstellt (Mittenspalt). Hinter dem Austrittsspalt des zweiten Monochromators befindet sich ein für den UV-Bereich optimierter Photomultiplier, der das optische Signal in einen elektrischen Strom umwandelt, der dann elektronisch verstärkt, digitalisiert und von einem Computer eingelesen und ausgewertet wird. Die Abstimmung auf bestimmte Wellenlängen erfolgt durch synchrones Verdrehen der beiden Gitter durch eine ebenfalls vom Computer geregelte Schrittmotorsteuerung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommen zwei unterschiedliche Spektralradiometer zum Einsatz (technische Daten sowie Herstellerangaben siehe Anhang C):

- Zur Messung der UV-Strahlung bei beliebig ausgerichteter Empfängerfläche wird ein Bentham DM150-Spektralradiometer verwendet. Bei diesem kann vor der Eingangsoptik eine nach den Spezifikationen der WMO angefertigte Blende mit einem Öffnungsdurchmesser von 5° befestigt werden.

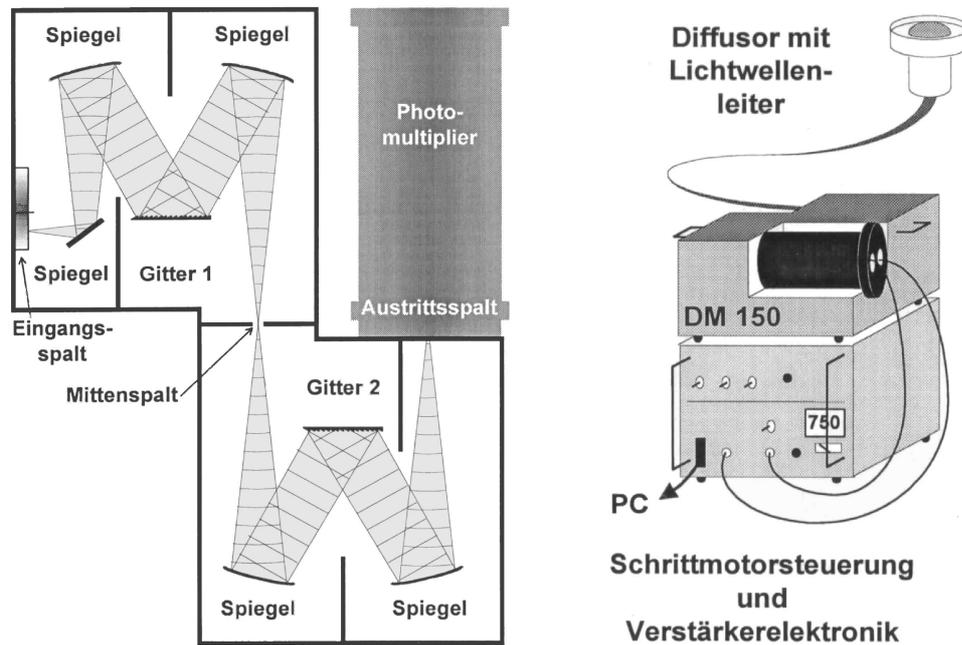


Abb. 3.2: *Links: Strahlengang im Doppelmonochromator Bentham DM150 vom Eintrittsspalt über die einzelnen optischen Komponenten bis zum Photomultiplier; Rechts: Gesamtes Mess-System bestehend aus Diffusor, Lichtwellenleiter, Spektralradiometer, Schrittmotorsteuerung und Verstärkerelektronik.*

- Zur Messung der UV-Strahlung auf eine horizontale Empfängerfläche wird ein Bentham DTM300-Spektralradiometer verwendet. Dieses Gerät führt automatisch im Rahmen des deutschlandweiten solaren UV-Messnetzes des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und des Umweltbundesamtes (UBA) kontinuierlich von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang in sechsminütigem Zeitraster Messungen der spektralen Bestrahlungsstärke von 290 nm bis 450 nm auf eine horizontal ausgerichtete Empfängerfläche durch. Jedes gemessene Spektrum wird mit dem Erythem-Wirkungsspektrum gewichtet und integriert. Auf diese Weise errechnet sich die momentane erythemwirksame Bestrahlungsstärke.

Für die vorliegende Arbeit wurden mit dem DTM300-Spektralradiometer UV-Spektren ohne bzw. mit Schattenkugel vermessen. Die bewegliche Schattenkugel lässt sich dabei so in den Strahlengang zwischen Sonne und Diffusor bringen, dass die Sonnenscheibe sowie ein Bereich von 2.5° um den Sonnenmittelpunkt abgeschattet werden („lokale Sonnenfinsternis“). Auf diese Weise ergibt sich die globale erythemwirksamen UV-Strahlung (ohne Schattenkugel) sowie die diffuse erythemwirksame UV-Streustrahlung (mit Schattenkugel) auf eine horizontal ausgerichtete Empfängerfläche. Der Durchmesser der Schattenkugel sowie die Distanz zum Diffusor wurden dabei so gewählt, dass ein Raumwinkel von $5 \cdot 10^{-3}$ Steradian (sr) ausgeblendet wird, der entsprechend den Spezifikationen der WMO [87] komplementär dem Öffnungshalbwinkel von 2.5° der Blendenöffnung vor dem DM150-Spektralradiometer entspricht.

3.3 Kalibration der UV-Mess-Systeme

Die Kalibration der beiden Spektralradiometer erfolgt entsprechend den Richtlinien des solaren UV-Messnetzes des BfS/UBA nach einem festgelegten Protokoll [19, 53, 54, 84]. Zuerst wird das Mess-System bezüglich seiner Wellenlänge kalibriert [3]. Hierzu wird eine Niederdruck-Quecksilberlampe (vergl. Anhang C) vor dem Diffusor platziert. Die Quecksilber-Linie bei einer Wellenlänge 296.73 nm wird daraufhin mit der maximalen Wellenlängenauflösung von 0.075 nm spektral vermessen. Über die verwendete Spektralradiometer-Software wird das System derart eingestellt, dass die gemessene Ist-Wellenlänge genau mit der Soll-Wellenlänge von 296.73 nm übereinstimmt. Aus der Vielzahl der Quecksilberlinien wird genau diese verwendet, da die Wellenlängengenauigkeit des Mess-Systems im Bereich der UVB-Kante (vergl. Kap. 2.1.4.1) größtmöglich sein soll.

Nach der Wellenlängenkalibration wird das Mess-System in einem zweiten Schritt bezüglich seiner Systemempfindlichkeit kalibriert. Hierfür wird die in Abbildung 3.3 dargestellte selbst entwickelte Kalibrierlampe auf den Diffusor gestellt. Mit der Spektralradiometer-Software, die über einen IEEE-Bus zusätzlich auch ein Präzisionsnetzteil ansteuert, wird der Strom der Kalibrierlampe auf exakt $8 \text{ A} \pm 0.0001 \text{ A}$ bei einer Spannung von etwa 120 V geregelt. Das Spektrum der Lampe wird dann in Wellenlängenschritten von 0.5 nm im Bereich der UVB-Kante von 290 nm bis 320 nm sowie in 5 nm Schritten im Bereich von 325 nm bis 550 nm erfasst. Zusätzlich wird die Ca^{2+} -FRAUNHOFER-Linie im Sonnenspektrum bei 393.36 nm zur Bestimmung der Wellenlängengenauigkeit des Systems hochaufgelöst vermessen. Die Multiplikation dieses Spektrums der Systemempfindlichkeit mit dem bei der Eichung der Kalibrierlampe im Bundesamt für Strahlenschutz ermittelten Emissionsspektrum ergibt das Kalibrierspektrum des Systems. Jedes gemessene Spektrum wird von der Spektralradiometer-Software mit diesem Kalibrierspektrum multipliziert, so dass sich ein Spektrum in der Einheit $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$ ergibt. Da sich aufgrund von mechanischen Einflüssen, Alterung und Betrieb sowohl die Kalibration bezüglich der Wellenlänge als auch der Systemempfindlichkeit im Laufe der Zeit in geringem Maße ändern können, wird das Mess-System etwa alle vier bis sechs Wochen neu kalibriert.

3.4 Pyranometer und Pyrheliometer

Zur Messung der Gesamtstrahlung von 305 nm bis 2800 nm werden so genannte Pyranometer eingesetzt (technische Daten sowie Herstellerangaben siehe Anhang C). Das Funktionsprinzip eines Pyranometers beruht auf der Absorption der einfallenden Strahlung durch eine schwarze Keramikscheibe. Die dabei entstehende Wärme fließt über einen Wärmewiderstand zur Wärmeableitung (Pyranometerkörper). Der Temperaturunterschied über dem thermischen Widerstand wird von Thermoelementen in eine Spannung umgewandelt. Eine Bestrahlungsstärke von $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ führt dabei zu einer Temperaturdifferenz von etwa 3 Grad und einer Thermospannung von ca. 5 mV. Um Einflüsse durch Wind, Regen und thermische Abstrahlung zu

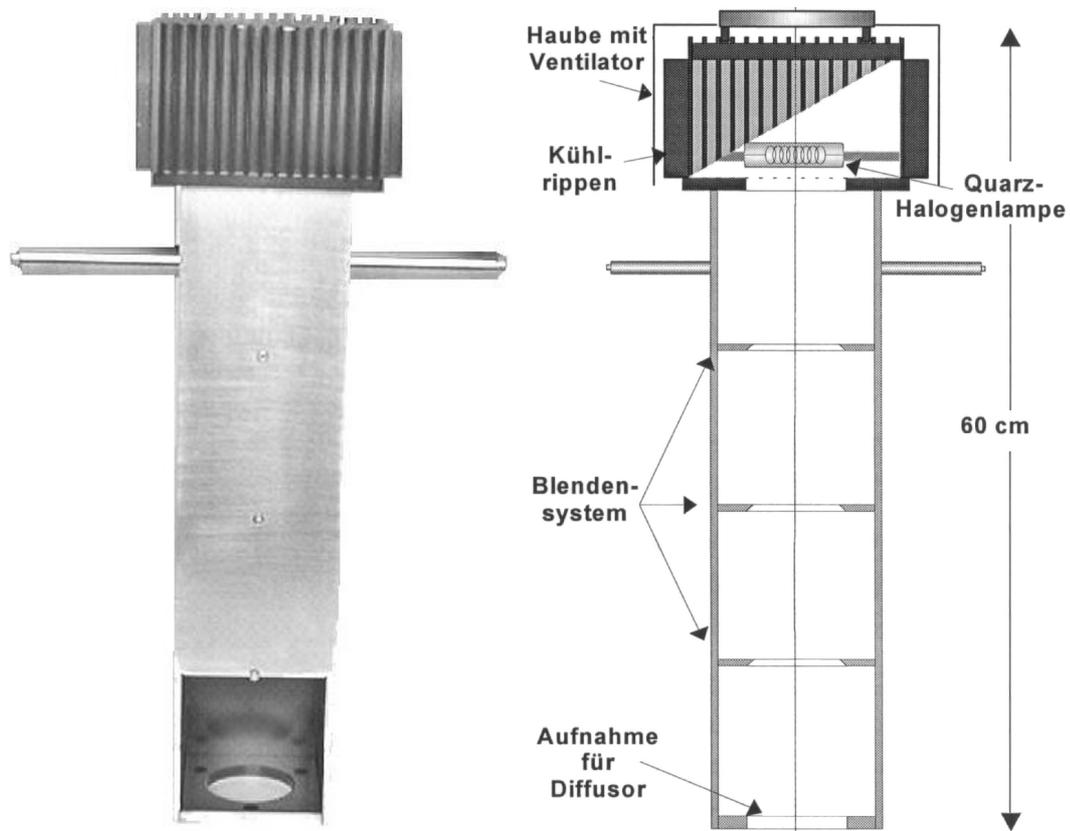


Abb. 3.3: Neuentwickelte Kalibriervorrichtung mit 1000 W Quarz-Halogenlampe. Der 50 W-Ventilator (nur in der Skizze rechts dargestellt) sorgt dafür, dass im Langzeitbetrieb die Temperatur am Außenrand der Kühlrippen weniger als 40°C beträgt.

vermeiden, wird die Keramikscheibe durch zwei Glashalbkugeln geschützt. Diese Anordnung ermöglicht dabei die Übertragung von Strahlung aus allen Richtungen des 2π -Himmelsgewölbes auf die Keramikscheibe, so dass als Summe die direkte Strahlung der Sonne sowie die diffus im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlungsanteile erfasst werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommen unterschiedliche Pyranometer-Typen zum Einsatz. Dieses sind

- zur Messung der globalen Gesamtstrahlung ein horizontales Pyranometer,
- zur Messung der diffus-gestreuten Gesamtstrahlung ein horizontal ausgerichtetes Pyranometer, welches mit einem Schattenring ausgestattet ist. Auf diese Weise wird zu jeder Tageszeit der Anteil der direkten Strahlung ausgeblendet,
- zur Messung der Gesamtstrahlung bei beliebig geneigter Empfängerfläche ein zusätzliches, mobil einsetzbares Pyranometer.

Um allein den direkten Anteil der Gesamtstrahlung messen zu können, wird ein Pyrheliometer, ein Pyranometer mit integriertem Blendensystem, verwendet. Entsprechend den Spezifikationen der WMO [87] beträgt der Öffnungshalbwinkel 2.5° , so

dass Strahlung aus einem Raumwinkel von $5 \cdot 10^{-3}$ sr erfasst wird. Die Messwerte der Pyranometer werden von einem digitalen 10-Kanal-Multimeter erfasst und zwischengespeichert. Das Auslesen des Multimeters erfolgt ebenfalls über IEEE-Bus durch die Spektralradiometer-Software, welche die Spannungswerte mit den Kalibrierfaktoren der jeweiligen Pyranometer multipliziert, so dass sich die Bestrahlungsstärke in der Einheit W/m^2 ergibt.

3.5 Gerät zur Messung der Ozonsäule

Zur Erfassung der stratosphärischen Ozonkonzentration wird ein Microtops II-Ozonomessgerät (technische Daten sowie Herstellerangaben siehe Anhang C) eingesetzt. Das Gerät ist mit drei internen Blenden mit einem Öffnungsdurchmesser von jeweils 2.5° ausgestattet. Entsprechende Interferenzfilter lassen dabei nur Strahlung aus einem Wellenlängenbereich von 305.0 nm, 312.5 nm sowie 320.5 nm, jeweils mit einer Halbwertsbreite von 2.4 nm passieren, die dann von Photodioden registriert wird. Eine optische Vorrichtung ermöglicht das exakte Ausrichten des Microtops II auf die Sonne. Aus den Verhältnissen der gemessenen Werte der direkten Strahlung wird dann unter Berücksichtigung des Absorptionsquerschnitts des Ozons die vertikale stratosphärische Ozonverteilung in der Einheit DOBSON-Unit mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ (nach [34]) berechnet. Das Microtops II wird manuell eingesetzt, wenn die Sonnenscheibe nicht von Wolken oder Dunst verdeckt wird.

3.6 Schwenkvorrichtung und –prozedur

Um die Empfängerflächen der Messgeräte auf jeden beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe ausrichten zu können, wird die in Abbildung 3.4 dargestellte 2-Achsen-Schwenkvorrichtung (2AP) eingesetzt (technische Daten sowie Herstellerangaben siehe Anhang C). Der Schwenkmechanismus lässt sich dabei horizontal um 360° drehen, eine durch das Gerät verlaufende Achse vertikal um 90° . Auf einem an dieser Achse befestigten Ausleger ist der Diffusor des DM150-Spektralradiometers zur Messung der UV-Strahlung angebracht. Am entgegengesetzten Ende der Achse können je nach Messmodus das mobile Pyranometer sowie das Pyrheliometer befestigt werden. Über das selbst entwickelte Software-Programm **Sol-pos 1.0** (vergl. Kap. 3.7 sowie Anhang D) lassen sich die folgenden Schwenkabläufe realisieren:

3.6.1 Sonnennachführung

Im Modus der Sonnennachführung wird die 2AP-Schwenkvorrichtung während eines Messtages derart nachgeführt, dass die Empfängerflächen der verschiedenen Sensoren ständig senkrecht zur Sonne ausgerichtet sind. Auf diese Weise werden Tagesverläufe der gerichteten Gesamtstrahlung mit dem mobil einsetzbaren Pyranometer

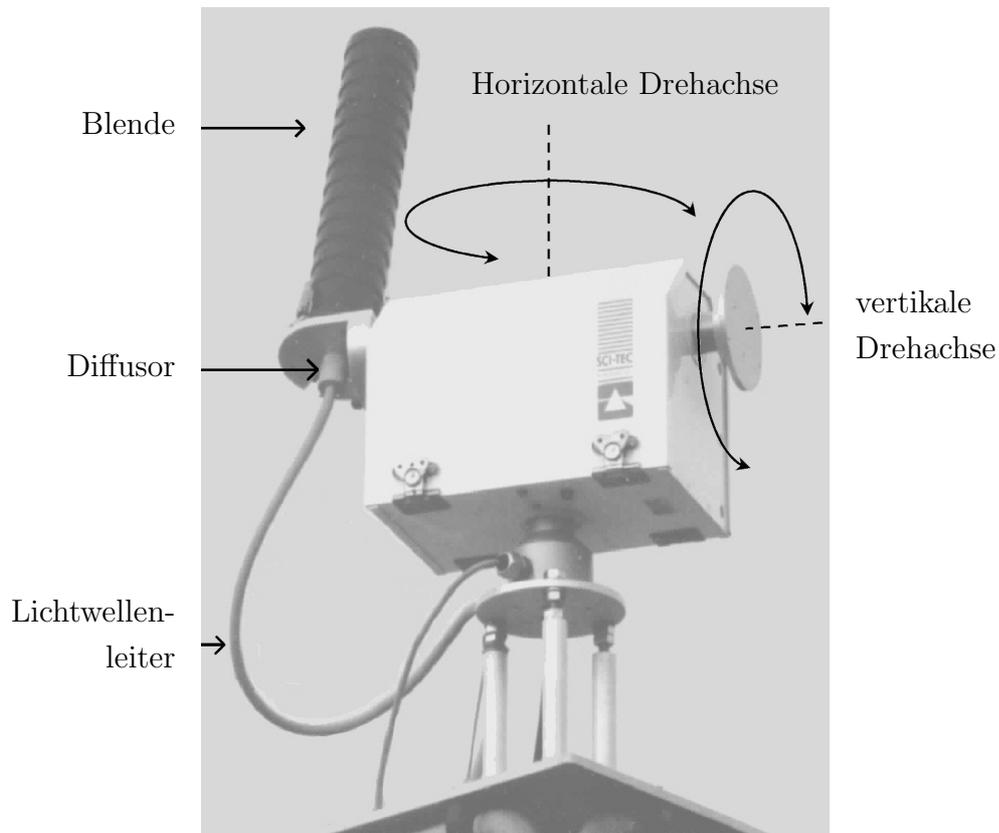


Abb. 3.4: Auf der Messplattform installierte 2-Achsen-Schwenkvorrichtung (2AP). Durch Drehen in horizontaler sowie vertikaler Ebene können die Sensoren der Messgeräte (hier: UV-Sensor mit vorgesetzter Blende) auf jeden beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe ausgerichtet werden.

sowie der direkten Gesamtstrahlung mit dem Pyrheliometer ermittelt. Weiterhin werden vom DM150-Spektralradiometer in sechsminütigem Zeittakt UV-Spektren aufgenommen, wobei wechselweise mit bzw. ohne Blende gemessen wird. Auf diese Weise ergeben sich Tagesverläufe der gerichteten (ohne Blende) sowie der direkten erythemwirksamen UV-Strahlung (mit Blende). Zeitgleich zu den Messungen mit den nachgeführten Empfängern werden die globale und die diffuse Gesamtstrahlung auf eine horizontal ausgerichtete Empfängerfläche erfasst. Darüber hinaus werden vom DTM300-Spektralradiometer UV-Spektren ohne bzw. mit Schattenkugel vermessen, so dass sich Tagesverläufe der erythemwirksamen Globalstrahlung sowie der diffusen erythemwirksamen Streustrahlung ergeben.

Die Genauigkeit der 2AP-Steuerung durch das Programm *Sol-pos*, welches auch die Refraktion der Erdatmosphäre angenähert berücksichtigt, lässt sich mit Hilfe eines am Ausleger befestigten 10 cm langen Schattenstabes bestimmen, der im Tagesverlauf einen Schatten von maximal 1 mm Länge wirft. Der größtmögliche Fehler bei der Ausrichtung des 2AP auf die Sonnenposition errechnet sich daraus zu $\Delta\phi = \arctan(0.01) \leq 0.6^\circ$.

3.6.2 Messung entlang des Sonnenmeridians (Zenitscan)

In diesem Modus wird entlang des Längengrades der aktuellen Sonnenposition der Höhenwinkel h , auf den die Empfängerfläche ausgerichtet wird, von 0° (Horizont unterhalb der Sonnenposition) über 90° (Zenit) zurück zu 0° (rückwärtiger Horizont) in 5° -Schritten variiert. Somit ergibt sich ein „2-dimensionaler Schnitt durch das Himmelsgewölbe“, der die direkte Sonnenstrahlung einschließt. Das Spektralradiometer wird in diesem Modus entsprechend Kapitel 2.2.2 wechselweise auf die Wellenlängen 307 nm (maximale erythemale Wirksamkeit zur Zeit des Sonnenhöchststands), 380 nm (hohe Wirksamkeit der Sofortpigmentierung), 550 nm (maximale Augenempfindlichkeit) und zusätzlich noch auf 450 nm fest eingestellt.

Der Zenitscan-Modus ergibt sich als 2-dimensionaler Spezialfall des im folgenden erläuterten Skymapping-Modus. Insbesondere die Anteile der Vorwärts- bzw. Rückwärtsstreuung sowie die Verhältnisse zwischen direkter und diffuser Strahlung lassen sich durch diese Messungen für die verschiedenen Wellenlängen bestimmen.

3.6.3 Kartierung des Himmelsgewölbes (Skymapping)

Zur punktuellen Bestimmung der über das Himmelsgewölbe verteilten spektralen Bestrahlungsstärke bei unterschiedlichen Wellenlängen wird das in Abbildung 3.5 gezeigte Koordinaten-Raster angefahren. Dargestellt ist das Himmelsgewölbe in Form eines Polardiagramms: Der Horizont befindet sich am Rand des Kreises, der Zenit liegt in seinem Ursprung. Die Anzahl der Messpunkte wird durch den maximal zwei Sekunden dauernden Schwenkvorgang von einem Punkt zum nächsten und die nachfolgenden zwei Sekunden zur Messwerterfassung beschränkt. Verschiedene Variationen des Punkterasters und der Zeiten zur Messwerterfassung haben gezeigt, dass ein Raster von 107 Punkten, entsprechend einer Zeitdauer von $107 \cdot 4 \text{ s} \approx 7 \text{ min}$ ein guter Kompromiss zwischen hoher sphärischer Auflösung und gerade noch zu akzeptierender Scandauer darstellt. Die anzufahrenden Messpunkte sind dabei nicht gleichmäßig über das Himmelsgewölbe verteilt. In den beiden südlichen Quadranten befinden sich etwa doppelt so viele Messpunkte wie in den nördlichen. Auf diese Weise lässt sich der von der Jahreszeit abhängige Tagesverlauf der Sonne am Himmel und der dadurch bedingte Anstieg der spektralen Bestrahlungsstärke im Bereich der Sonnenposition gut erfassen. Auch im Skymapping-Modus wird das Spektralradiometer bei den Wellenlängen 307 nm, 380 nm sowie 550 nm betrieben.

3.7 Erfassung und Auswertung der Messdaten

Von der Erfassung der spektralen Bestrahlungsstärke über die Auswertung bis hin zur graphischen Darstellung der Messwerte werden die im Folgenden genannten Programme eingesetzt, die mit Ausnahme von 1. und 4. im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Turbo-Pascal 7.0 entwickelt wurden:

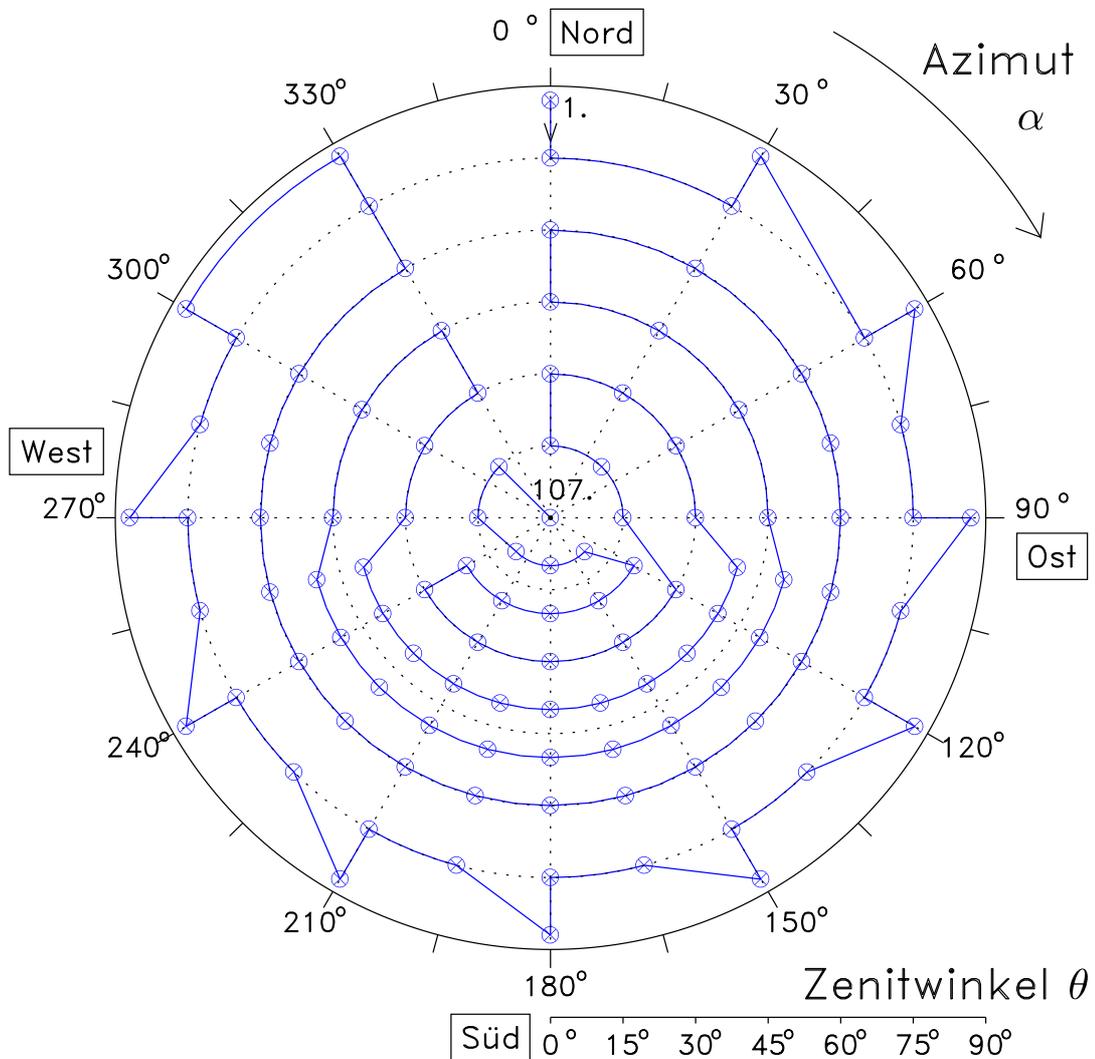


Abb. 3.5: Polardiagramm der Ansteuerung des 2AP im Skymapping-Modus. Dargestellt sind die 107 Messpunkte (\otimes) sowie der Weg von einem Punkt zum nächsten ($-$). Der erste Messpunkt befindet sich im Norden bei einem Höhenwinkel von 3° (87° Zenitwinkel), der letzte Messpunkt Nr. 107 liegt im Zenit.

1. Die Spektralradiometer-Software **Autoscan 2.0** steuert über IEEE-Bus die gesamte UV-Messapparatur, bestehend aus Spektralradiometer, Schrittmotorsteuerung, Verstärkerelektronik, digitalem Multimeter und Präzisionsnetzteil. Hierbei können über das Programm verschiedene Messmodi realisiert werden: Bei der einfachen Aufnahme eines Spektrums werden die Wellenlängen zusammen mit den zugehörigen Messwerten als zweispaltige ASCII-Datei gespeichert. Bei einer fest eingestellten Wellenlänge (Himmelsgewölbe-Kartierung, Zenitscan-Modus) erfolgt die Erfassung der Bestrahlungsstärke als Zeitreihe, die als zweispaltige ASCII-Datei bestehend aus Messzeitpunkt und Messwert abgespeichert wird. Werden automatisiert in einem festen Zeitraster Spektren aufgenommen (Sonnennachführung), so erfolgt das Speichern der Daten im NASA-AMES¹-Format sowie als reduzierter Datensatz im ASCII-Format.
2. **Sol-pos 1.0** mit Refraktionskorrektur steuert entsprechend Kapitel 3.5 sowie Anhang D den 2AP. Es gliedert sich in die Module **Nachführung**, **Dateiarbeitung** und **Zenitscan**, die jeden Schwenkvorgang des 2AP mit Uhrzeit und Ausrichtung in Polarkoordinaten in einer Tagesprotokoll-Datei festhalten.
3. **Sky_ausw** verbindet die Messdaten der Bestrahlungsstärke-Zeitreihe eines Sky-maps mit der 2AP-Protokolldatei und erzeugt eine 107×3 -Matrix, in der alle Messpunkte in kartesische Koordinaten sowie die gemessenen Werte der Bestrahlungsstärke stehen. Wird bei einem der 107 Messpunkte die direkte Sonnenstrahlung erfasst, so wird dieser Messpunkt von der Software eliminiert.
4. **Fitz** (aus dem Shareware-Paket **Cgle** von C.PUGMIRE, NZ [48]) berechnet durch kubische Spline-Interpolation [9] eine 100×100 -Punkte-Matrix \mathcal{Z} in kartesischen Koordinaten mit den Werten der interpolierten Bestrahlungsstärke. **Kleiner1** generiert daraus eine Matrix \mathcal{Z}_0 , in der alle durch die Interpolation erzeugten Werte außerhalb des Einheitskreises eliminiert sind. Die graphischen Darstellung der insgesamt 7305 Datenpunkte erfolgt nach Aufruf von **Contour** durch **Gle** (beide aus **Cgle**) in Form von Konturlinien der Bestrahlungsstärke.
5. **ToMatlab** bzw. **ToSurf** generieren aus \mathcal{Z} eine normierte Matrix \mathcal{N} (.zsu) sowie eine Matrix \mathcal{H} (.zco), in der die Messwerte umgerechnet sind auf eine horizontale Ausrichtung der Empfängerfläche. Die Darstellung erfolgt über **Matlab** bzw. **Surface** aus **Cgle** in Form von 3D-Graphiken.
6. **Zen_ausw** verbindet die Datensätze der Bestrahlungsstärke-Zeitreihen eines Zenitscans mit der 2AP-Protokoll-Datei zur graphischen Darstellung mit **Gle**.
7. **Shadow** berechnet durch entsprechende Integration der Matrizen \mathcal{N} und \mathcal{H} für beliebig orientierte Empfängerflächen die auftreffende Bestrahlungsstärke bei unterschiedlichen Arten von Verschattungen des Empfängers.

¹Datenformat, in dem im ASCII-Zeichensatz in einem Header alle unabhängigen Variablen sowie deren Einheiten festgelegt werden. Die Werte der Variablen folgen für jede Einzelmessung in nachfolgenden Tableaus (vergl. [46]).

Kapitel 4

Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der methodischen Vorarbeiten

Vor Beginn der Außenmessungen in Westerland auf Sylt wurden die Eingangsoptik sowie das in Verbindung mit der 2AP-Schwenkvorrichtung verwendete Spektralmeter Bentham DM150 einer Systemcharakterisierung unterzogen.

4.1.1 Genauigkeit der Eingangsoptik

Bei der Untersuchung des bisher verwendeten Diffusors zeigte sich, dass der Abstand zwischen der gewölbten Teflonscheibe (vergl. Anhang C) und dem Lichtwellenleiter zu gering dimensioniert war. Als Folge dessen erfasst der Öffnungskegel, unter dem eintretende Strahlung im Zuge der Totalreflexion verlustfrei durch den Lichtwellenleiter geführt werden kann [51], nicht die gesamte Teflonscheibe. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuer Diffusor mit einem optimierten Abstand zwischen Teflonscheibe und Lichtwellenleiter konstruiert.

Die Abweichung der Winkelabhängigkeit des Diffusors von der idealen Cosinusfunktion wurde mit Hilfe einer frei stehenden 1000 W-Quarz-Halogenlampe ermittelt, welche im Strahlengang des Diffusors in 120 cm Abstand platziert wurde. Ein Blendensystem diente dazu, Streulicht zu unterdrücken. Der Diffusor selbst wurde mit Hilfe eines Justierlasers so auf einem Drehtisch installiert, dass der Drehpunkt genau mit dem Mittelpunkt der Diffusorgrundfläche übereinstimmte. Der Drehtisch wurde dann im Bereich von 0° (Diffusor \perp Lampe) bis 85° in 5° -Schritten mit einer Genauigkeit von $\pm 0.1^\circ$ verstellt. Für jeden eingestellten Winkel ϑ wurde ein Spektrum von 290 nm bis 450 nm vermessen, welches dann im Zuge der Auswertung durch das Spektrum bei einer Auslenkung von $\vartheta = 0^\circ$ geteilt wurde. Es zeigte sich dabei, dass die durch die Quotientenbildung berechneten Spektren über den Wellenlängenbereich konstant, d.h. unabhängig von der Wellenlänge waren. Aus diesem Grund konnte für jeden eingestellten Winkel ϑ der spektrale Mittelwert des auf 0° -Auslenkung normierten Spektrums berechnet werden. Der Quotient dieses Mit-

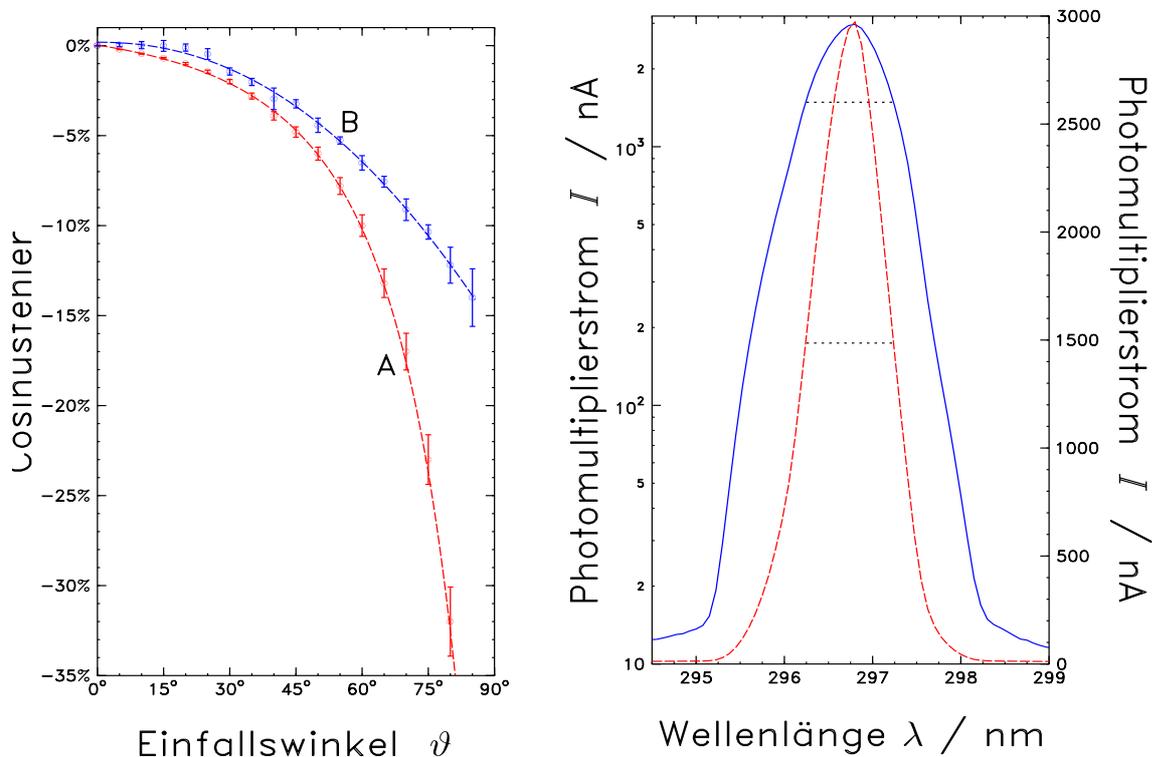


Abb. 4.1: Links: Cosinusfehler des bisherigen (A) und des neuen Diffusors (B); Rechts: Spaltfunktion des DM150 (logarithmischer (—) und linearer Maßstab (---)).

telwerts zum Cosinus der Auslenkung ist in Abbildung 4.1 (links) für den zuvor verwendeten und den neu entwickelten Diffusor dargestellt. Es zeigt sich, dass der neue, modifizierte Diffusor einen deutlich geringeren Cosinusfehler aufweist als der bisher verwendete [63].

4.1.2 Halbwertsbreite und Wellenlängengenauigkeit

Die beiden im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Spektralradiometer werden zum Zweck der Vergleichbarkeit der spektralen Messungen mit einer einheitlichen Halbwertsbreite betrieben. Dabei ist die Halbwertsbreite¹ von 1.0 nm bei dem Doppelmonochromator DTM300 durch dessen feste Spaltbreiten vorgegeben. Bei dem Doppelmonochromator DM150 hingegen wurde die Halbwertsbreite von 1.0 nm durch Einstellen der Spaltbreiten des Eintritts- und des Austrittsspalts mit Hilfe zweier Justierschraube auf (0.6 ± 0.01) mm erzielt (vergl. Abb. 4.1 (rechts)).

¹Selbst Spektrallinien mit vernachlässigbarer natürlicher Linienbreite werden mit der endlichen Breite des Apparateprofils detektiert. Das Wellenlängenintervall, in dem die maximale Intensität auf den halben Wert abgesunken ist, wird als Halbwertsbreite (engl.: FWHM) bezeichnet.

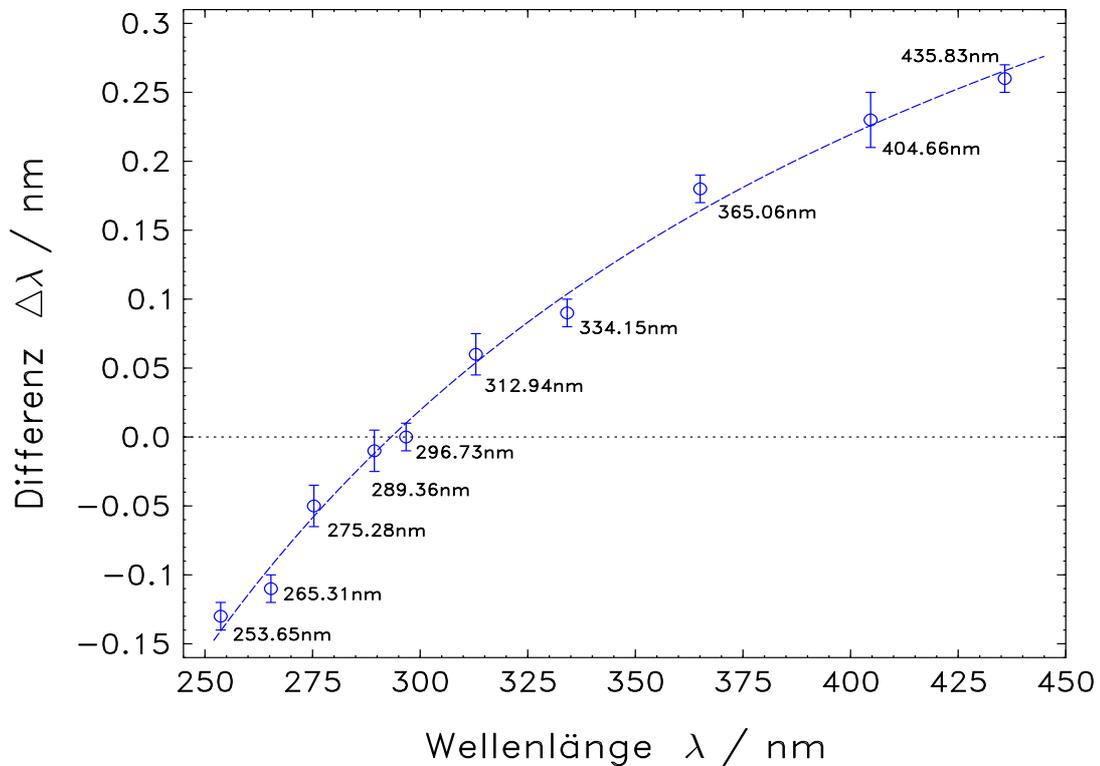


Abb. 4.2: Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ zwischen bekannter Soll-Wellenlänge der Linien einer Niederdruck-Quecksilberlampe und vom DM150-Spektralradiometer gemessener Ist-Wellenlänge. Die Kalibration des Systems erfolgte auf die Hg-Linie bei 296.73 nm im Bereich der UVB-Kante im solaren Spektrum.

Zur Bestimmung der Wellenlängengenauigkeit des Systems wurden aus dem Spektrum der Quecksilberlampe im Bereich von 250 nm bis 450 nm zehn charakteristische Linien ausgewählt und insgesamt jeweils 30 mal mit der höchsten Wellenlängenauflösung von 0.075 nm spektral vermessen. Die Wellenlängendifferenz zwischen dem theoretischen Maximum und dem Maximum der vom System gemessenen Quecksilberlinie ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Beim Vorhandensein von Mehrfachlinien innerhalb einer Halbwertsbreite wurde dabei die Wellenlänge des Maximums der resultierenden, zu messenden Linie aus den nach ihren Intensitäten gewichteten einzelnen Linien [35] errechnet.

Bei einer Wellenlänge von 296.73 nm ist die Wellenlängendifferenz gleich Null, da das System im Zuge der Kalibration (vergl. Kap. 3.3) auf diese Wellenlänge optimal eingestellt wurde. Auf diese Weise wird im Bereich der UVB-Kante mit größtmöglicher Wellenlängengenauigkeit gemessen. Bis 450 nm steigt die Differenz bis auf etwa 0.28 nm an. Dieser Wellenlängenfehler ist jedoch vernachlässigbar, da die am Erdboden gemessene spektrale Bestrahlungsstärke in diesem Bereich nahezu konstant verläuft (vergl. Abb. 2.7). Im gesamten dargestellten Wellenlängenbe-

reich von 250 nm bis 450 nm besitzt das Spektralradiometer eine reproduzierbare Wellenlängengenauigkeit von etwa ± 0.22 nm. Betrachtet man nur das Wellenlängenintervall von 290 nm bis 450 nm, so besitzt das DM150 eine Wellenlängengenauigkeit entsprechend den Herstellerangaben von ± 0.15 nm [4]. Dieser Wert stimmt exakt mit dem überein, der während des nationalen Messgerätevergleichs IC97 im Sommer 1997 im Fraunhoferinstitut für Atmosphärische Umweltforschung in Garmisch-Partenkirchen für dieses Mess-System ermittelt wurden [52, 63].

4.2 Ergebnisse der spektralen Messungen der solaren UV-Strahlung

4.2.1 Jahresverlauf der UV- und Gesamtstrahlung

Unabhängig von der Vermessung der im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlungsanteile wird täglich von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang die Gesamtstrahlung E_{ges} mit dem horizontal ausgerichteten Pyranometer erfasst. Darüber hinaus wird ebenfalls täglich vom DTM 300-Spektralradiometer die auf eine horizontal ausgerichtete Empfängerfläche auftreffende erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{Er} gemessen. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf dieser beiden Messgrößen zur Zeit des Sonnenhöchststands in den Jahren 2000 und 2001. Als gestrichelte Linie ist der jeweilige Jahresverlauf bei unbewölktem Himmel dargestellt. Dieser wurde für die Gesamtstrahlung aus dem Tagesgang vom 23. Mai 2001 als Funktion des Sonnenhöhenwinkels errechnet und unter Berücksichtigung der Exzentrizität der Erdbahn auf den maximalen Sonnenhöhenwinkel extrapoliert. Der Jahresverlauf der erythemwirksame UV-Strahlung bei unbewölktem Himmel wurde mit Hilfe eines Strahlungstransfermodells [69] für die geographischen Koordinaten Westerlands berechnet [72], wobei als Eingabeparameter mittlere Ozon-Monatswerte angenommen wurden.

Es zeigt sich, dass das Jahresmaximum der Gesamtstrahlung E_{ges} etwa zur Zeit der maximalen Mittagshöhe am 21. Juni auftritt, da Strahlung aus dem sichtbaren und dem infraroten Spektralbereich, die zusammen einen Anteil von annähernd 92 % an der extraterrestrischen Gesamtstrahlung ausmachen (vergl. Tabelle 2.2), weitestgehend unabhängig von der jahreszeitlich schwankenden Ozonsäule die Atmosphäre passieren. Die am Erdboden bei unbewölktem Himmel messbare Gesamtstrahlung wird somit in erster Näherung nur durch die Sonnenhöhe bestimmt. Bei starker Bewölkung kann jedoch selbst zur Sommersonnenwende die Gesamtstrahlung auf Werte unter 50 W/m^2 , also um über 90 % gegenüber den bei unbewölktem Himmel möglichen 900 W/m^2 , absinken [56]. Zur Wintersonnenwende ist die Gesamtstrahlung bei unbewölktem Himmel mit 180 W/m^2 etwa 5-fach geringer als zur Sommersonnenwende.

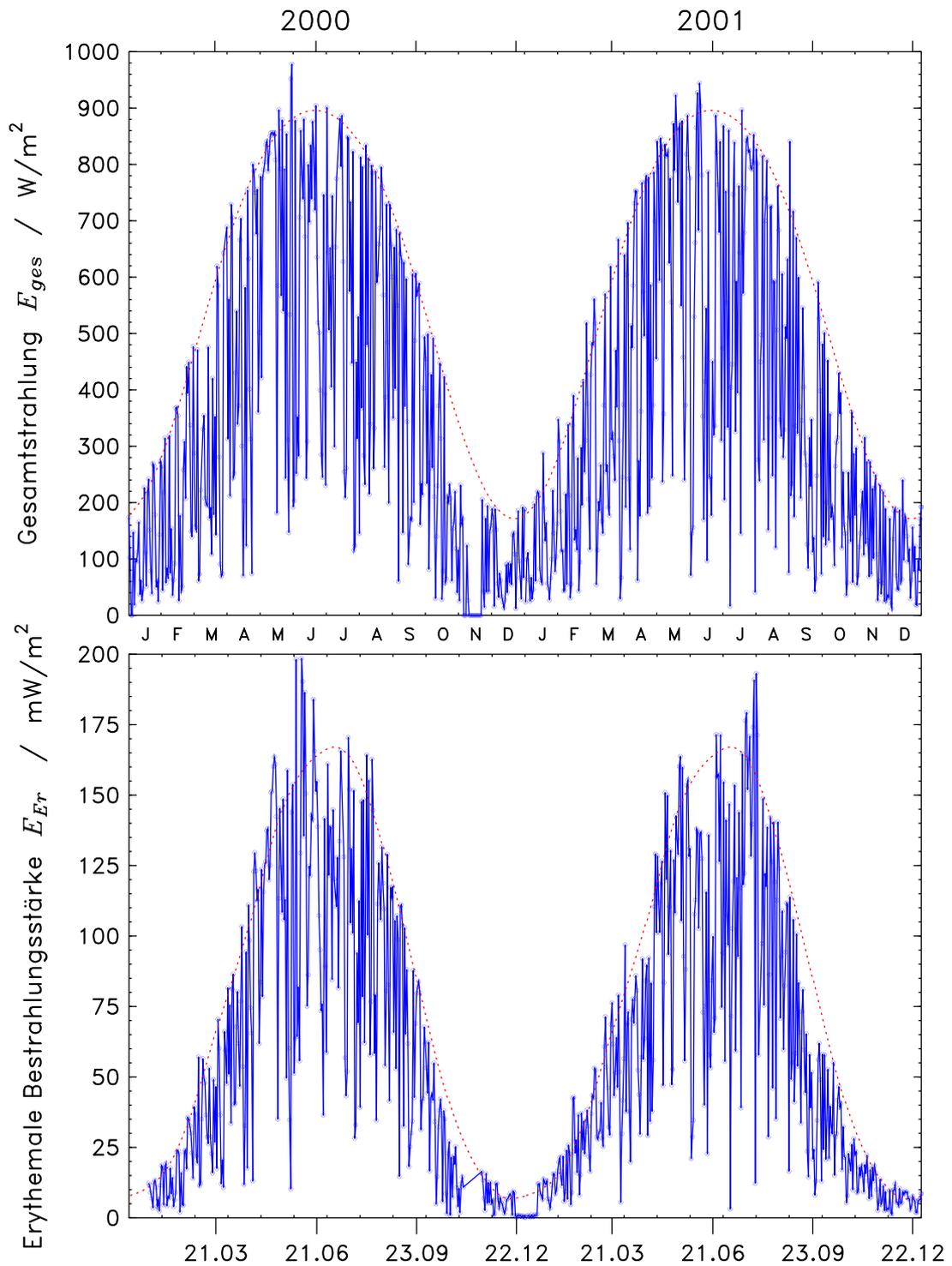


Abb. 4.3: Verlauf der Gesamtstrahlung E_{ges} (oben) und der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Er} (unten) auf eine horizontale Empfängerfläche zur Zeit des Sonnenhöchststands in den Jahren 2000 und 2001 in Westerland auf Sylt. Als gestrichelte Linie ist der jeweilige Verlauf bei unbewölktem Himmel eingezeichnet.

Das Jahresmaximum der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Er} wird hingegen nicht zur Sommersonnenwende am 21. Juni erreicht, sondern aufgrund der von April bis November abnehmenden mittleren stratosphärischen Ozonkonzentration (vergl. Abb. 2.8) erst in der ersten Juli-Hälfte. Die dann geringeren Ozonwerte bewirken, dass trotz niedrigerer Mittagshöhe die Werte der erythemwirksamen UV-Strahlung höher sind als am 21. Juni. Die in Westerland Anfang Juni 2000 sowie Ende Juli 2001 mit über 180 mW/m^2 sehr hohen Werte der erythemwirksamen UV-Strahlung korrelieren mit vergleichsweise geringen Werten der stratosphärischen Ozonkonzentration, wie sie zeitgleich mit dem Microtops II Ozonmessgerät ermittelt wurden. Bei unbewölktem Himmel und mittleren Werten der stratosphärischen Ozonkonzentration ist die erythemwirksame Bestrahlungsstärke zur Wintersonnenwende mit 7 mW/m^2 etwa 25-fach niedriger als zur Sommersonnenwende.

Des Weiteren veranschaulicht Abbildung 4.3 die täglichen Schwankungen der UV-Strahlung aufgrund wechselhafter Bewölkung. Insbesondere im Juni und Juli 2001 zeigt sich dabei eine Reduzierung der erythemwirksamen UV-Strahlung zur Mittagszeit auf Werte bis unter 25 mW/m^2 . Mehrere aufeinander folgende komplett unbewölkte Tage kamen in Westerland in beiden Jahren, mit Ausnahme der Wintermonate, nur Anfang Mai vor. In der Zeit maximaler UV-Strahlung in den Monaten Juni bis August gab es jeweils nur etwa 3 bis 4 Tage pro Jahr mit von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang wolkenfreiem Himmel.

4.2.2 Sonnennachführung

Ein in Westerland von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang wolkenfreier Tag, an dem die Messapparatur im Modus der Sonnennachführung (vergl. Kap. 3.6.1) betrieben wurde, war der 04. Juli 2001. Lediglich zur Mittagszeit verursachten leichte Quellwolken eine geringe Zunahme der Diesigkeit. Abbildung 4.4 zeigt den Verlauf der Gesamtstrahlung $E_{ges}^{(s)}$ (oben) bzw. der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke $E_{Er}^{(s)}$ (unten) bei senkrecht zur Sonne ausgerichteter Empfängerfläche. Die im Folgenden verwendeten Hochindizes bezeichnen dabei eine horizontale^(h) bzw. eine zur Sonne senkrechte^(s) Ausrichtung der entsprechenden Sensorflächen. Zur Nomenklatur siehe insbesondere Anhang A.

Zusätzlich dargestellt sind in der oberen Abbildung der Tagesverlauf der globalen $E_{ges}^{(h)}$, der direkten $E_{ges,dir}^{(h)}$ und der diffusen Gesamtstrahlung $E_{ges,diff}^{(h)}$ auf eine horizontale Empfängerfläche. Die untere Abbildung zeigt den Tagesverlauf der globalen $E_{Er}^{(h)}$, der direkten $E_{Er,dir}^{(h)}$ und der diffusen erythemwirksamen UV-Strahlung $E_{Er,diff}^{(h)}$ auf eine horizontal ausgerichtete Empfängerfläche. Die beiden dargestellten Messgrößen $E_{ges,dir}^{(h)}$ und $E_{Er,dir}^{(h)}$ wurden dabei jeweils mit senkrecht zur Sonne ausgerichteten Empfängerflächen gemessen und auf eine horizontale Fläche umgerechnet. Die gestrichelten Kurven zeigen theoretische, über den Sonnenhöhenwinkel berechnete Tagesverläufe. Anhand Abbildung 4.4 lassen sich konkrete Aussagen über die Strahlensituation am 04. Juli 2001 in Westerland ableiten.

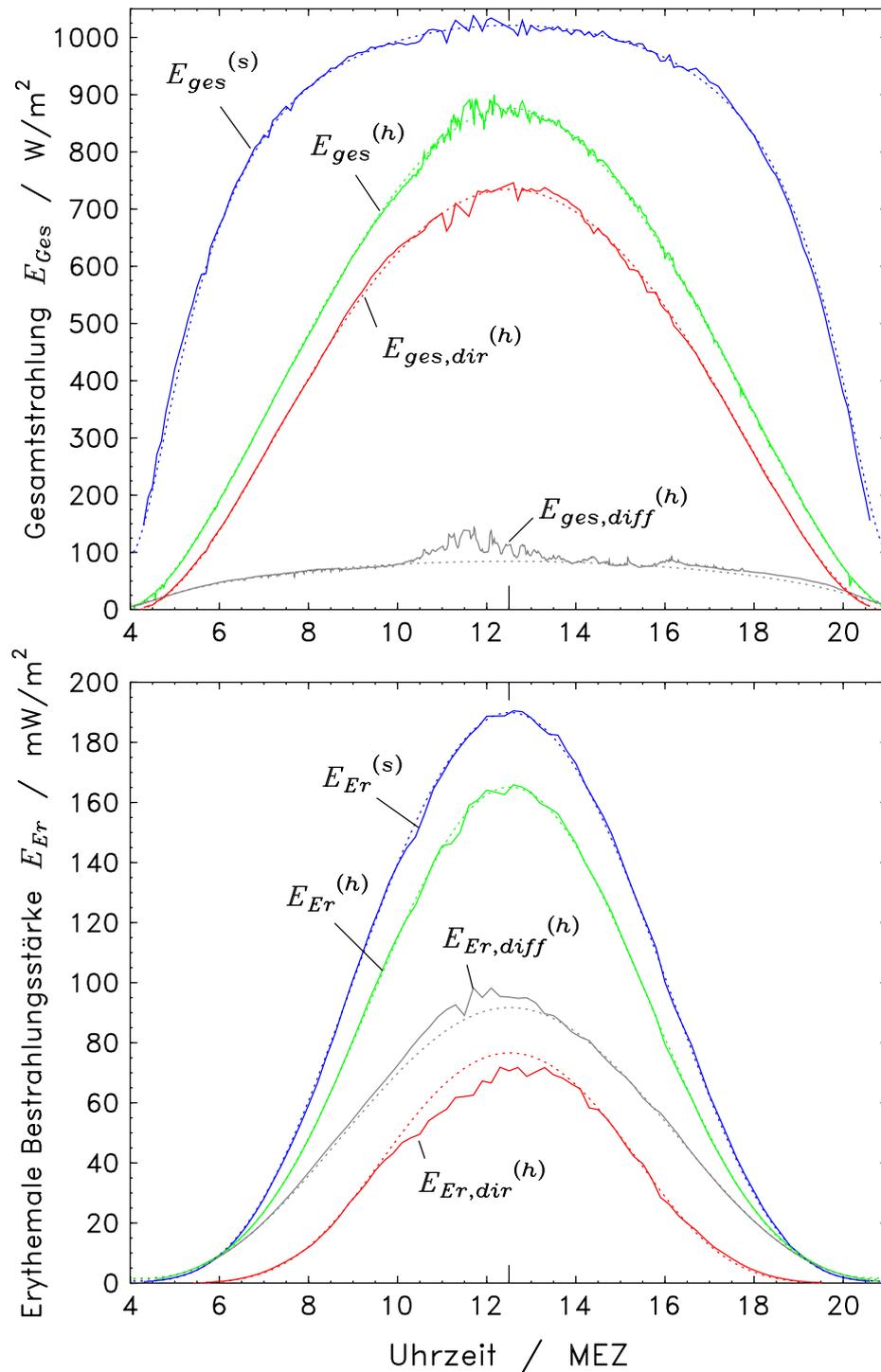


Abb. 4.4: Verlauf der Gesamtstrahlung E_{ges} (oben) bzw. der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Er} (unten) am 04.07.2001 in Westerland auf Sylt bei senkrecht zur Sonne ausgerichteter Empfängerfläche. Zusätzlich dargestellt ist die globale, direkte und die diffuse Gesamtstrahlung (oben) sowie die globale, direkte und die diffuse erythemwirksamen UV-Strahlung (unten) auf eine horizontal ausgerichtete Empfängerfläche. Die gestrichelten Kurven zeigen theoretisch berechnete Tagesverläufe.

- Am 04. Juli 2001 beträgt die Gesamtstrahlung bei senkrecht zur Sonne ausgerichteter Empfängerfläche zur Mittagszeit über 1030 W/m^2 , die globale Gesamtstrahlung 890 W/m^2 . Dabei gilt: $E_{ges}^{(h)} = E_{ges}^{(s)} \cdot \sin(h)$. Das Maximum des direkten Anteils umgerechnet auf eine horizontale Fläche beträgt 750 W/m^2 . Die diffuse Gesamtstrahlung ist mit 90 bis maximal 140 W/m^2 für das Sylter Nordseeklima gering. Der Anstieg zwischen 10:30 MEZ und 13:30 MEZ ist dabei auf Quellbewölkung verbunden mit einer geringfügigen Zunahme der Dichtigkeit zurückzuführen.

Die Summe aus der mit dem Schattenring-Pyranometer gemessenen diffusen Gesamtstrahlung und der mit dem Pyrliometer erfassten direkten Gesamtstrahlung, umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche, entspricht in etwa der gemessenen globalen Gesamtstrahlung. Der Fehler dieser Messmethode, also der Quotient $E_{ges}^{(h)} / (E_{ges,diff}^{(h)} + E_{ges,dir}^{(h)})$ beträgt im Tagesverlauf zwischen 2 % und 5 %. Die Werte der diffusen Gesamtstrahlung wurden dabei bereits mit Hilfe einer Schattenring-Korrektur derart angehoben, dass der Fehler weitgehend eliminiert wird, der sich durch die Verschattung des 5° breiten Bereichs des Himmelsgewölbes ergibt, über den sich die Sonne im Tagesverlauf bewegt.

- Die bei senkrecht zur Sonne ausgerichteter Empfängerfläche gemessene erythemwirksame UV-Strahlung beträgt am 04. Juli 2001 zur Zeit des Sonnenhöchststands über 190 mW/m^2 , bei horizontaler Ausrichtung 165 mW/m^2 . Das Maximum des direkten Anteils umgerechnet auf eine horizontale Fläche erreicht 75 mW/m^2 , die diffuse erythemwirksame UV-Strahlung erreicht über 90 mW/m^2 . Entgegengesetzt zu der Gesamtstrahlung ist der diffuse Anteil der erythemwirksamen UV-Strahlung während des ganzen Tages höher als der direkte Anteil.

Die Summe aus der mit dem DTM300 mit vorgesetzter Schattenkugel gemessenen diffusen UV-Strahlung und der mit dem DM150 mit vorgesetzter Blende erfassten direkten UV-Strahlung entspricht genau der gemessenen erythemwirksamen Globalstrahlung. Die Abweichung ist geringer als bei der Gesamtstrahlung, da kein Schattenring sondern eine Schattenkugel verwendet wurde. Der Fehler, also der Quotient $E_{Er}^{(h)} / (E_{Er,dir}^{(h)} + E_{Er,diff}^{(h)})$ beträgt im Tagesverlauf maximal 2 % und veranschaulicht die hohe Genauigkeit dieser Messmethode.

Die Verhältnisse der am 04.07.2001 erfassten Messgrößen der Gesamt- sowie der erythemwirksamen UV-Strahlung zwischen horizontaler und zur Sonne senkrechter Ausrichtung der Empfängerflächen sind in der folgenden Abbildung 4.5 dargestellt:

- Der Quotient $E_{ges,dir}^{(s)} / E_{ges,diff}^{(h)}$, also das Verhältnis zwischen direkter und diffuser Gesamtstrahlung beträgt zur Mittagszeit zwischen 7 und 10. Die Schwankung erklärt sich durch die bereits erwähnte wechselhafte Quellbewölkung zu dieser Zeit. Ein Raumwinkel von 2.5° um den Sonnenmittelpunkt beinhaltet folglich eine 7- bis 10-fach höhere Gesamtstrahlung als das restliche Himmelsgewölbe. Die Gesamtstrahlung als Summe der Anteile des ultravioletten, sicht-

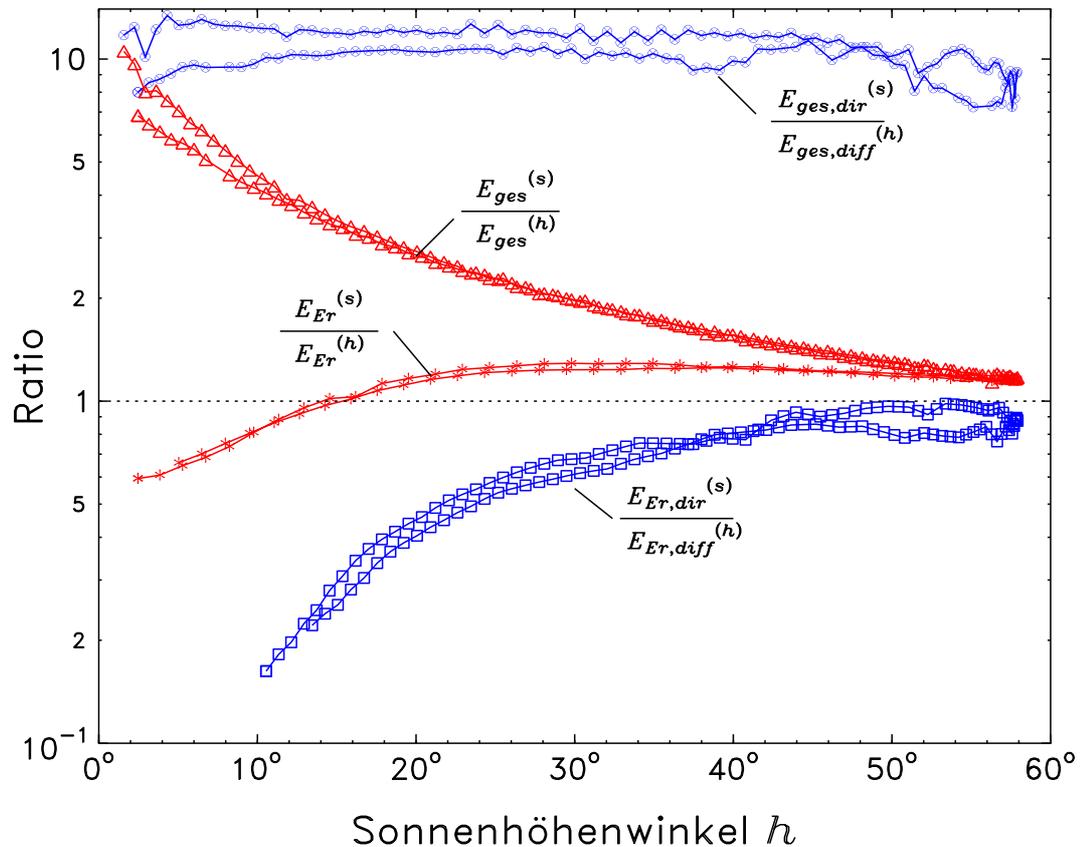


Abb. 4.5: Verlauf der Quotienten unterschiedlicher Messgrößen der Gesamtstrahlung sowie der erythemwirksamen UV-Strahlung vom 04. Juli 2001 als Funktion der Sonnenhöhe h .

baren sowie des infraroten Spektralbereichs ist aufgrund der geringen RAYLEIGH-Streuung über diesen Bereich somit überwiegend direkte Strahlung. Der Anteil der diffusen Streustrahlung ist bis zu eine Größenordnung geringer.

- Entgegengesetzte Verhältnisse herrschen bei der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke: Dort beträgt der Quotient $E_{Er,dir}^{(s)}/E_{Er,diff}^{(h)}$, also das Verhältnis zwischen dem direkten und dem diffus im Himmelsgewölbe gestreuten Anteil zur Zeit des Sonnenhöchststands 0.9 ± 0.1 . Der Anteil der aus dem Himmelsblau gestreuten erythemwirksamen UV-Strahlung ist dabei zu jeder Tageszeit höher als der direkte Anteil aus einem Raumwinkel von 2.5° um den Sonnenmittelpunkt.

Bei einer Wellenlänge von 307 nm beträgt das Verhältnis zwischen dem direkten und dem diffusen Anteil zur Zeit des Sonnenhöchststands in guter Übereinstimmung zu [73] 0.75 ± 0.05 . Bei einer Wellenlänge von 380 nm überwiegt bereits der direkte Anteil, so dass sich ein Verhältnis 1.85 ± 0.1 ergibt.

- Der Quotient $E_{Er}^{(s)}/E_{Er}^{(h)}$, also das Verhältnis der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke zwischen einer zur Sonne senkrechten und einer horizontalen Ausrichtung des Empfängers, beträgt zur Zeit des Sonnenhöchststands etwa 1.15 bis 1.17. Das Maximum von 1.25 wird bei einer Sonnenhöhe von 30° erreicht. Mit kleiner werdender Sonnenhöhe fällt das Verhältnis dann bis auf 0.6 ab. Diejenigen Empfängerflächen, die senkrecht zur Sonne ausgerichtet sind, beispielsweise die „Sonnenterrassen des menschlichen Körpers“, sind folglich zur Mittagszeit einer etwa 15 % bis 17 % höheren, bei einem Sonnenhöhenwinkel von 30° einer 25 % höheren erythemwirksamen UV-Strahlung ausgesetzt als horizontal ausgerichtete Flächen [76]. Bei Höhenwinkeln kleiner als 15° überwiegt dann die auf einer horizontalen Empfängerfläche gemessene erythemwirksame Bestrahlungsstärke gegenüber einer senkrechten Ausrichtung.

Die Messungen im Modus der Sonnennachführung zeigen bereits wesentliche Unterschiede im Tagesverlauf der erythemwirksamen UV-Strahlung im Vergleich zur Gesamtstrahlung. Letztere unterliegt als Summe der Anteile des ultravioletten, sichtbaren sowie des infraroten Spektralbereichs nur in geringem Maße atmosphärischer Streuung, so dass der Anteil der direkten Strahlung während des ganzen Tages bis zu eine Größenordnung höher ist als der Anteil der diffus gestreuten Strahlung. Im Gegensatz hierzu steht die erythemwirksame UV-Strahlung, die aufgrund der Dominanz der Wellenlängen im UVB-Bereich an der Erythemfunktion stark RAYLEIGH-gestreut wird, so dass der aus dem Himmelsgewölbe gestreute Anteil gegenüber dem direkten Anteil während des ganzen Tages überwiegt.

4.2.3 Zenitscan

Am 23. Mai 2001 wurde die Messapparatur im Zenitscan-Modus (vergl. Kap. 3.6.2) betrieben. Die Messungen erfolgten zwischen 12:02 MEZ und 12:16 MEZ bei einer Sonnenhöhe von $55.1^\circ \pm 0.1^\circ$ sowie zwischen 16:07 MEZ und 16:20 MEZ bei einer Sonnenhöhe von $35.7^\circ \pm 0.8^\circ$. Die vorgesetzte Blende bewirkte, dass nur Strahlung entlang des Längengrades der Sonne aus einem Raumwinkel mit einem Durchmesser von 5° erfasst wurde. Abbildung 4.6 auf Seite 50 zeigt die relative, auf die maximale Intensität normierte Bestrahlungsstärke als Funktion des Höhenwinkels, auf den die Empfängerfläche ausgerichtet wurde. Das Maximum (=1) wird bei einer Höhe erreicht, bei welcher der Diffusor des Spektralradiometers mit der vorgesetzten Blende direkt auf die Sonne ausgerichtet ist, so dass genau der Bereich von 2.5° um den Sonnenmittelpunkt erfasst wird. Alle anderen Messpunkte erfassen die diffuse Streustrahlung bei dem jeweiligen Höhenwinkel entlang des Längengrades der Sonne. Aufgrund der großen Unterschiede in der Bestrahlungsstärke zwischen direkter und gestreuter Strahlung sind die Ordinaten logarithmisch skaliert. Aus den in Abbildung 4.6 dargestellten Messungen lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

- Die relative Bestrahlungsstärke der diffusen, im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung nimmt mit steigender Wellenlänge ab: Im UVB-Bereich bei 307 nm

ist die gestreute Strahlung im Verhältnis zur direkten Sonnenstrahlung höher als im UVA-Bereich bei 380 nm. Im sichtbaren Teil des Spektrums nimmt der Anteil der diffusen Streustrahlung weiter ab. Der Grund ist auch hier die $1/\lambda^4$ -Abhängigkeit der RAYLEIGH-Streuung von der Wellenlänge.

- Bei einer Wellenlänge von 307 nm steigt die Verteilung der diffusen Streustrahlung vom Horizont unterhalb der Sonne bis zu ihrem Maximum 5° unterhalb der Sonnenposition monoton an. Oberhalb der Sonne bis zum Zenit und weiter bis zum sonnenrückwärtigen Horizont sinkt der diffuse Anteil dann wieder kontinuierlich ab. Das Verhältnis zwischen maximaler diffuser Streustrahlung in einer Winkelentfernung von 5° zur Sonnenposition und minimaler diffuser Streustrahlung am sonnenrückwärtigen Horizont beträgt bei 307 nm etwa 2.7.
- Bei den Wellenlängen 380 nm, 450 nm sowie 550 nm zeigt sich ein zunehmend stärker ausgeprägtes Minimum der diffusen Streustrahlung. Der Grund hierfür ist die Phasenfunktion der RAYLEIGH-Streuung (vergl. Abb. 2.9), nach der senkrecht zur Einfallrichtung der Strahlung die Streuintensität minimal wird. Diesem Effekt überlagert sich jedoch die zunehmende Rückwärtsstreuung im Bereich des rückwärtigen Horizonts, so dass das resultierende Minimum nicht exakt senkrecht unter einer Winkeldifferenz von 90° zur Sonnenposition auftritt, sondern bei kleineren Winkeln zwischen 70° zum Sonnenhöchststand und 80° bei einer Sonnenhöhe von 35.7° . Im Bereich des resultierenden Minimums ist die diffuse Streustrahlung im sichtbaren Spektralbereich bei einer Wellenlänge von 550 nm zur Zeit des Sonnenhöchststands etwa 17-fach, bei einer Sonnenhöhe von 35.7° etwa 30-fach geringer als bei 307 nm.
- Betrachtet man die Wellenlänge von 380 nm, so zeigt sich, dass das Verhältnis zwischen maximaler diffuser Streustrahlung in einer Winkelentfernung von 5° zur Sonnenposition und minimaler diffuser Streustrahlung im resultierenden Minimum bei einer Sonnenhöhe von 55.1° etwa 3.5, bei einer Höhe von 35.7° etwa 4.7 beträgt. Für 550 nm ergeben sich Verhältnisse von 9.6 bzw. 15.5.

Die Messungen im Zenitscan-Modus zeigen, dass die im Himmelsgewölbe entlang des Längengrades der Sonne gestreuten Strahlungsanteile im Verhältnis zur direkten Sonnenstrahlung im UVB-Bereich bei einer Wellenlänge von 307 nm über eine Größenordnung höher sind als im sichtbaren Bereich bei 550 nm. Zudem ist der Verlauf der Streustrahlung entlang des Längengrades der Sonne im UVB-Bereich homogener, sie fällt monoton von der Position der Sonne bis zu den Horizonten ab. Bei 550 nm hingegen fällt die insgesamt geringere relative Streustrahlung mit zunehmendem Winkelabstand von der Sonnenposition zunächst steiler ab, erreicht ihr Minimum unter einem Winkel von etwa 70° bis 80° zur Sonne und steigt bis zum Horizont aufgrund der Rückwärtsstreuung wieder an. Das Verhalten der diffusen Streustrahlung einer Wellenlänge von 380 nm im UVA-Bereich liegt zwischen dem der UVB- und der Strahlung aus dem sichtbaren Spektralbereich.

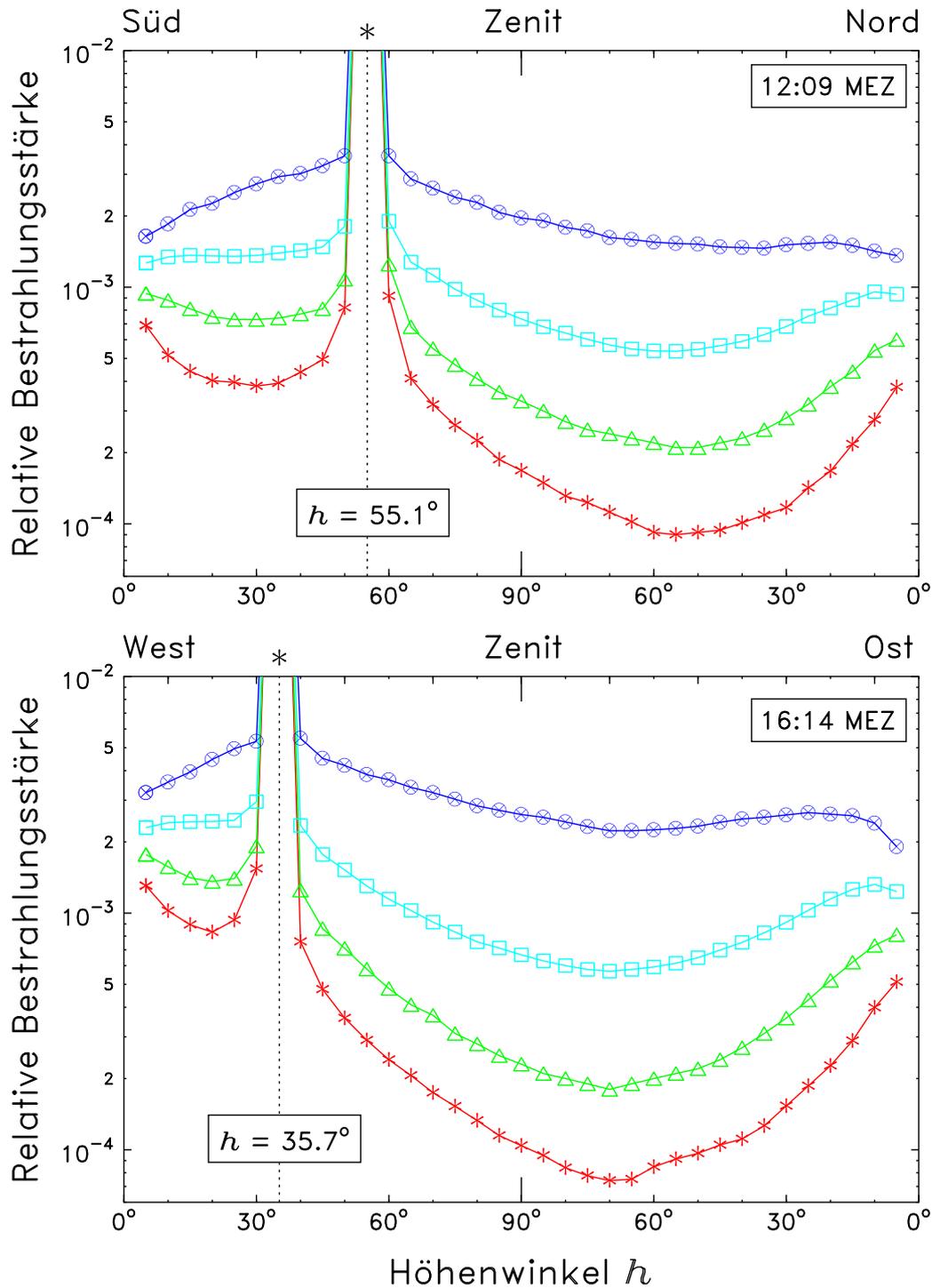


Abb. 4.6: Abhängigkeit der relativen, auf die direkte Sonnenstrahlung bezogenen Bestrahlungsstärke vom Höhenwinkel, auf den die Empfängerfläche im Zenitscan-Modus mit vorgesetzter Blende ausgerichtet wird. Die Messungen erfolgten am 23.05.2001 um 12:09 MEZ und 16:14 MEZ bei den Wellenlängen 307 nm (\otimes), 380 nm (\square), 450 nm (\triangle) und 550 nm (\diamond). Als gestrichelte Linie ist der Höhenwinkel der aktuellen Sonnenposition (*) eingezeichnet.

4.2.4 Zenitscan-Modus mit ebener Empfängerfläche

Ein in Westerland von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang wolkenfreier Tag, an dem die Messapparatur im Zenitscan-Modus, jedoch ohne vorgesezte Blende betrieben wurde, war der 27. Juli 2001. Die ebene, unverschattete Empfängerfläche, die auch bei diesen Messungen entlang des Längengrades der jeweils aktuellen Sonnenposition ausgerichtet wurde, empfängt auf diese Weise einen Teil der im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung und darüber hinaus in Abhängigkeit vom Neigungswinkel auch direkte sowie vom Untergrund reflektierte Strahlung. Die Messungen am 27.07.2001 wurden von 09:36 MEZ bis 09:50 MEZ bei einer Sonnenhöhe von $25.6^\circ \pm 0.8^\circ$ sowie von 12:27 MEZ bis 12:41 MEZ zur Zeit des Sonnenhöchststands von 54.4° durchgeführt. Abbildung 4.7 zeigt die relative, auf eine horizontale Ausrichtung normierte Bestrahlungsstärke als Funktion des Höhenwinkels der Ausrichtung.

Die Messungen im Zenitscan-Modus mit ebener, unverschatteter Empfängerfläche zeigen, dass die relative Bestrahlungsstärke bei einer Wellenlänge von 307 nm im UVB-Bereich wesentlich weniger mit der Ausrichtung entlang des Längengrades der Sonne variiert als im sichtbaren Spektralbereich bei 550 nm. Strahlung einer Wellenlänge von 380 nm im UVA-Bereich ähnelt in dieser Hinsicht mehr derjenigen im sichtbaren als im UVB-Bereich.

Die maximalen Werte der relativen Bestrahlungsstärke werden dabei insbesondere bei einer Wellenlänge von 307 nm nicht bei senkrechter Ausrichtung zur Sonne erreicht, sondern zur Zeit des Sonnenhöchststands bei einem 6° , bei einer Sonnenhöhe von 25.6° bei einem etwa 24° größeren Höhenwinkel. Der Grund hierfür ist, dass im UVB-Bereich – wie bereits in Kapitel 4.2.2 (Sonnennachführung) diskutiert – der Anteil der diffusen, im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung gegenüber dem direkten Strahlungsanteil überwiegt. Entgegengesetzte Verhältnisse liegen im sichtbaren Bereich bei 450 nm sowie 550 nm vor: Bei diesen Wellenlängen werden bei den in Abbildung 4.7 dargestellten Sonnenständen maximale Werte der Bestrahlungsstärke bei direkter Ausrichtung des Empfängers auf die Sonne gemessen. Der Grund hierfür ist, dass im sichtbaren Spektralbereich der Anteil der direkten Strahlung gegenüber der diffus gestreuten Strahlung um über eine Größenordnung überwiegt.

Des Weiteren fällt auf, dass bei niedrigen Sonnenständen auf einen senkrecht zum Horizont unterhalb der Sonne ausgerichteten ebenen Empfänger bei 380 nm eine 1.55-fache, bei 550 nm sogar eine 2.15-fache Bestrahlungsstärke verglichen mit einer horizontalen Ausrichtung gemessen wird. Bei 307 nm beträgt die gemessene Bestrahlungsstärke hingegen nur etwa 90 % derjenigen bei horizontaler Ausrichtung. Inwieweit diese Erhöhung des Strahlungsangebots auf eine ebene Empfängerfläche im UVA- sowie im sichtbaren Spektralbereich auf den gesamten Horizontbereich zutrifft, soll durch die nachfolgend aufgeführten Messungen im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung illustriert werden.

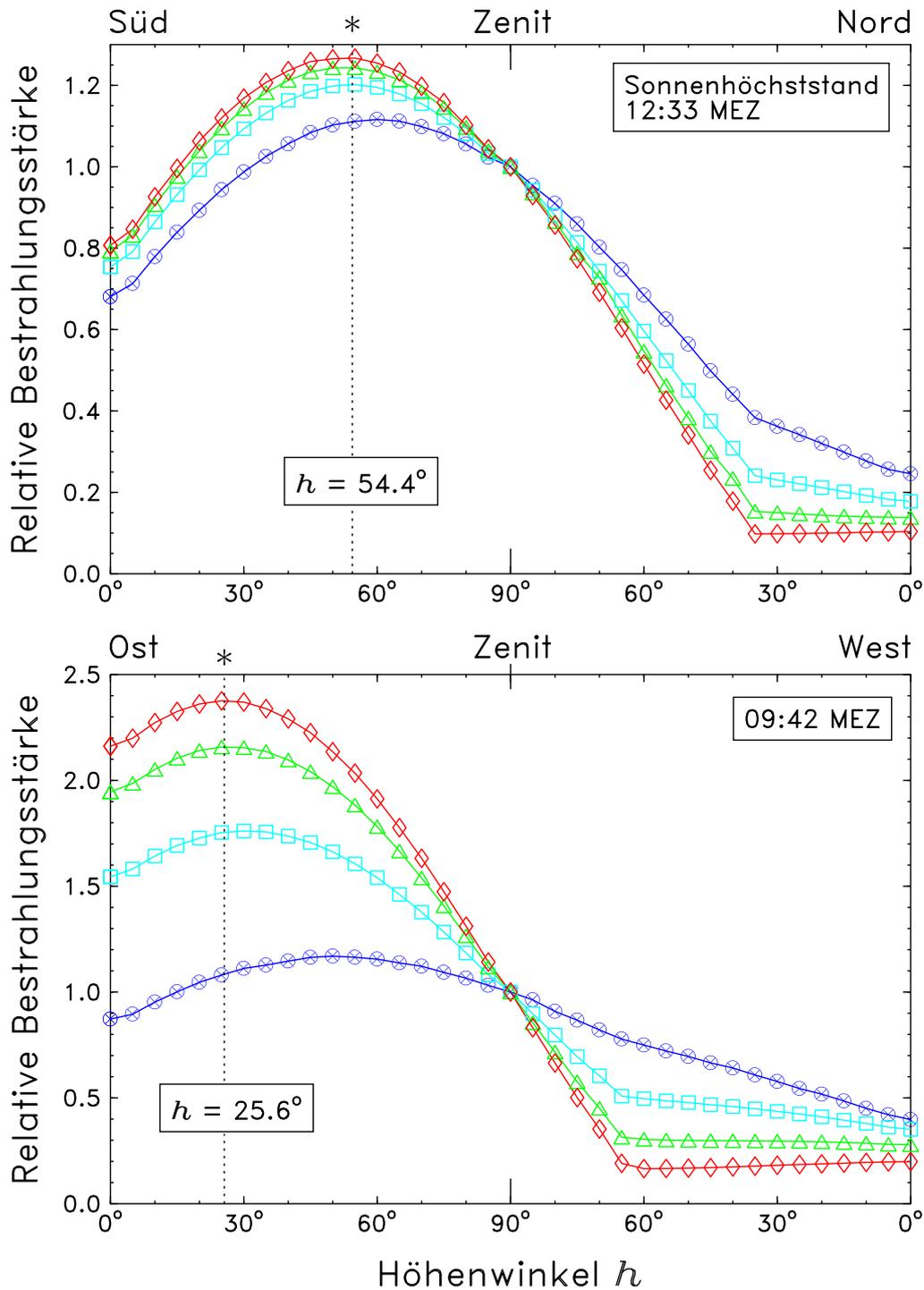


Abb. 4.7: Abhängigkeit der relativen, auf eine horizontale Ausrichtung bezogenen Bestrahlungsstärke vom Höhenwinkel, auf den die Empfängerfläche im Zenitscan-Modus mit ebener Empfängerfläche ausgerichtet wird. Die Messungen erfolgten am 27.07.2001 um 09:42 MEZ und 12:33 MEZ bei den Wellenlängen 307 nm (\otimes), 380 nm (\square), 450 nm (\triangle) und 550 nm (\diamond). Als gestrichelte Linie ist der Höhenwinkel der aktuellen Sonnenposition (*) eingezeichnet.

4.2.5 Kartierung des Himmelsgewölbes (Skymapping)

Zur Kartierung des Himmelsgewölbes bei unterschiedlichen Wellenlängen wurde die Messapparatur am 26. Juli 2001 im Skymapping-Modus (vergl. Kap. 3.6.3) mit vorgesetzter Blende betrieben. Die Strahlungs-/Wettersituation an diesem Tag lässt sich aus Abbildung 4.8 entnehmen: Der Himmel war von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang komplett wolkenfrei. Das Maximum der Gesamtstrahlung E_{ges} betrug zur Mittagszeit annähernd 830 W/m^2 . Der Wert der erythemwirksamen UV-Strahlung E_{Er} lag mit über 170 mW/m^2 im Bereich der höchsten auf Sylt gemessenen Werte des Jahres 2001. Dabei zeigen die Gesamtstrahlung und die erythemgewichtete UV-Strahlung einen symmetrischen Verlauf um die Zeit des Sonnenhöchststands. Entsprechend sind die am Vormittag erfassten Werte bei der Darstellung der Bestrahlungsstärke als Funktion des Sonnenhöhenwinkels deckungsgleich zu denen, die nachmittags bei gleicher Sonenhöhe gemessen wurden. Die diffuse Gesamtstrahlung $E_{ges,diff}$ hingegen erreicht ihr Maximum von annähernd 90 W/m^2 erst gegen 15:30 MEZ, also zweieinhalb Stunden nach Sonnenhöchststand. Die leichte Zunahme der diffusen Gesamtstrahlung verringert somit offensichtlich den Anteil der direkten Strahlung, so dass die Werte der globalen Gesamtstrahlung als Summe der Anteile der diffusen und direkten Strahlung vormittags und nachmittags bei identischer Sonnenhöhe gleich hoch sind.

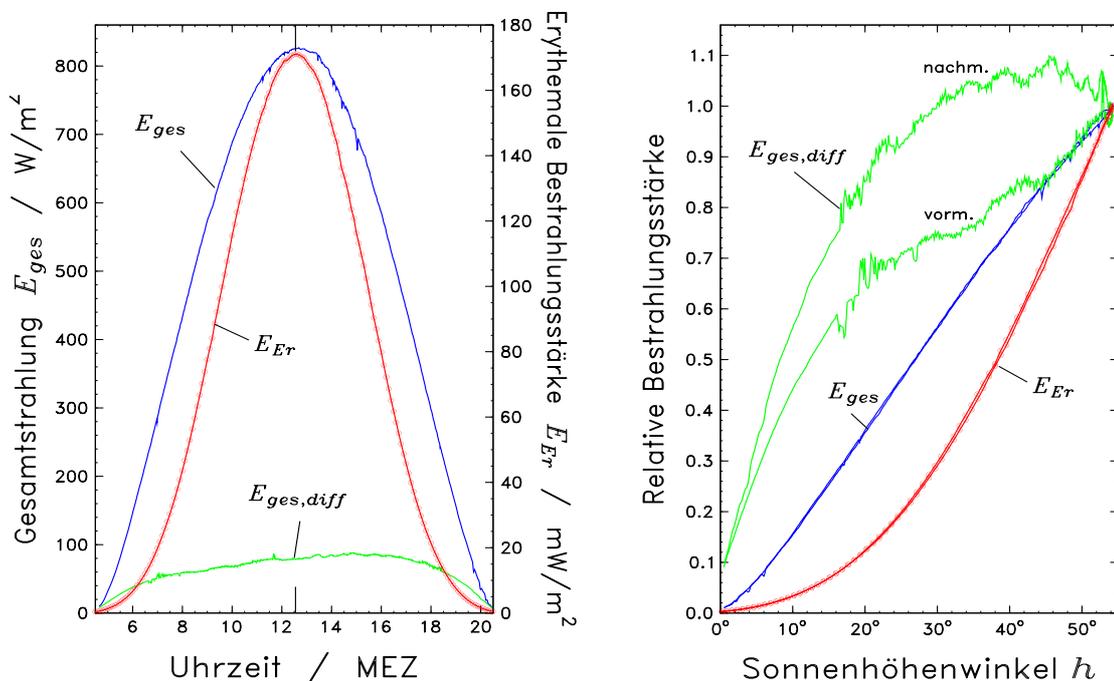


Abb. 4.8: Verlauf der Gesamtstrahlung E_{ges} , der diffusen Gesamtstrahlung $E_{ges,diff}$ sowie der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Er} am 26. Juli 2001 als Funktion der Tageszeit (links) sowie des Sonnenhöhenwinkels h (rechts).

Die Durchführung der Messungen erfolgte wechselweise bei den Wellenlängen 307 nm, 380 nm sowie 550 nm. Zwischen 06:57 MEZ und 18:20 MEZ konnten auf diese Weise insgesamt jeweils 26 Skymaps erstellt werden. Die folgenden Abbildungen 4.9, 4.11 und 4.13 zeigen die Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26. Juli 2001. Dargestellt sind die bei den entsprechenden Wellenlängen gemessenen Werte der spektralen Bestrahlungsstärke zu den angegebenen Zeiten und zusätzlich die Summe aller 26 Einzelmessungen. Die Darstellung erfolgt als Polardiagramm in Form von Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke. Wurde in einem der 107 Messpunkte die direkte Sonnenstrahlung erfasst, so wurde dieser Messwert von der Auswerte-Software eliminiert (vergl. Kap. 3.7), so dass nur die im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlungsanteile sowie die zwischen den Messpunkten interpolierten Werte berücksichtigt sind. Interpolierte Werte aus dem Bereich der Sonnenposition geben somit näherungsweise den Anteil vorwärts-gestreuter Strahlung an der direkten Strahlung an. Eingezeichnet sind darüber hinaus die Position der Sonne bei den Einzelmessungen (\bullet) sowie der Verlauf der Sonnenbahn in der Darstellung der aufsummierten Messwerte ($-\bullet-\bullet-$). Die angegebenen Zeiten sind in allen Abbildungen als mittlere Zeit zwischen Beginn und Ende einer etwa sieben Minuten dauernden Himmelsgewölbe-Kartierung zu verstehen.

Sowohl die Messwerte als auch die interpolierten Werte beziehen sich auf eine senkrecht zur jeweiligen Position am Himmelsgewölbe ausgerichteten Empfängerfläche mit vorgesetzter Blende. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den bisherigen und nachfolgenden Messungen werden die Werte in der Einheit W/m^2 dargestellt und nicht unter Berücksichtigung des Öffnungsdurchmessers der Blende entsprechend einem Raumwinkel von $5 \cdot 10^{-3}$ sr, umgerechnet in der Einheit der Strahldichte L in $W/(m^2 \cdot sr)$.

Die Abbildungen 4.10, 4.12 und 4.14 zeigen die Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe in Form von 3D-Graphiken. Dargestellt sind jeweils oben-links die zur Mittagszeit bei maximaler Sonnenhöhe durchgeführten Messungen (entsprechend Himmelsgewölbe-Kartierung Mitte-links). Die 3D-Graphiken unten-links entsprechen dem Tagessummen-Polardiagramm (Himmelsgewölbe-Kartierung unten-rechts). In den beiden rechten Abbildungen wurden die Werte durch Multiplikation mit dem Sinus des Höhenwinkels, bei dem der Messwert erfasst wurde, auf eine horizontale Empfängerfläche umgerechnet. Folgende Aussagen lassen sich aus den Abbildungen 4.9 bis 4.14 ableiten:

- 307 nm (Abb. 4.9 und 4.10):

Bei einer Wellenlänge von 307 nm nimmt die Bestrahlungsstärke von der jeweiligen Sonnenposition bis zum Horizont kontinuierlich ab. Der Anteil der diffusen Streustrahlung aus dem Umfeld der Sonne ist zur Zeit des Sonnenhöchststands etwa 3-fach höher als aus dem Horizontbereich. Die kleinsten Werte werden dann bei Azimutwinkeln von 45° (Nordost) bzw. 315° (Nordwest) in Horizontnähe gemessen. Auf der jeweils der Sonne gegenüber liegenden Seite des Himmelsgewölbes in einem Winkelabstand von etwa 75° zur Sonne deutet sich ein Plateau gleicher Bestrahlungsstärke an.

Auch bei der Summe der 26 Einzelmessungen nimmt der Verlauf der Bestrahlungsstärke kontinuierlich von Maximum bei einem Azimutwinkel von 180° und einer Höhe entsprechend der Mittagshöhe von annähernd 55° bis zum Horizont ab. Dabei ist die Verteilung der diffusen Streustrahlung symmetrisch zum Azimutwinkel von 180° .

- 380 nm (Abb. 4.11 und 4.12):

Bei einer Wellenlänge von 380 nm verläuft die Verteilung der Bestrahlungsstärke über das Himmelsgewölbe bereits deutlich inhomogener als bei 307 nm. Die niedrigsten Messwerte treten hier nicht am Horizont auf, sondern auf der jeweils der Sonne gegenüber liegenden Seite des Himmelsgewölbes in einem Winkelabstand von etwa 70° bis 75° zur Sonne. Der Anteil der diffusen Streustrahlung aus dem Umfeld der Sonne ist zur Zeit des Sonnenhöchststands etwa 3,5-fach höher als aus diesem Bereich minimaler Bestrahlungsstärke.

Besonders auffällig sind auch die relativ hohen Werte der Bestrahlungsstärke unter der Sonne. Dabei findet diese Erhöhung des Strahlungsangebots nicht nur direkt unterhalb der jeweiligen Sonnenposition sondern über einen Azimutbereich von bis zu $\pm 60^\circ$ zur Position der Sonne statt. Umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche (vergl. 3D-Abbildung rechts) sind diese Anteile jedoch umso stärker zu vernachlässigen, je mehr sie aus horizontnahen Bereichen zum Empfänger gelangen.

Die in Abbildung 4.8 dargestellte leichte Zunahme der Trübung am Nachmittag zeigt sich auch bei einem Vergleich der Messungen um 08:06 MEZ und um 17:01 MEZ, die bei ähnlichen Sonnenhöhenwinkeln durchgeführt wurden. Die Ausweitung der Konturlinien veranschaulicht die geringe Zunahme des diffus gestreuten Strahlungsanteils, insbesondere in Horizontnähe. Als Folge dessen ist auch das Polardiagramm der Tagessumme nicht völlig symmetrisch zum Azimutwinkel von 180° . Die Messpunkte mit über den Tagesverlauf maximaler Bestrahlungsstärke der diffusen Strahlung finden sich im Südwesten bei Azimutwinkeln von 240° bis 255° und Höhenwinkeln von 15° bis 20° . Grundsätzlich zeigt sich in der Abbildung der Tagessumme bei 380 nm ein hohes Plateau der diffusen Bestrahlungsstärke im gesamten südlichen Himmelsbereich unterhalb der Bahn der Sonne im Tagesverlauf auf senkrecht dorthin ausgerichtete Empfängerflächen. Auf horizontale Empfängerflächen sind diese Anteile von untergeordneter Bedeutung.

- 550 nm (Abb. 4.13 und 4.14):

Bei einer Wellenlänge von 550 nm fällt auf, dass der Anteil der diffusen Streustrahlung aus dem Bereich des Horizonts unterhalb der Sonne zu jeder Tageszeit höher ist als der Anteil aus dem unmittelbaren Umfeld der Sonne. Zur Mittagszeit ist sie dort über 6-fach höher als auf der gegenüber liegenden Seite des Himmelsgewölbes in einem Winkelabstand von etwa 70° bis 75° zur Sonne, in dem sich ein ausgeprägtes Minimum der Bestrahlungsstärke befindet (vergl. [7]). Selbst im Bereich des nördlichen Horizonts ist die Bestrahlungsstärke zum Sonnenhöchststand 3-fach höher als im Bereich dieses Minimums.

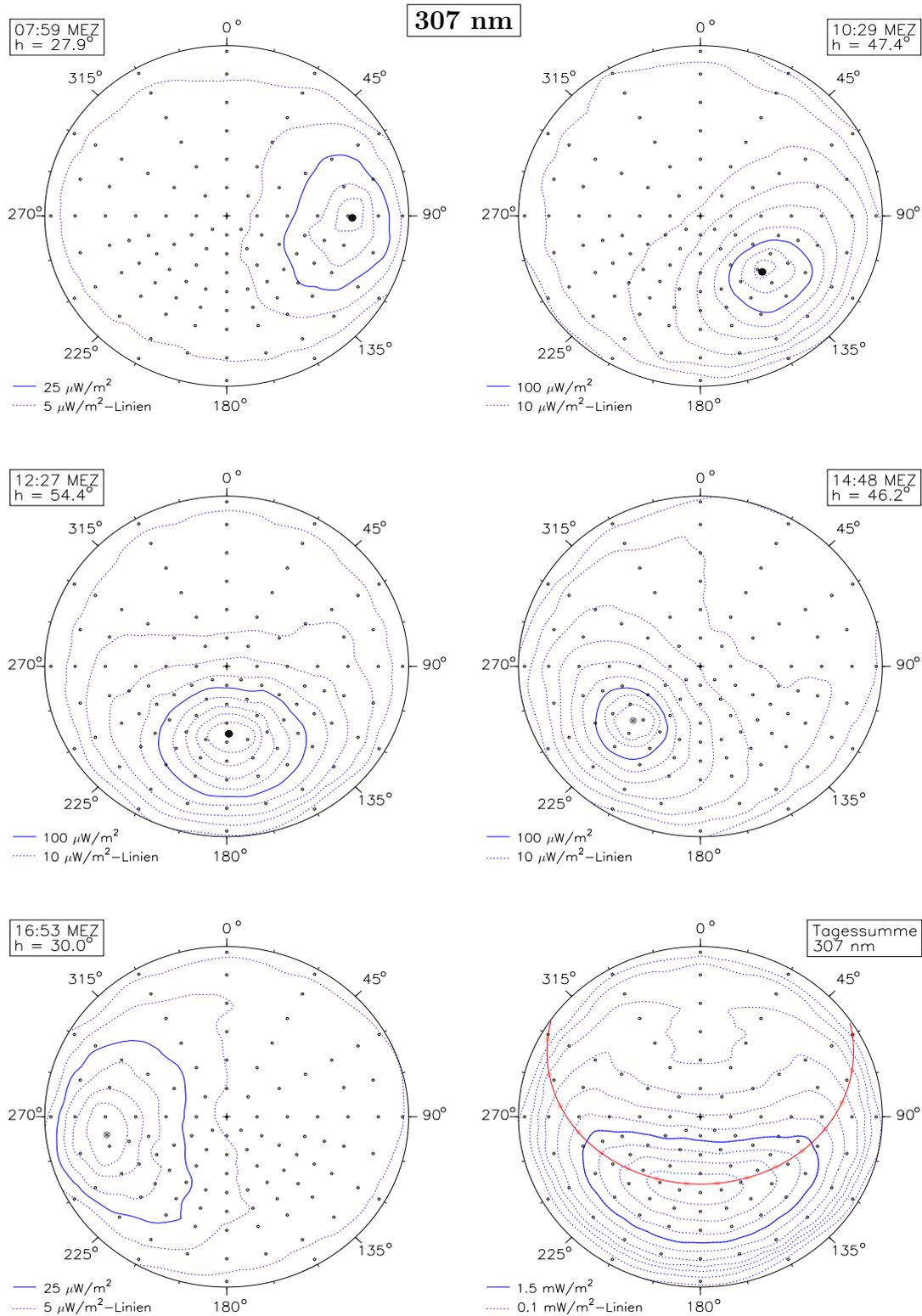
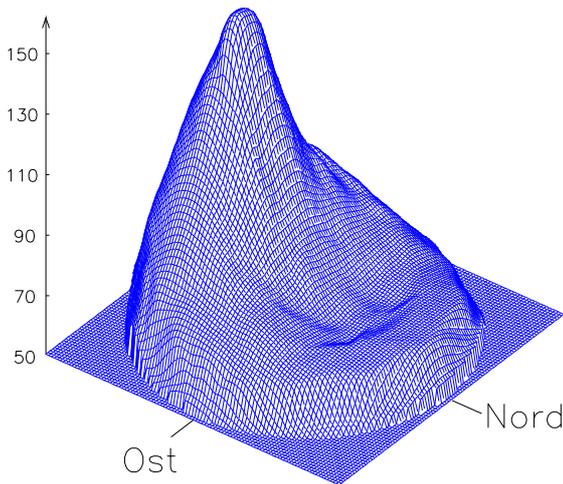


Abb. 4.9: Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26.07.2001. Dargestellt sind die Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke bei 307 nm zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Summe der 26 Einzelmessungen. Zusätzlich eingetragen ist die Position der Sonne (●) sowie der Verlauf der Sonnenbahn (—●—).

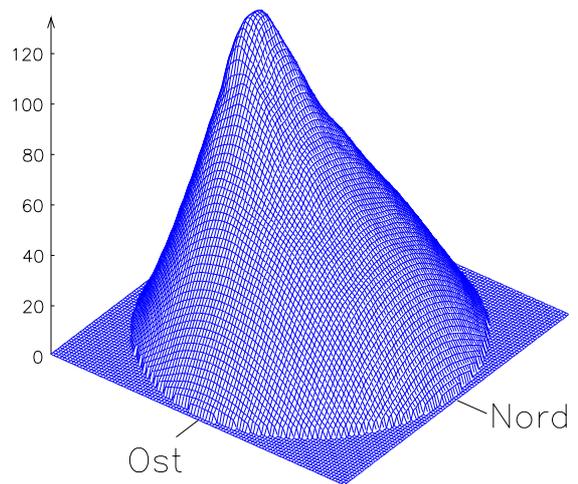
307 nm

Bestrahlungs-
stärke
in $\mu\text{W}/\text{m}^2$

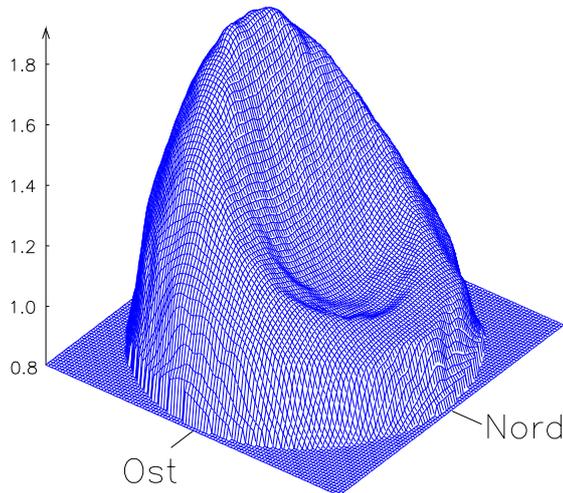


Bestrahlungs-
stärke $\cdot \sin(h)$
in $\mu\text{W}/\text{m}^2$

12:27 MEZ
 $h = 54.4^\circ$



Bestrahlungs-
stärke
in mW/m^2



Bestrahlungs-
stärke $\cdot \sin(h)$
in mW/m^2

Tagessumme
307 nm

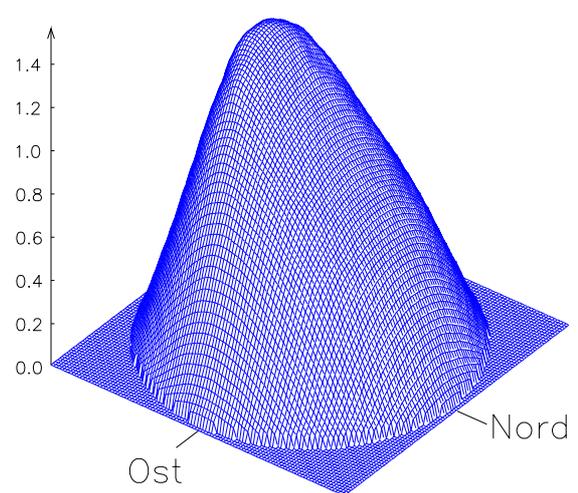


Abb. 4.10: Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26.07.2001. Dargestellt ist die Bestrahlungsstärke bei 307 nm um 12:27 MEZ (oben) sowie die Summe der 26 Einzelmessungen (unten) bei senkrechter Ausrichtung des Empfängers (links) sowie umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche (rechts).

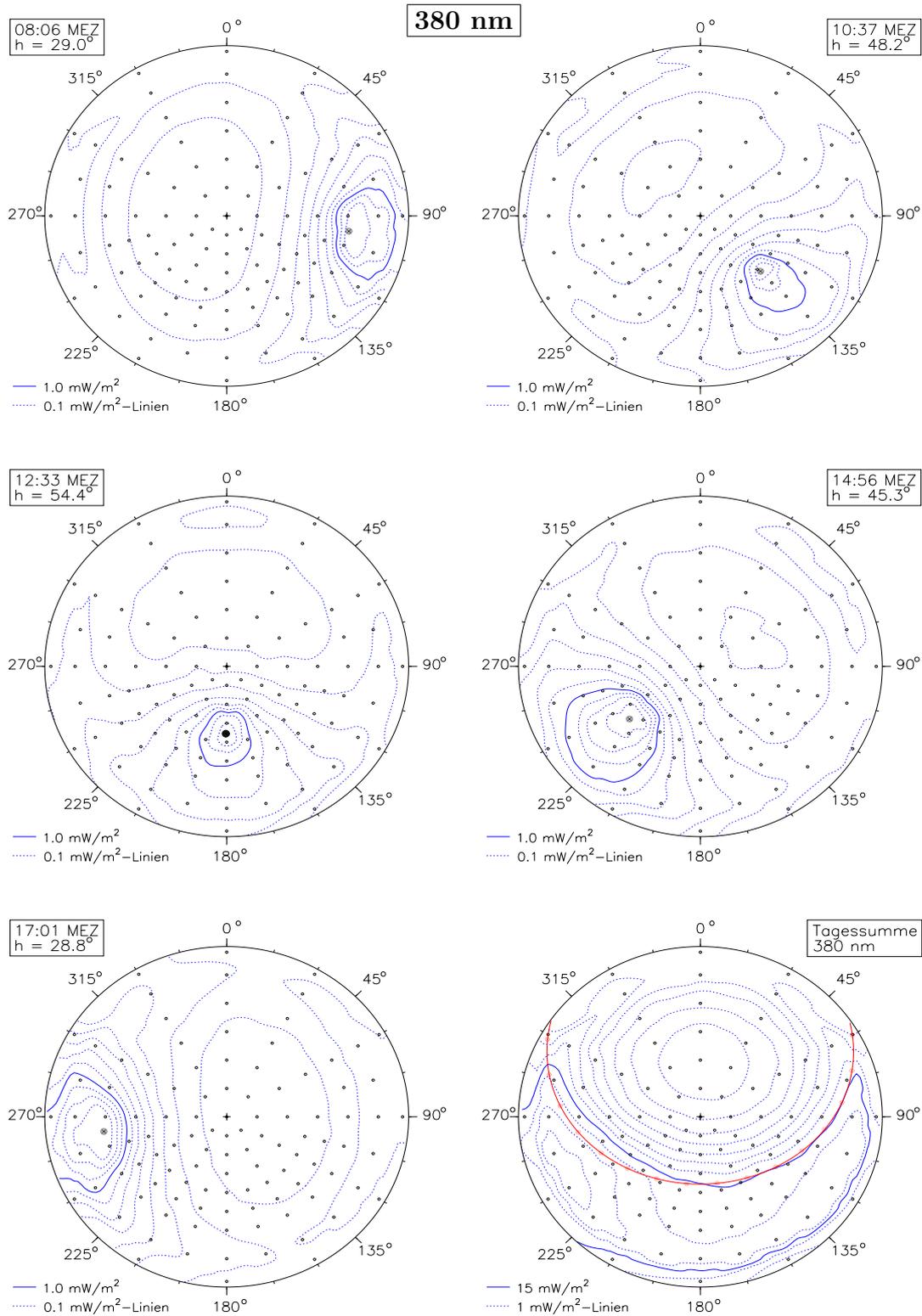
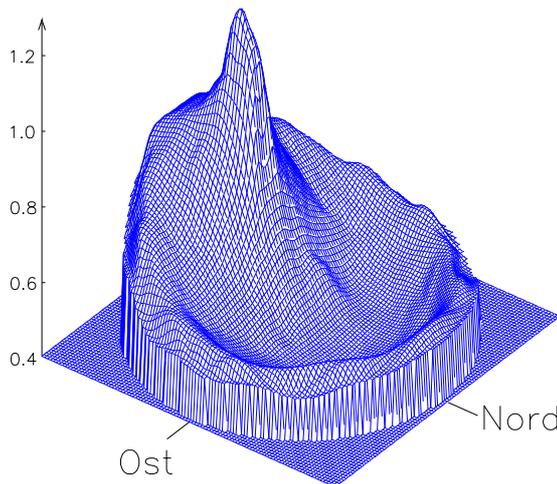


Abb. 4.11: Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26.07.2001. Dargestellt sind die Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke bei 380 nm zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Summe der 26 Einzelmessungen. Zusätzlich eingetragen ist die Position der Sonne (●) sowie der Verlauf der Sonnenbahn (—●—).

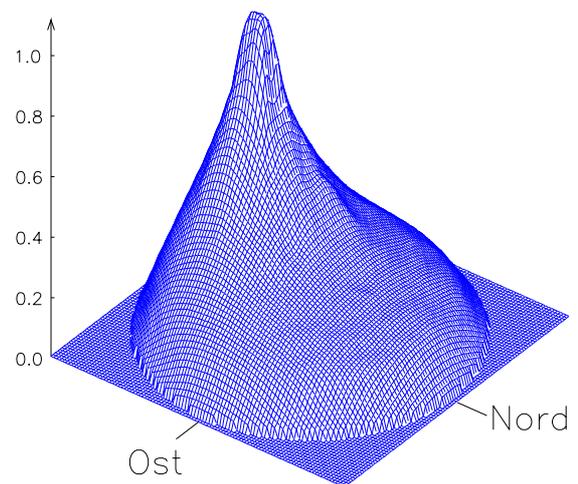
380 nm

Bestrahlungs-
stärke
in mW/m^2

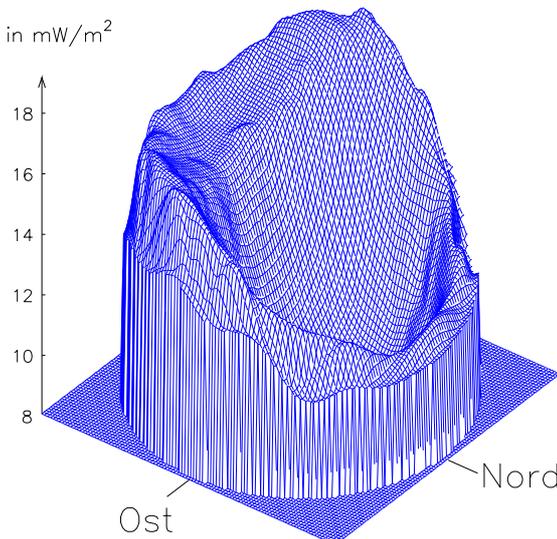


Bestrahlungs-
stärke $\cdot \sin(h)$
in mW/m^2

12:33 MEZ
 $h = 54.4^\circ$



Bestrahlungs-
stärke
in mW/m^2



Bestrahlungs-
stärke $\cdot \sin(h)$
in mW/m^2

Tagessumme
380 nm

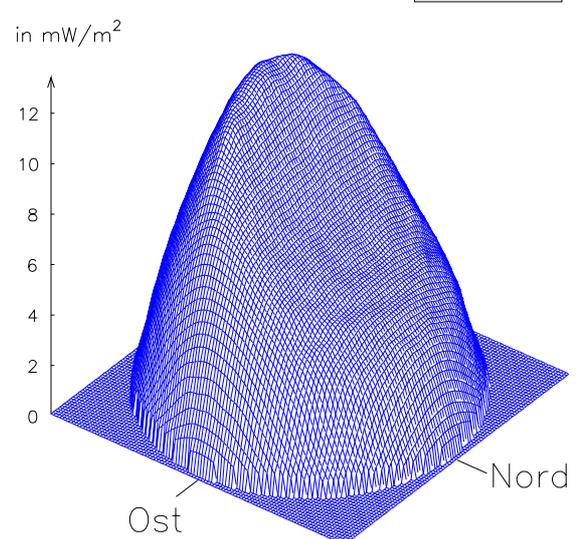


Abb. 4.12: Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26.07.2001. Dargestellt ist die Bestrahlungsstärke bei 380 nm um 12:33 MEZ (oben) sowie die Summe der 26 Einzelmessungen (unten) bei senkrechter Ausrichtung des Empfängers (links) sowie umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche (rechts).

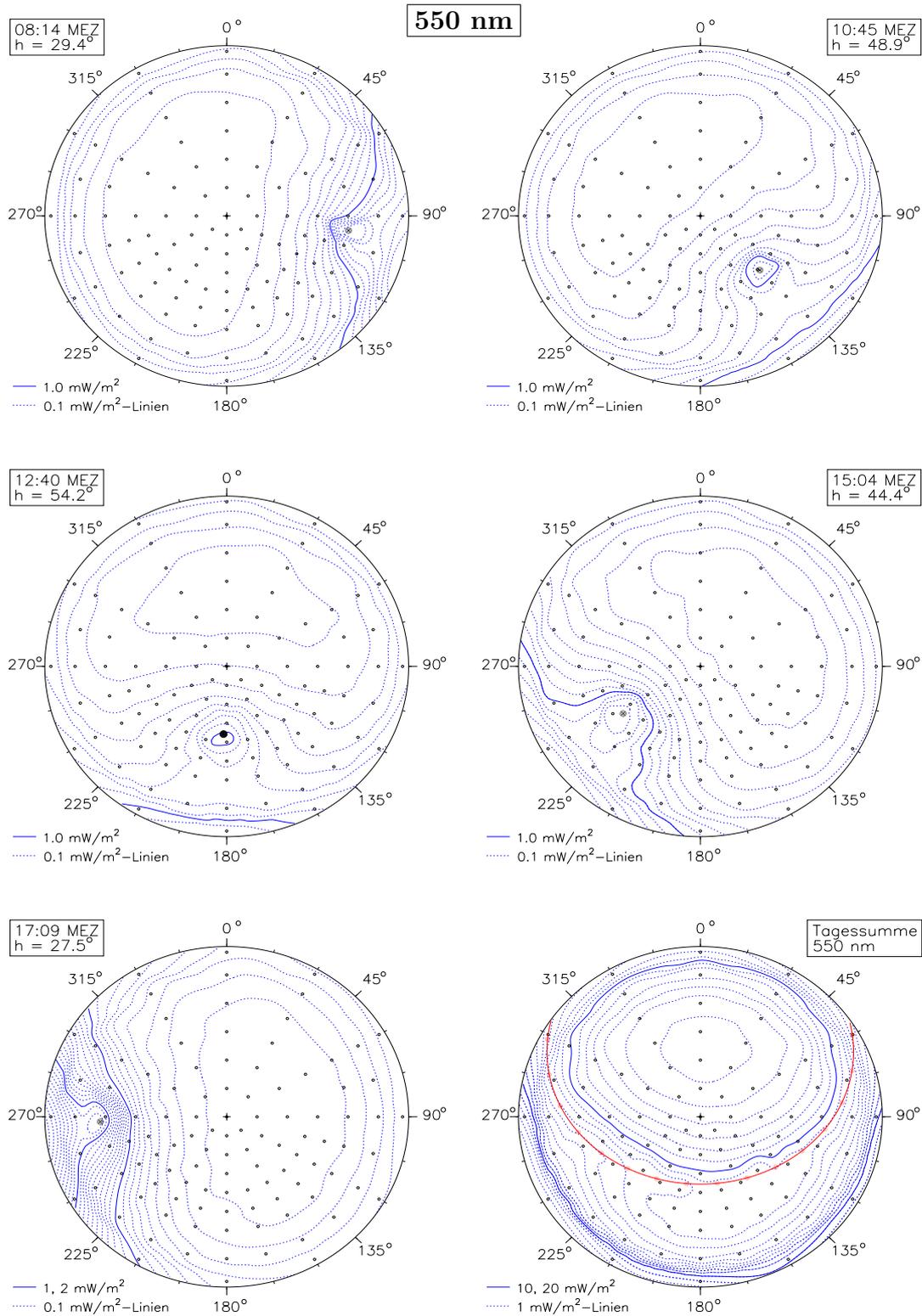


Abb. 4.13: Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26.07.2001. Dargestellt sind die Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke bei 550 nm zu verschiedenen Zeitpunkten sowie die Summe der 26 Einzelmessungen. Zusätzlich eingetragen ist die Position der Sonne (●) sowie der Verlauf der Sonnenbahn (—●—).

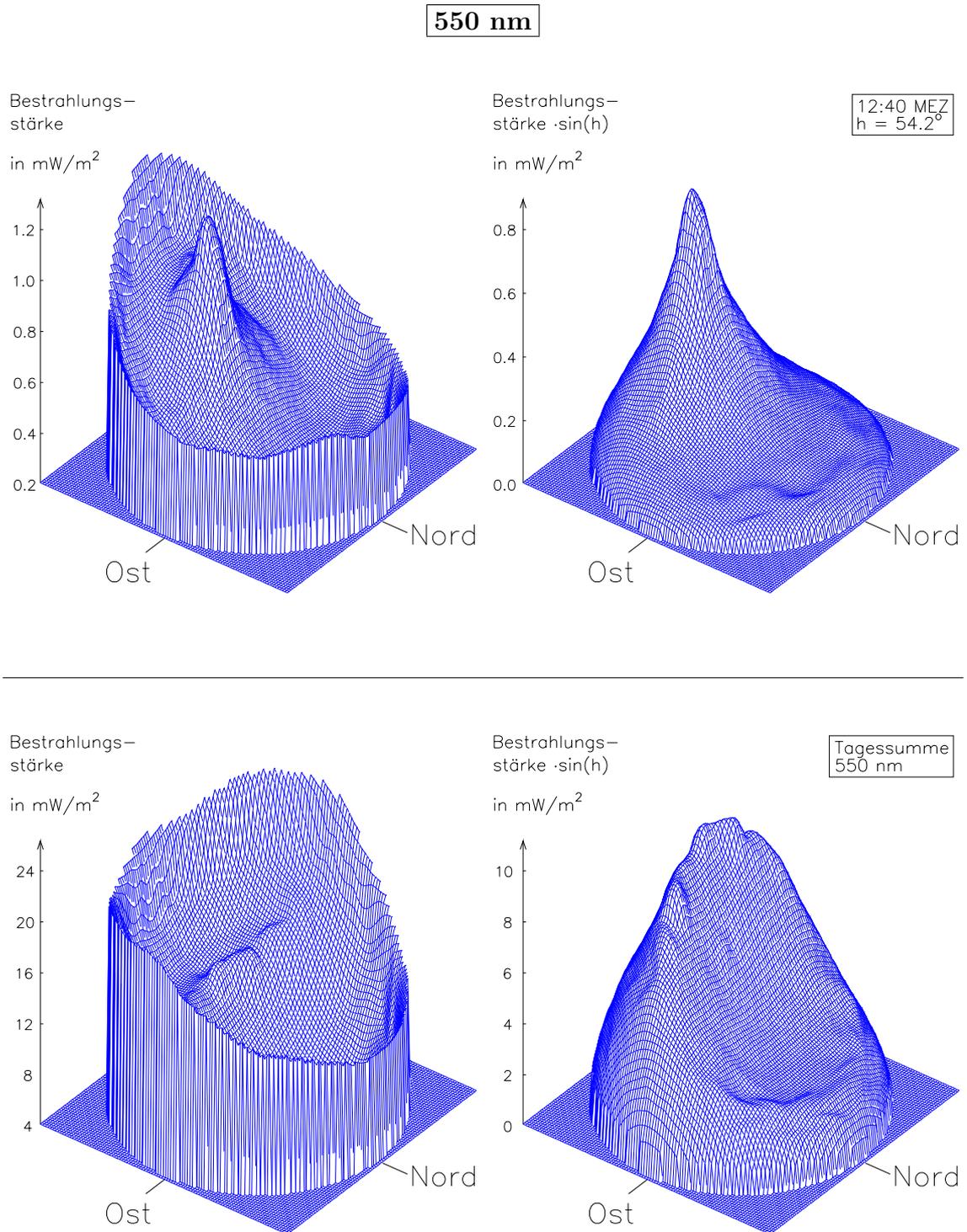


Abb. 4.14: Verteilung der diffus gestreuten Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26.07.2001. Dargestellt ist die Bestrahlungsstärke bei 550 nm um 12:40 MEZ (oben) sowie die Summe der 26 Einzelmessungen (unten) bei senkrechter Ausrichtung des Empfängers (links) sowie umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche (rechts).

Bezogen auf eine horizontale Empfängerfläche sind diese Anteile auch hier zu vernachlässigen.

Im sichtbaren Spektralbereich bei einer Wellenlänge von 550 nm wird die in Abbildung 4.8 gezeigte leichte Zunahme der Trübung am Nachmittag besonders deutlich: Die diffuse Strahlung am Horizont unterhalb der Sonne ist 17:09 MEZ verglichen mit 08:14 MEZ fast doppelt so hoch, wie anhand der Konturlinien deutlich wird. Das Polardiagramm der Summe der 26 Einzelmessungen ist aus diesem Grund ebenfalls nicht völlig symmetrisch zum Azimutwinkel von 180° . Anhand dieser Darstellung zeigt sich, dass der Anteil der diffusen Streustrahlung aus dem gesamten Horizontbereich, der auch rein visuell deutlich aufgehellt erscheint, sogar den Anteil aus dem Umfeld der Sonne übertrifft.

Die im Skymapping-Modus durchgeführten Messungen veranschaulichen die unterschiedliche Verteilung der im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlungsanteile auf senkrecht orientierte Empfängerflächen bei den Wellenlängen 307 nm, 380 nm und 550 nm. Im UVB-Bereich bei 307 nm ist die Verteilung der diffusen Strahlung über das Himmelsgewölbe weitestgehend homogen, sie fällt vom Umfeld der Sonne bis zum Horizont kontinuierlich ab. Bei 380 nm im UVA-Bereich ist die Verteilung bereits deutlich weniger homogen. Dort dominieren die Anteile aus einem Bereich unterhalb der Sonne bis zum Horizont. Über den Tag aufsummiert ergibt sich als Folge dessen ein erhöhtes Strahlungsangebot im gesamten südlichen Bereich des Himmelsgewölbes unterhalb der Bahn der Sonne im Tagesverlauf. Im sichtbaren Spektralbereich bei 550 nm schließlich dominiert diffuse Strahlung aus dem gesamten Horizontbereich und aus dem Umfeld der Sonne gegenüber einem Gebiet minimaler Streuung um mehr als das 6-fache. Das Auftreten des Bereichs minimaler Streuung auf der der Sonne gegenüber liegenden Seite des Himmelsgewölbes in einem Winkelabstand von etwa 70° bis 75° erklärt sich durch die Phasenfunktion der RAYLEIGH-Streuung in Überlagerung mit einer Zunahme der Rückwärts-/Mehrfachstreuung in Horizontnähe. Bezogen auf eine horizontale Empfängerfläche liefern Strahlungsanteile aus dem Horizontbereich jedoch keine nennenswerten Beiträge an der Globalstrahlung.

Die bei der Kartierung des Himmelsgewölbes erfassten Messwerte beziehen sich, wie bereits erwähnt, auf senkrecht zur jeweiligen Position am Himmelsgewölbe ausgerichtete Empfängerflächen. Durch die vorgesezte Blende werden Strahlungsanteile aus anderen Bereichen des Himmelsgewölbes unterdrückt. Da jedoch ebene Empfängerflächen die mit dem Cosinus des Einfallswinkels gewichtete Bestrahlungsstärke aus ihrem gesamten 2π -Empfangsbereich registrieren, werden die Messungen im Modus des Skymappings auch wie nachfolgend erläutert ohne Blende durchgeführt.

4.2.6 Skymapping-Modus mit ebener Empfängerfläche

Am 15.08.2001 wurde die Messapparatur im Modus des Skymappings, jedoch ohne vorgesezte Blende betrieben. Auf diese Weise wird die auf eine ebene, unterschiedlich geneigte Empfängerfläche auftreffende Bestrahlungsstärke gemessen. Diese setzt sich, wie bereits erwähnt, aus den Komponenten direkte Sonnenstrahlung, soweit die Empfängerfläche sich nicht selbst verschattet, diffus gestreute Strahlung sowie von der Umgebung reflektierte Strahlung zusammen. Abbildung 4.15 veranschaulicht die Strahlungs-/Wettersituation an diesem Tag: Der Himmel war bis auf einige Schönwetterwolken weitestgehend wolkenfrei. Ab ca. 15:30 MEZ sorgte jedoch Seenebel für wechselhafte Diesigkeit, wie sich am Anstieg der diffusen Strahlung $E_{ges,diff}$ und den Einschnitte im Tagesverlauf der Gesamtstrahlung E_{ges} erkennen lässt. Der maximale Wert der Gesamtstrahlung von 730 W/m^2 zur Mittagszeit liegt dabei etwa 8 % unterhalb des theoretischen, für einen an diesem Tag wolkenlosen Himmel berechneten Wert (vergl. Abb. 4.3). Das Maximum der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Er} von etwa 135 mW/m^2 entspricht genau dem berechneten Wert.

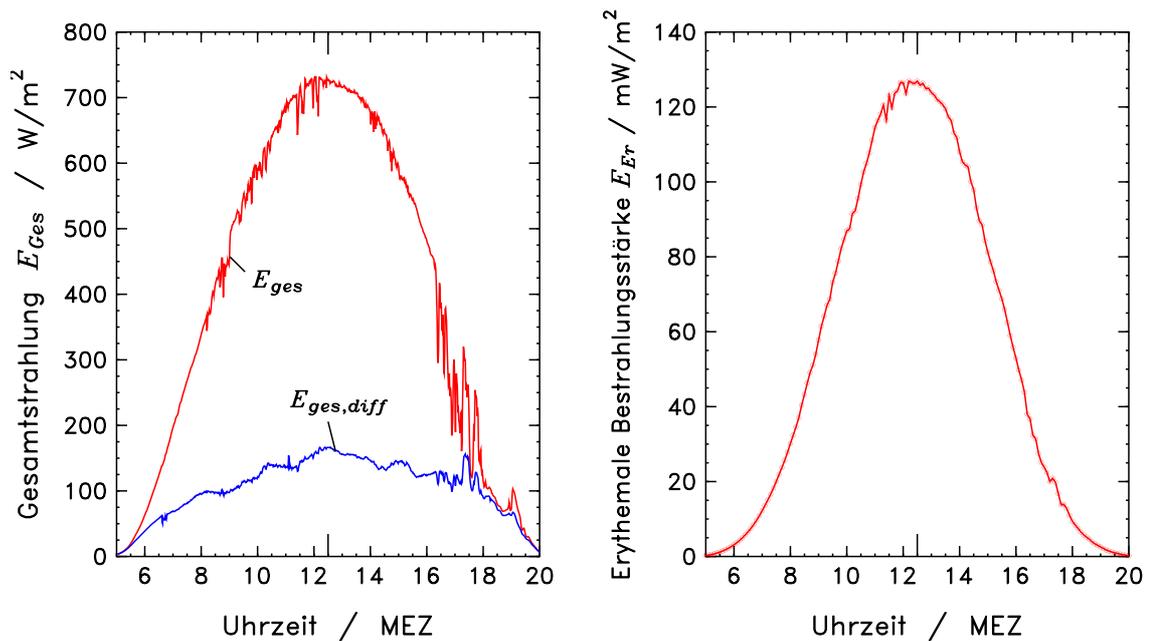


Abb. 4.15: Verlauf der Gesamtstrahlung E_{ges} , der diffusen Gesamtstrahlung $E_{ges,diff}$ sowie der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke E_{Er} am 25. August 2001.

Insgesamt konnten zwischen 07:53 MEZ und 19:08 MEZ bei den Wellenlängen 307 nm, 380 nm sowie 550 nm jeweils 28 Messungen durchgeführt werden. Die Abbildungen 4.16, 4.18 und 4.20 zeigen die gesamte auf eine ebene Empfängerfläche auftreffende Bestrahlungsstärke bei Ausrichtung des Empfängers auf einen beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe zu den angegebenen Zeiten und Wellenlängen sowie die Summe aller 28 Einzelmessungen. Die Darstellung erfolgt auch hier als

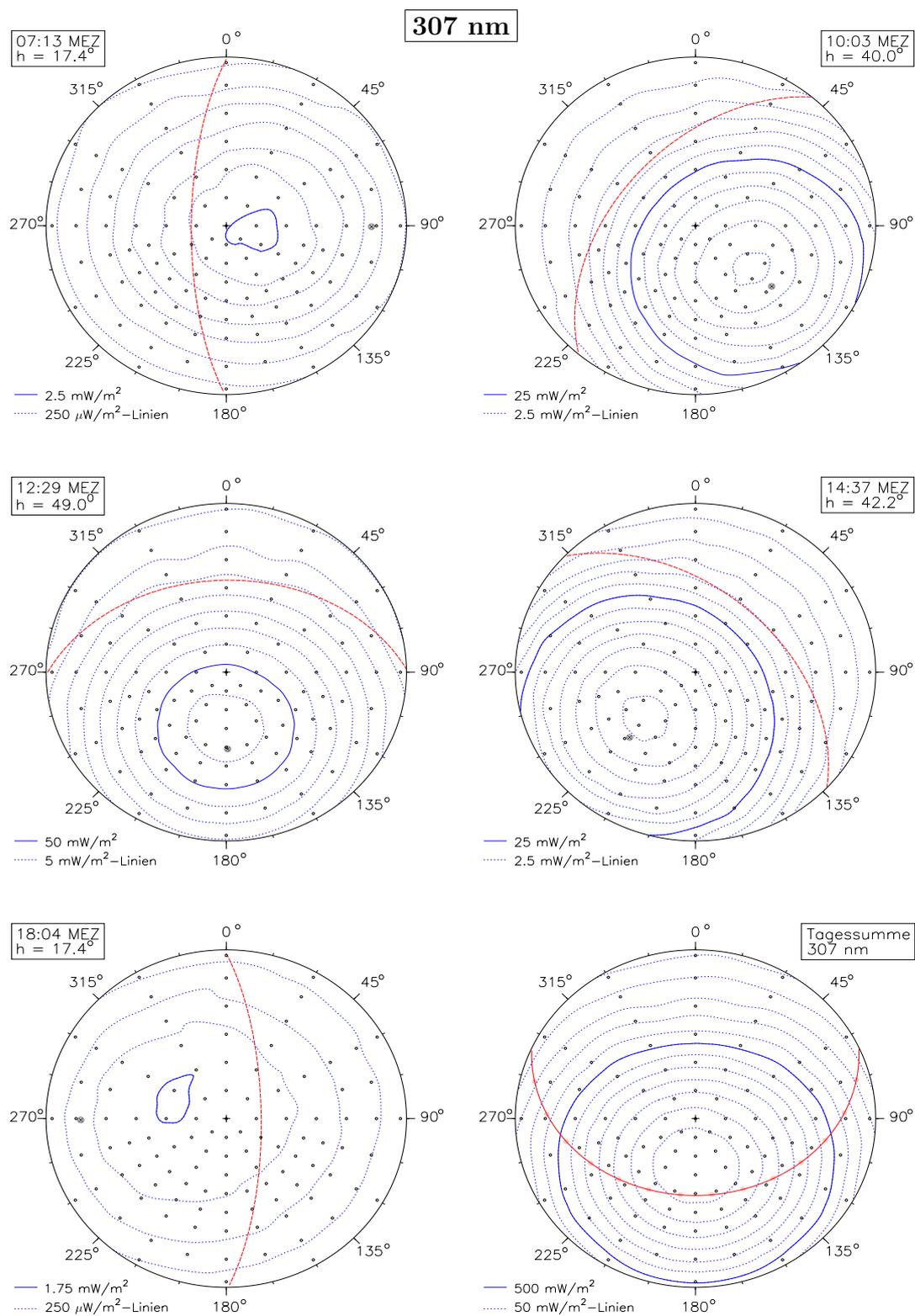


Abb. 4.16: Darstellung der Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke bei 307 nm, gemessen mit einer ebenen, geneigten Empfängerfläche am 15.08.2001. Zusätzlich eingezeichnet sind der Himmelsbereich senkrecht zur jeweiligen Sonnenposition (---) sowie die Summe der 28 Einzelmessungen und der Verlauf der Sonnenbahn (-●-●-).

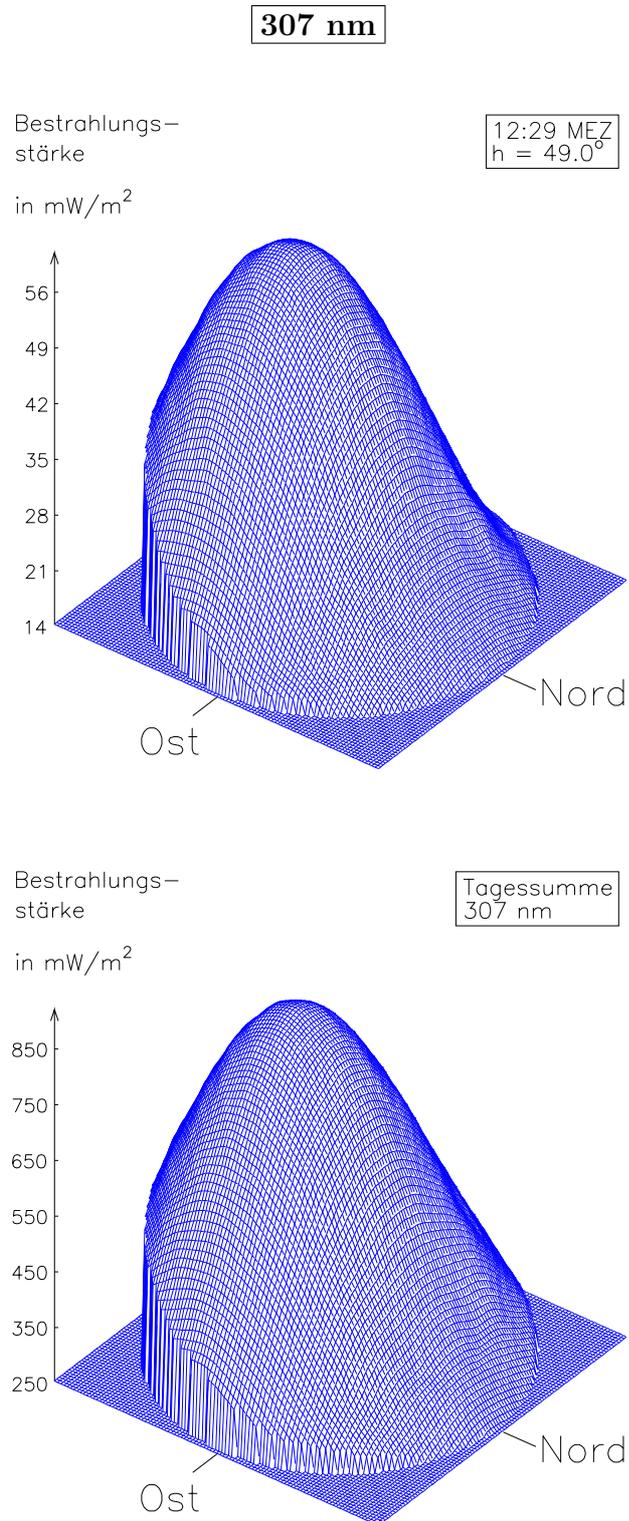


Abb. 4.17: 3D-Darstellung der mit einer ebenen, geneigten Empfängerfläche gemessenen Bestrahlungsstärke bei 307 nm vom 15.08.2001 um 12:29 MEZ (oben) sowie Summe der 28 Einzelmessungen (unten).

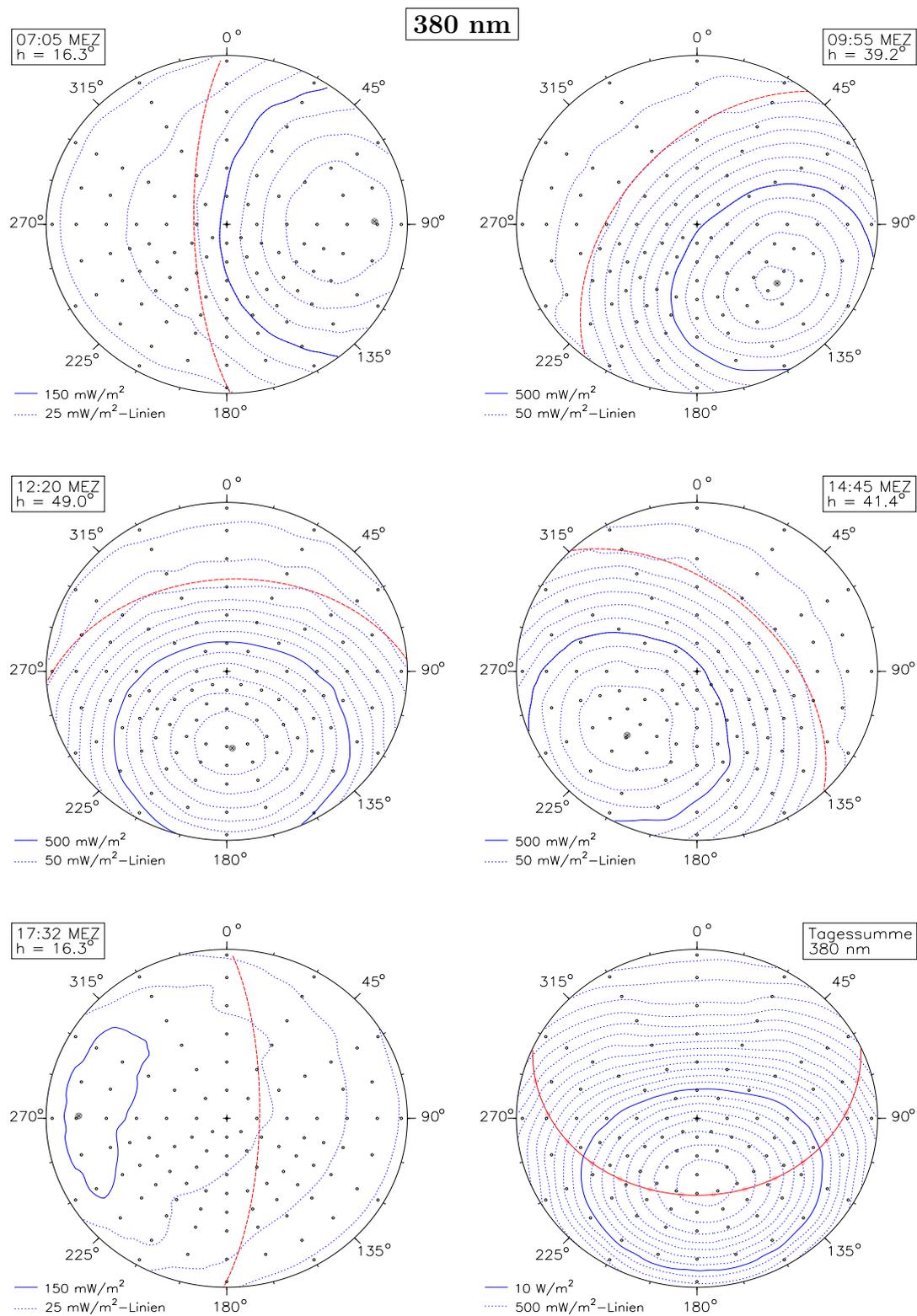


Abb. 4.18: Darstellung der Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke bei 380 nm, gemessen mit einer ebenen, geneigten Empfängerfläche am 15.08.2001. Zusätzlich eingezeichnet sind der Himmelsbereich senkrecht zur jeweiligen Sonnenposition (---) sowie die Summe der 28 Einzelmessungen und der Verlauf der Sonnenbahn (-●-●-).

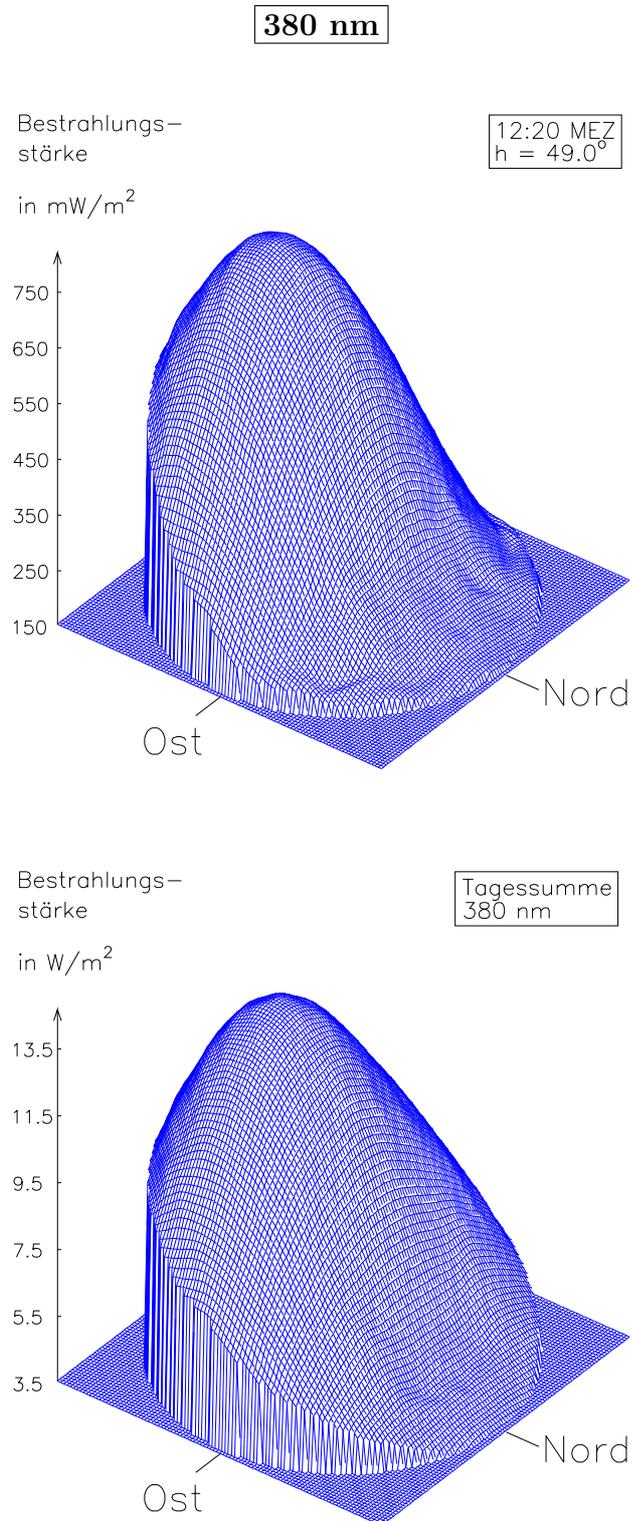


Abb. 4.19: 3D-Darstellung der mit einer ebenen, geneigten Empfängerfläche gemessenen Bestrahlungsstärke bei 380 nm vom 15.08.2001 um 12:20 MEZ (oben) sowie Summe der 28 Einzelmessungen (unten).

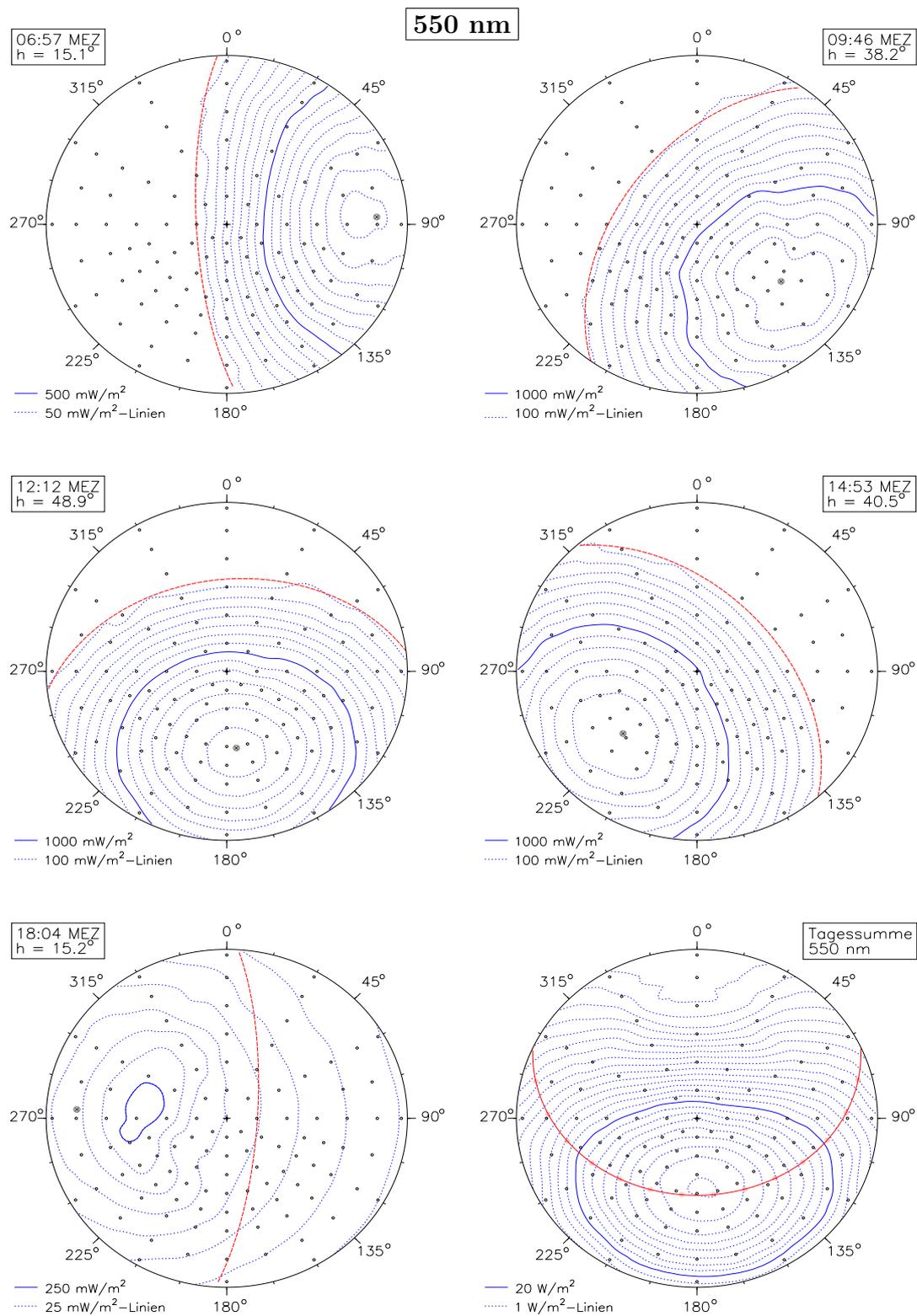


Abb. 4.20: Darstellung der Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke bei 550 nm, gemessen mit einer ebenen, geneigten Empfängerfläche am 15.08.2001. Zusätzlich eingezeichnet sind der Himmelsbereich senkrecht zur jeweiligen Sonnenposition (---) sowie die Summe der 28 Einzelmessungen und der Verlauf der Sonnenbahn (-●-●-).

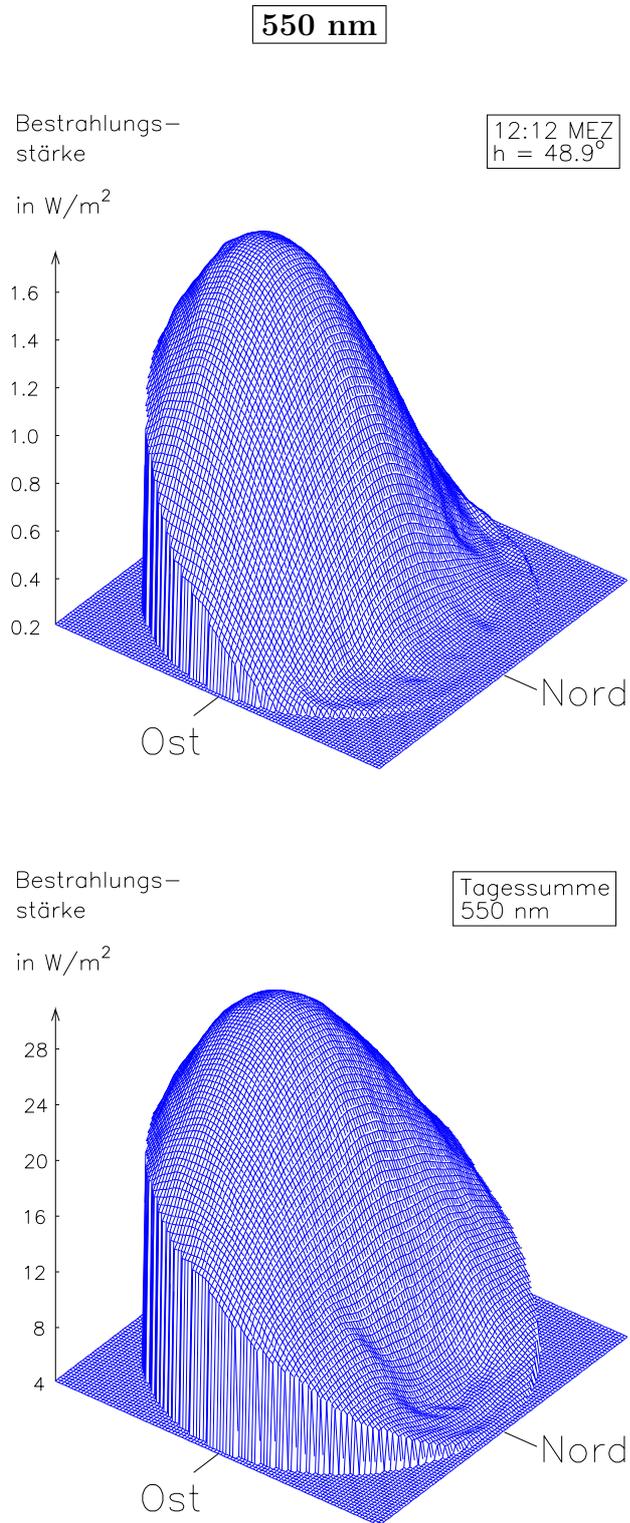


Abb. 4.21: 3D-Darstellung der mit einer ebenen, geneigten Empfängerfläche gemessenen Bestrahlungsstärke bei 550 nm vom 15.08.2001 um 12:12 MEZ (oben) sowie Summe der 28 Einzelmessungen (unten).

Polardiagramm in Form von Konturlinien gleicher Bestrahlungsstärke. Zusätzlich eingetragen ist der Himmelsbereich senkrecht zur jeweiligen Sonnenposition (---) sowie der Tagesverlauf der Sonne am Himmelsgewölbe (-●-●-) in der Tagessummen-Darstellung. Die Abbildungen 4.17, 4.19 und 4.21 zeigen die Bestrahlungsstärke auf eine ebene, geneigte Empfängerfläche in Form von 3D-Graphiken. Der wellige Verlauf der Konturlinien in den Polardiagrammen sowie in den 3D-Darstellungen im Himmelsbereich senkrecht zur jeweiligen Sonnenposition sind Artefakte, die aufgrund der nicht-stetigen Differenzierbarkeit während der Spline-Interpolation in diesem Bereich entstehen.

Bei einer Wellenlänge von 307 nm (Abb. 4.16 und 4.17) überwiegt bei niedrigen Sonnenständen die diffus im Himmelsgewölbe gestreute Strahlung, so dass ebene Empfängerflächen, die nahezu horizontal ausgerichtet sind, maximale Werte der Bestrahlungsstärke messen. Zur Zeit des Sonnenhöchststands trifft dies auf Empfänger zu, die etwa 10° höher als die Sonnenposition ausgerichtet sind. Im Tagesverlauf liegt die Ausrichtung mit maximal messbarer Bestrahlungsstärke bei einem Azimutwinkel von 180° und einem Höhenwinkel von 65° vor. Die Bestrahlungsstärke ist bei dieser Ausrichtung im Tagesmittel etwa 8 % höher als bei einer horizontalen Ausrichtung.

Bei einer Wellenlänge von 380 nm (Abb. 4.18 und 4.19) ist der Anteil der diffus im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlung bei niedrigen Sonnenständen geringer, so dass bei einer etwa 15° höher ausgerichteten Empfängerflächen maximale Werte der Bestrahlungsstärke gemessen werden. Zur Zeit des Sonnenhöchststands trifft dies für direkt auf die Sonne gerichtete, über den Tag gemittelt für etwa 5° höher als die Mittagshöhe ausgerichtete Empfängerflächen zu. Die Bestrahlungsstärke ist dann 24 % bzw. 16 % höher als bei horizontaler Ausrichtung.

Bei einer Wellenlänge von 550 nm (Abb. 4.20 und 4.21) dominiert der Anteil der direkten Strahlung, so dass als Folge dessen während des ganzen Tages maximale Werte der Bestrahlungsstärke bei direkter Ausrichtung auf die Sonne gemessen werden. Lediglich nach Auftreten des Seenebels und dem damit verbundenen Anstieg des diffusen Strahlungsanteils stimmen diese Verhältnisse nicht mehr exakt. Die Bestrahlungsstärke ist bei dieser Wellenlänge zur Zeit des Sonnenhöchststands 35 %, im Tagesverlauf 23 % höher als bei horizontaler Ausrichtung.

Die Messungen im Skymapping-Modus ohne vorgesetzte Blende veranschaulichen die gesamte auf eine ebene Empfängerfläche auftreffende, entsprechend ihrem Einfallswinkel gewichtete Strahlungsleistung bei Ausrichtung des Empfängers auf einen beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe. Hierbei werden zusätzlich zu den direkten und gestreuten Strahlungsanteilen auch am Untergrund reflektierte Strahlung registriert. Bei Kenntnis der globalen Bestrahlungsstärke lässt sich anhand der Messungen im Skymapping-Modus die auf jedes beliebig orientierte Flächenelement – und damit stellvertretend auf jeden der Sonne exponierten Hautbereich – auftreffende Bestrahlungsstärke bei der jeweiligen Wellenlänge abschätzen.

4.3 Szenarien verschiedener Abschattungen

Der sicherste Schutz der Haut vor übermäßiger UV-Strahlung wird insbesondere zur Mittagszeit durch Vermeidung direkter Sonnenbestrahlung, also durch das Aufsuchen von Schattenbereichen erzielt. Die bisherigen Messungen haben jedoch gezeigt, dass der Anteil der diffus im Himmelsgewölbe gestreuten erythemwirksamen UV-Strahlung im Allgemeinen höher ist als der direkte Anteil. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie wirksam der Aufenthalt im Schatten ist, die UV-Strahlung zu reduzieren. Umgekehrt lässt sich fragen, ein wie großer bzw. welcher Bereich des Himmelsgewölbes abgeschattet werden muss, um eine Bestrahlungsstärke, die beispielsweise zum Erreichen der Erythemschwelle ausreicht, nicht zu überschreiten. Eine weitere realistische Situation ist der Aufenthalt in der Sonne, beispielsweise während eines Sonnenbades, bei der jedoch ein Teil der diffusen Strahlung ausgeblendet wird. Dieses Szenarium trifft für Personen zu, die sich am Fuße von Gebäuden, hoher Vegetation oder innerhalb eines Strandkorbes der Sonnenstrahlung aussetzen.

Anhand der am 26. Juli 2001 im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung ermittelten Verteilung der diffus gestreuten Strahlungsanteile lässt sich für verschieden Arten von Verschattungen die Reduzierung der auf eine beliebig orientierte Empfängerfläche auftreffenden Bestrahlungsstärke berechnen. Hierfür werden bei der Integration der Messwerte aus den Abbildungen 4.9 bis 4.14 nur diejenigen Strahlungsanteile berücksichtigt, die nicht von der Verschattung betroffen sind. Der Vergleich mit dem integralen Wert des gesamten 2π -Himmelsgewölbes (Globalstrahlung) liefert dann die Reduzierung der Bestrahlungsstärke durch die Verschattung. Alle nachfolgenden Berechnungen werden dabei für die Zeit des Sonnenhöchststands durchgeführt. Zu dieser Zeit beträgt das Verhältnis zwischen direktem und diffus-gestreutem Anteil bei einer Wellenlänge von 307 nm 0.75 ± 0.05 , bei 380 nm 1.85 ± 0.1 (vergl. Kap. 4.2.2, Seite 47). Diese Faktoren werden als Anteil der direkten Strahlung bei der Berechnung berücksichtigt. Eine Erhöhung des Strahlungsangebots aufgrund von Rückreflexion durch die Verschattung bleibt hingegen unberücksichtigt.

Die Reduzierung der Bestrahlungsstärke durch die Verschattung wird exemplarisch für zwei unterschiedlich orientierte Empfängerflächen durchgeführt: Einerseits für horizontal ausgerichtete Empfängerflächen, stellvertretend für die Körperoberfläche liegender Personen. Andererseits für Empfängerflächen, die um 45° gegenüber der Horizontalen gekippt sind, so dass sie auf eine Höhe von 45° ausgerichtet sind. Diese stehen stellvertretend für die Körperoberfläche von Personen, die beispielsweise in einem Liegestuhl oder einem Strandkorb sitzen.

4.3.1 Verschattung durch Gebäude/Vegetation

Im einfachsten Fall denke man sich die Verschattung eines Empfängers durch ein hohes Gebäude, eine Hauswand oder durch Vegetation, die den gesamten dahinter liegenden Himmelsbereich abschirmt. Dabei kann der Empfänger beispielsweise

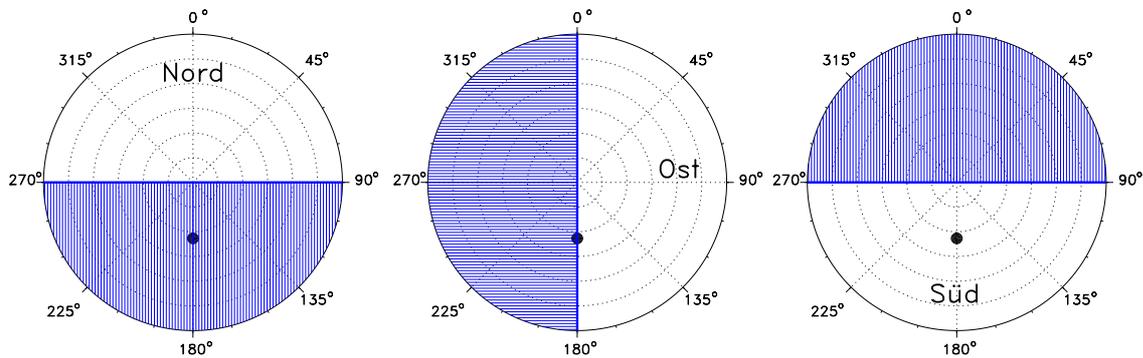


Abb. 4.22: Beispiel der Abschattung des gesamten südlichen, westlichen sowie nördlichen Bereichs des Himmelsgewölbes durch ein hohes Gebäude oder durch Vegetation bei gegebener Sonnenposition (●) zur Mittagszeit.

nördlich der Verschattung platziert sein (Abb. 4.22 – links), so dass diffuse Strahlung aus dem gesamten südlichen Bereich des Himmelsgewölbes sowie die direkte Strahlung der Sonne ausgeblendet wird. Befindet sich der Empfänger südlich der Verschattung (Abb. 4.22 – rechts), so wird lediglich der Anteil der diffusen Strahlung aus dem nördlichen Himmelsbereich ausgeblendet. Denkbar sind darüber hinaus beliebige Platzierungen des Empfängers zwischen diesen beiden Szenarien, wie in Abbildung 4.22 – Mitte skizziert ist. Aufgrund der hinreichend symmetrischen Verteilung der diffusen Strahlung über das Himmelsgewölbe am 26. Juli 2001 werden im Folgenden jeweils nur Platzierungen des Empfängers nördlich der Verschattung (Azimut 0°) bis zu einer Platzierungen des Empfängers südlich der Verschattung (Azimut 180°) dargestellt. Die Berechnungen für Azimutwinkel zwischen 180° und 360° entsprechen denen zwischen 180° und 0° .

Abbildung 4.23 zeigt das Verhältnis der empfangenen Bestrahlungsstärke zwischen einer am Fuß eines Gebäudes bzw. hoher Vegetation befindlichen verschatteten und einer unverschatteten Empfängerfläche, die horizontal bzw. um 45° gegenüber der Horizontalen gekippt ausgerichtet ist. Bei einer Wellenlänge von 307 nm beträgt das Verhältnis bei Abschattung des gesamten Südhimmels (Azimutwinkel 0°) zur Zeit des Sonnenhöchststands für einen horizontal ausgerichteten Empfänger 0.24, für einen um 45° geneigten Empfänger 0.54. Es findet somit eine Reduzierung der Bestrahlungsstärke um -76 %, bzw. um -46 % statt. Bei einem östlich einer Verschattung platzierten Empfänger, der gerade noch keine direkte Sonnenstrahlung empfängt, beträgt die Reduzierung etwa -71 % (horizontaler Empfänger) bzw. -54 % (Empfänger um 45° gekippt). Für größere Azimutwinkel gelangt dann direkte Strahlung zum Empfänger, so dass nur noch der Anteil der diffusen Strahlung ausgeblendet wird. Das Verhältnis verschattet/unverschattet steigt bis auf 0.88 (horizontaler Empfänger) bzw. 0.77 (Empfänger um 45° gekippt) bei einem Azimutwinkel von 180° an. Dies entspricht einer Reduzierung um -12 % bzw. um -23 %.

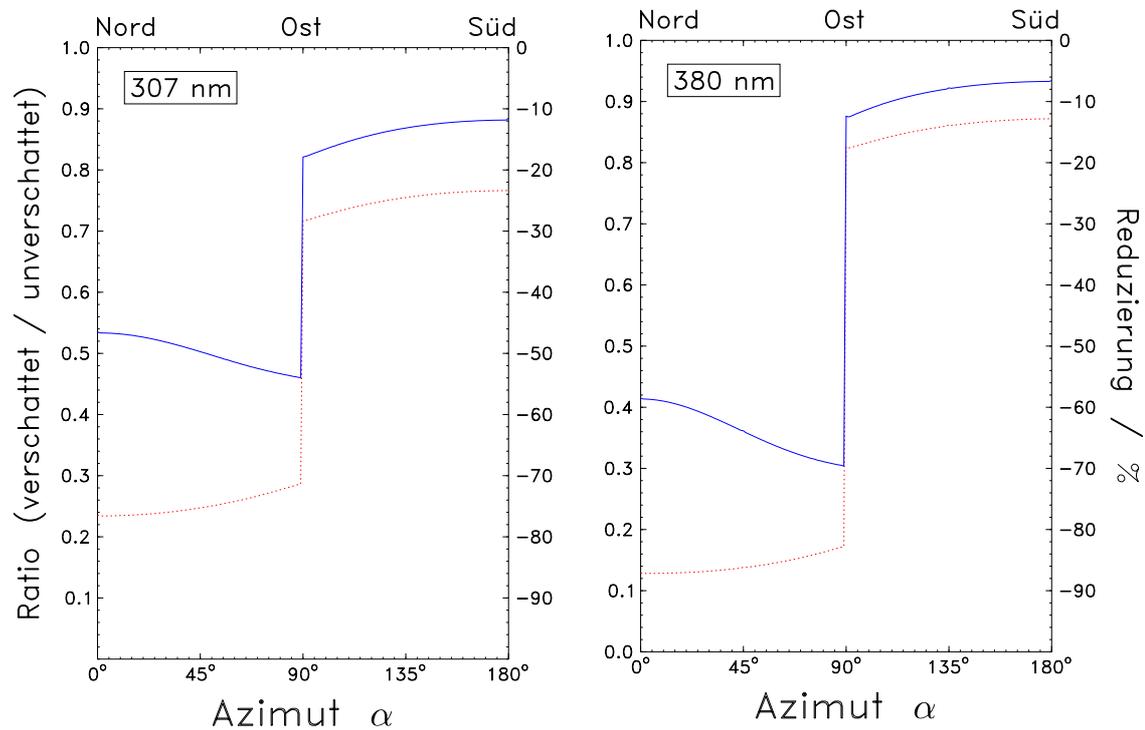


Abb. 4.23: Verhältnis der empfangenen Bestrahlungsstärke zwischen einer durch Gebäude bzw. Vegetation verschatteten und einer unverschatteten Empfängerfläche. Die Darstellung zeigt die Wellenlängen 307 nm (links) und 380 nm (rechts) bei einer horizontalen Ausrichtung des Empfängers (\cdots) sowie bei einer Ausrichtung des Empfängers auf eine Höhe von 45° ($—$). Die rechte Ordinate zeigt die Reduzierung der auftreffenden Bestrahlungsstärke durch die Verschattung.

Grundsätzlich lassen sich zwei Fälle unterscheiden: Der Empfänger ist so positioniert, dass neben einem Teil der diffusen Strahlung auch die direkte Sonnenstrahlung ausgeblendet wird, d.h. der Empfänger befindet sich im Schatten. Für diesen Fall lässt sich die Reduzierung der empfangenen Bestrahlungsstärke bei 307 nm zu $(-74.8 \pm 1.6)\%$ (Empfänger horizontal), bzw. $(-49.1 \pm 2.4)\%$ (Empfänger um 45° gekippt) berechnen. Im zweiten Fall wird nur ein Teil der diffusen Strahlung verschattet, der Empfänger ist aber der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt. Hierfür lässt sich die Reduzierung zu $(-25.0 \pm 1.5)\%$ (Empfänger horizontal), bzw. $(-13.8 \pm 1.8)\%$ (Empfänger um 45° gekippt) berechnen.

Für eine Wellenlänge von 380 nm ändern sich die Verhältnisse insofern, als dass der Einfluss der direkten gegenüber der diffus gestreuten Strahlung dominiert. Die Ausblendung der direkten Sonnenstrahlung bewirkt mit $(-85.6 \pm 1.3)\%$ (Empfänger horizontal), bzw. $(-64.0 \pm 3.7)\%$ (Empfänger um 45° gekippt) eine größere Reduzierung als bei 307 nm. Eine Ausblendung eines Teils der diffusen Strahlung bewirkt mit $(-14.4 \pm 1.6)\%$ (Empfänger horizontal), bzw. $(-8.5 \pm 2.4)\%$ (Empfänger um 45° gekippt) eine geringere Reduzierung.

4.3.2 Verschattung durch Strandkorb

Eine weitere Möglichkeit der Verschattung bietet das Beispiel eines Strandkorbs. Insbesondere an den Küsten der Nord- und Ostsee werden diese häufig benötigt, um den Wind abzuschirmen und somit ein Auskühlen während einer Sonnenexposition zu verhindern. Wie in Abbildung 4.24 gezeigt wird, gelangt dabei nur Strahlung aus einem Korridor mit einem horizontalen Öffnungswinkel von etwa 90° zum Empfänger. Zusätzlich wird ein Bereich oberhalb eines Höhenwinkels von etwa 60° ausgeblendet. Die mögliche Ausrichtung eines Strandkorbs nach Norden, Osten oder Süden ist in Abbildung 4.24 angedeutet.

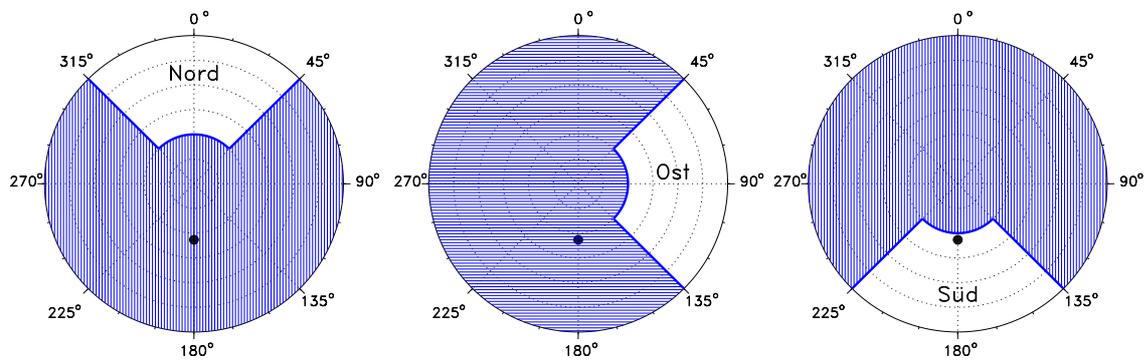


Abb. 4.24: Abschattung eines Großteils des Himmelsgewölbes durch einen nach Norden, Osten oder Süden ausgerichteten Strandkorb bei gegebener Sonnenposition (●).

Abbildung 4.25 zeigt das Verhältnis der empfangenen Bestrahlungsstärke zwischen einer innerhalb eines Strandkorbs befindlichen verschatteten und einer unverschatteten Empfängerfläche, die horizontal bzw. um 45° gegenüber der Horizontalen gekippt ausgerichtet ist. Die Ausrichtung des Strandkorbs variiert dabei zwischen 0° (Nord) und 180° (Süd). Die Berechnung erfolgte auch hier anhand der im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung am 26. Juli 2001 zur Zeit des Sonnenhöchststands bei den Wellenlängen 307 nm und 380 nm durchgeführten Messungen.

Abbildung 4.25 zeigt die deutlich effektivere Reduzierung der Bestrahlungsstärke innerhalb des Strandkorbs verglichen mit der Verschattung durch ein hohes Gebäude oder durch Vegetation. Bei einer Ausrichtung des Strandkorbs auf Azimutwinkel zwischen 0° und 134° ergibt sich eine Reduzierung der Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Empfängerfläche bei 307 nm um $(-90.2 \pm 1.3)\%$. Ein um 45° gekippter Empfänger erfährt eine Reduzierung um $(-75.7 \pm 1.8)\%$. Wird der Strandkorb über 134° hinaus weiter nach Süden gedreht, so gelangt aufgrund des Öffnungskorridors nun auch direkte Sonnenstrahlung zum Empfänger. Bei einer Ausrichtung des Strandkorbs zwischen 135° und 180° verringert sich dann die Bestrahlungsstärke auf einen horizontalen Empfänger um $(-42.8 \pm 0.6)\%$, bzw. um $(-31.3 \pm 1.0)\%$ bei einem um 45° gekippten Empfänger.

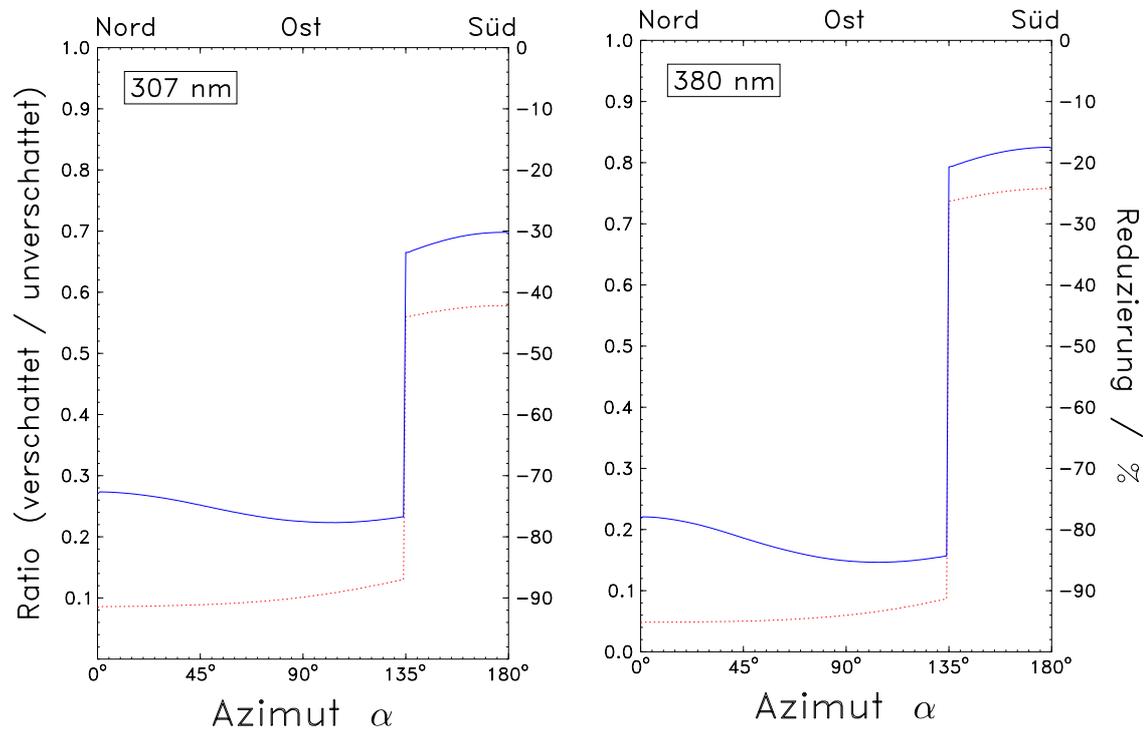


Abb. 4.25: Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke auf einen innerhalb eines Strandkorbs befindlichen Empfänger vom Azimutwinkel, auf den der Strandkorb ausgerichtet wird. Die Darstellung zeigt das Verhältnis zwischen verschattetem und unverschattetem Empfänger (linke Ordinate) sowie die entsprechende Reduzierung der auftreffenden Bestrahlungsstärke (rechte Ordinate) für die Wellenlängen 307 nm (links) und 380 nm (rechts) zur Mittagszeit. Die Empfängerfläche ist horizontal (\cdots) sowie auf eine Höhe von 45° ($—$) ausgerichtet.

Bei einer Wellenlänge von 380 nm zeigt sich wiederum die Dominanz der direkten gegenüber der diffus gestreuten Strahlung. Die Ausblendung der direkten Sonnenstrahlung bei Azimutwinkeln zwischen 0° und 134° bewirkt mit $(-94.2 \pm 1.1)\%$ (Empfänger horizontal) bzw. $(-82.6 \pm 2.6)\%$ (Empfänger um 45° gekippt) eine größere Reduzierung als bei 307 nm. Bei einer Ausrichtung des Strandkorbs zwischen 135° und 180° verringert sich die Bestrahlungsstärke auf einen horizontalen Empfänger um $(-25.0 \pm 0.6)\%$ bzw. um $(-18.6 \pm 1.0)\%$ bei einem gegenüber der Horizontalen um 45° gekippten Empfänger.

4.3.3 Verschattung durch Sonnenschirm

Ein abschließendes Szenarium ist die Verschattung eines kreisförmigen Ausschnitts des Himmelsgewölbes durch einen geeignet ausgerichteten Sonnenschirm. Dargestellt sind in Abbildung 4.26 drei exemplarische Ausrichtungen: Nach Süden auf einen Höhenwinkel von 0° (links) bzw. 45° (Mitte) sowie eine horizontale Ausrichtung des Sonnenschirms (rechts).

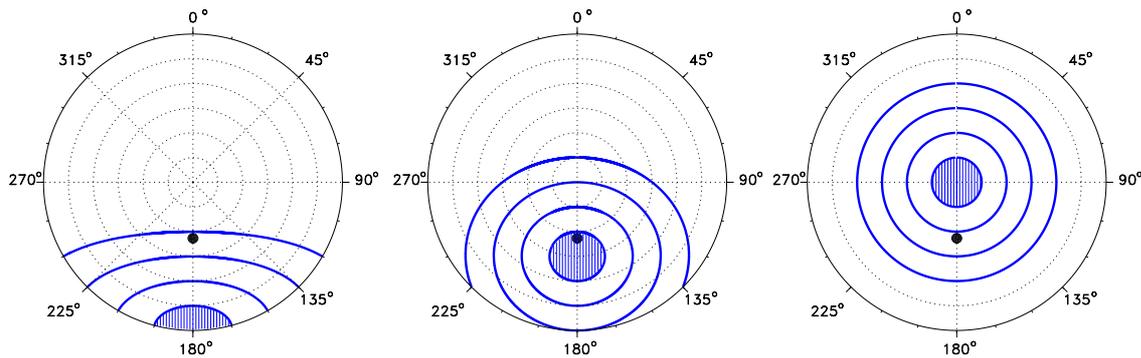


Abb. 4.26: Abschattung kreisförmiger Ausschnitte des Himmelsgewölbes mit Radien von 15° (schraffiert) sowie 30° , 45° und 60° durch einen Sonnenschirm. Die Ausrichtung des Schirms erfolgt nach Süden auf eine Höhe von 0° (links) und 45° (Mitte) sowie horizontal (rechts). Zusätzlich eingezeichnet ist die Position der Sonne (\bullet).

Abbildung 4.27 zeigt die Abhängigkeit der auf einen horizontalen Empfänger auftreffenden Bestrahlungsstärke von dem Höhenwinkel, auf den der Sonnenschirm ausgerichtet wird. Die Berechnung erfolgte für die Zeit des Sonnenhöchststands (Azimut der Ausrichtung 180°) für Höhenwinkel von 0° bis 90° und für Radien der Verschattung des Himmelsgewölbes von 15° , 30° , 45° und 60° . Auch in diesem Szenarium lassen sich zwei Fälle unterscheiden: Der Sonnenschirm ist so ausgerichtet, dass neben einem Teil der diffusen Strahlung auch die direkte Sonnenstrahlung ausgeblendet wird, d.h. der Empfänger befindet sich im Schatten. Dieser Fall zeigt sich in Abbildung 4.27 im Bereich des sprunghaften Abfalls des Verhältnisses zwischen verschatteter und unverschatteter Empfängerfläche. Im zweiten Fall, der durch das höhere Niveau der Graphen in Abbildung 4.27 dargestellt wird, wird nur ein Teil der diffusen Strahlung, jedoch nicht die direkte Sonnenstrahlung durch den Schirm ausgeblendet.

Realistische Bedingungen lassen sich für einen Sonnenschirm annehmen, der etwa einen Radius von 30° des Himmelsgewölbes abschattet und der direkt in Richtung Sonnenposition ausgerichtet ist. Bei einer entsprechenden Positionierung des Empfängers beträgt die zur Zeit des Sonnenhöchststands berechnete Reduzierung der Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche -79.5% bei 307 nm bzw. -92.3% bei 380 nm . Ein vergleichsweise großer Schirm, der einen Radius von 45° des Him-

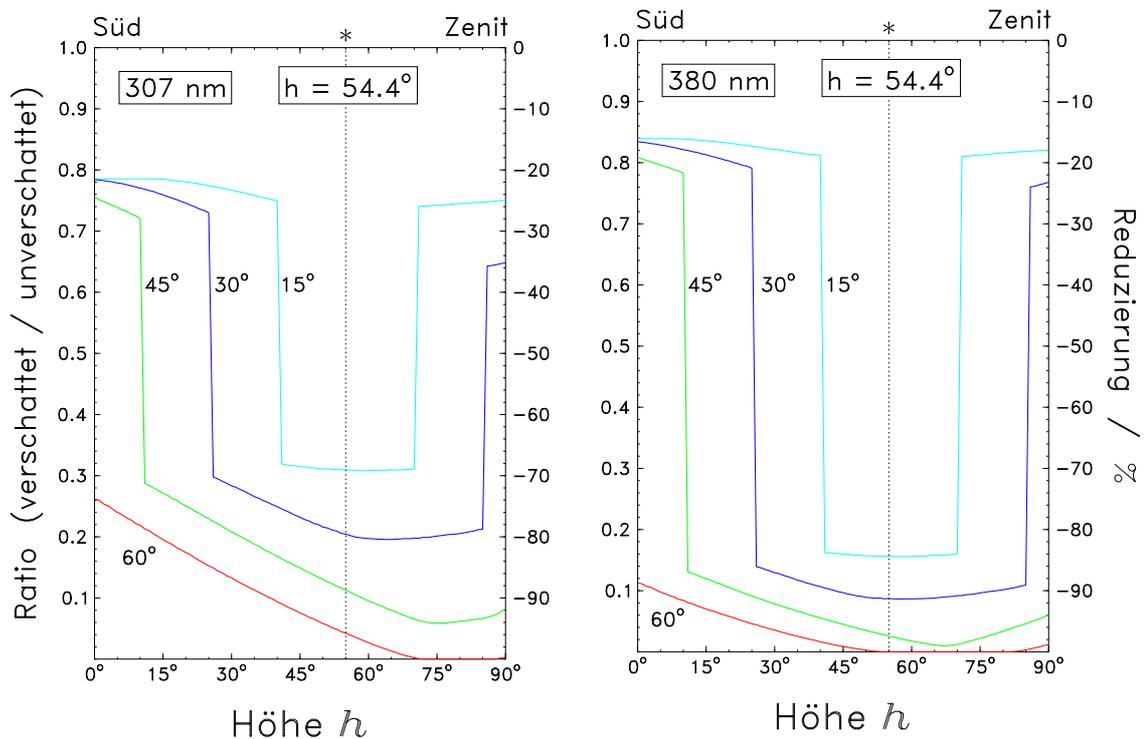


Abb. 4.27: Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke auf einen horizontalen, durch einen Sonnenschirm verschatteten Empfänger vom Höhenwinkel, auf den der Sonnenschirm gerichtet wird. Die Darstellung zeigt das Verhältnis zwischen verschattetem und unverschattetem Empfänger (linke Ordinate) sowie die entsprechende Reduzierung der auftreffenden Bestrahlungsstärke (rechte Ordinate) für die Wellenlängen 307 nm (oben) und 380 nm (unten) zur Mittagszeit. Die Radien der verschatteten Bereiche des Himmelsgewölbes sind 15°, 30°, 45° und 60°.

melsbereichs um die Position der Sonne verschattet, verringert die Bestrahlungsstärke bei 307 nm um -91.3 % bzw. um -97.4 % bei 380 nm. Wird der Sonnenschirm hingegen so ausgerichtet, dass die direkte Sonnenstrahlung nicht ausgeblendet wird, so ergeben sich nur Reduzierungen zwischen -22 % und -28 % bei 307 nm, bzw. zwischen -18 % und -25 % bei 380 nm.

Die Berechnung der zur Zeit des Sonnenhöchststands auf unterschiedlich ausgerichtete Empfängerflächen fallenden Bestrahlungsstärke bei Verschattung von Teilen des Himmelsgewölbes veranschaulicht die signifikante Reduzierung bei zusätzlicher Abschattung der direkten Sonnenstrahlung. Im Fall einer Verschattung durch einen Strandkorb beispielsweise verringert sich die Bestrahlungsstärke im UVB-Bereich bei einer Wellenlänge von 307 nm für Flächenelemente, die gegenüber der Horizontalen um 45° gekippt sind, von -31.3 % bei einem nach Süden ausgerichteten Strandkorb auf -75.7 % bei einem Strandkorb, der so aufgestellt wird, dass keine direkt Sonnenstrahlung auf den Empfänger fällt. Bei Anwendung des bei Sonnenschutzmitteln üblichen so genannten Lichtschutzfaktors, der als das Verhältnis zwischen minima-

ler erythemwirksamer Bestrahlungsdosis bei geschützter und ungeschützter Haut definiert ist [28], ergeben sich für dieses Beispiel „Lichtschutzfaktoren“ von 1.4 im ersten und von 4.1 im zweiten Fall. Analog ergeben sich für um 45° gegenüber der Horizontalen geneigte Flächenelemente „Lichtschutzfaktoren“ bei Verschattung des gesamten Südhimmels durch ein Gebäude von 2.0 sowie des gesamten Nordhimmels von 1.2. Betrachtet man den Einfluss der Verschattung auf horizontale Empfängerflächen, so entspricht die berechnete Reduzierung bei Ausblendung des Südhimmels durch ein Gebäude oder Vegetation einem „Lichtschutzfaktor“ von 4. Bei Verschattung eines Bereichs des Himmelsgewölbes mit einem Radius von 30° um die Position der Sonne durch einen geeignet ausgerichteten Sonnenschirm ergibt sich ein „Lichtschutzfaktor“ von 5.

Am 26.7.2001 betrug die erythemwirksame Bestrahlungsstärke, wie sie zeitgleich zu den Messungen im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung mit dem DTM300-Spektralradiometer erfasst wurde, entsprechend Abbildung 4.8 zur Zeit des Sonnenhöchststands über 170 mW/m^2 . Dies entspricht einer Dauer bis zum Erreichen eines leichten Erythems für eine nicht-vorgebräunte Person des Hauttyps II von weniger als 20 Minuten. Ein Lichtschutzfaktor von beispielsweise 5 verlängert diese Zeit auf annähernd eineinhalb Stunden. Es zeigt sich somit, dass selbst bei konsequenter Vermeidung direkter Sonnenbestrahlung bei einem längeren Aufenthalt in der Sonne ohne zusätzlichen Schutz wie beispielsweise das Auftragen von Sonnenschutzmitteln das Auftreten eines Erythems an diesem Tag während der Mittagszeit nicht ausgeschlossen werden konnte.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Die am Erdboden messbare ultraviolette Sonnenstrahlung zeichnet sich gegenüber dem sichtbaren Licht und der infraroten Wärmestrahlung durch eine Reihe von Besonderheiten aus: Sie ist aufgrund der starken Absorption in der Ozonschicht in hohem Maße von der Sonnenhöhe abhängig. Weiterhin besitzt insbesondere der kurzwellige Anteil der ultravioletten Strahlung die höchste biologische Wirksamkeit zur Erzeugung eines Sonnenbrands und zur Schädigung des Erbguts. Darüber hinaus gelangt UV-Strahlung aufgrund der stark überproportionalen Zunahme der Streuung in der Atmosphäre zu kürzeren Wellenlängen hin in hohem Maße als gestreute Strahlung bis zum Erdboden. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Verteilung der diffus gestreuten ultravioletten Strahlung über das Himmelsgewölbe erfasst. Durch ergänzende Messungen mit geneigten Empfängern wurde die Bestrahlungsstärke auf unterschiedlich ausgerichtete Flächenelemente, stellvertretend für verschiedene Hautpartien des menschlichen Körpers, bestimmt. Ziel dieser Untersuchungen war es, die üblicherweise mit horizontalen Empfängerflächen gewonnenen Daten durch Messungen zu ergänzen, die der gekrümmten Geometrie der Körperoberfläche des Menschen besser Rechnung tragen.

Im Zuge der methodischen Vorarbeiten wurde ein System zur spektralen Erfassung der solaren UV-Strahlung zusammengestellt und charakterisiert. Zur Kalibration der Systemempfindlichkeit wurde eine neue Kalibriervorrichtung entwickelt und im Bundesamt für Strahlenschutz geeicht. Eine Schwenkvorrichtung, mit der die Eingangsoptiken der Messgeräte auf jeden beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe ausgerichtet werden können, wurde etabliert. Zur Steuerung der Schwenkvorrichtung sowie zur Zusammenführung und Auswertung der Messdaten wurden geeignete Softwareprogramme entwickelt. Die Durchführung der Messungen erfolgte in Westerland auf Sylt in der Außenstation des Instituts für Medizinische Klimatologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Der Messzeitraum lag zwischen Mai und September der Jahre 2000 und 2001. Dabei wurde vorzugsweise an wolkenfreien Tagen mit entsprechend hohen Werten der UV-Strahlung gemessen. Neben der Erfassung kompletter Spektren der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke wurden Messungen bei 307 nm und 380 nm als repräsentative Wellenlängen für den UVB-

bzw. den UVA-Bereich durchgeführt. Zum Vergleich hierzu erfolgten Messungen stellvertretend für den sichtbaren Spektralbereich bei 550 nm. Abschließend wurde anhand einiger Szenarien berechnet, in welchem Ausmaß Abschattungen von Teilen des Himmelsgewölbes sowie der direkten Sonnenstrahlung eine Reduzierung der auf einen Empfänger auftreffenden Bestrahlungsstärke bewirken.

Die im Folgenden zusammengefassten Messungen und Ergebnisse setzen die seit 1993 im Institut für Medizinische Klimatologie in Westerland auf Sylt durchgeführten Untersuchungen zur solaren UV-Strahlung unter medizinischen Gesichtspunkten fort (vergl. STICK et. al. [73]-[78]). Mit der Etablierung des UV-Mess-Systems in Verbindung mit der 2AP-Schwenkvorrichtung konnten dabei erstmals automatisiert die Eingangsoptiken der verschiedenen Messgeräte auf jeden beliebigen Punkt am Himmelsgewölbe ausgerichtet werden. Getrennte Messungen der direkten erythemwirksamen UV-Strahlung im Modus der Sonnennachführung sowie der diffus-gestreuten Strahlung zeigen dabei den für die kurzwellige UV-Strahlung typischen hohen Anteil an diffuser Streustrahlung. Dieser übersteigt selbst an wolkenfreien Tagen mit klarer Atmosphäre bei Sonnenhöhenwinkeln von annähernd 60° den Anteil der direkten Sonnenstrahlung. Die Besonderheit der erythemwirksamen Strahlung wird durch den Vergleich mit der Gesamtstrahlung als Summe der Anteile aus dem ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich deutlich: Bei dieser beträgt der Anteil der diffus-gestreuten Strahlung an wolkenlosen Tagen nur etwa 10 % bis 15 % an der Globalstrahlung. Die Tagesgänge der erythemwirksamen Globalstrahlung hingegen veranschaulichen deren im Vergleich zur Gesamtstrahlung überproportional starke Abhängigkeit vom Sonnenhöhenwinkel.

Die Messung der Bestrahlungsstärke entlang des Sonnenmeridians im Zenitscan-Modus demonstriert die starke Abhängigkeit der gestreuten Strahlung von der Wellenlänge: Bei 307 nm ist der Anteil der diffusen Strahlung, bezogen auf den Anteil der direkten Sonnenstrahlung über eine Größenordnung höher als im sichtbaren Bereich bei 550 nm. Zudem fällt der Verlauf der Streustrahlung bei 307 nm entlang des Längengrades der Sonne monoton von der Position der Sonne bis zum Horizont ab. Bei 550 nm hingegen kommt es unter einem Winkel von etwa 70° bis 80° zur Sonne zu einem ausgeprägten Minimum der relativen Bestrahlungsstärke. Das Verhalten der diffusen Streustrahlung einer Wellenlänge von 380 nm im UVA-Bereich liegt zwischen dem der UVB- und der Strahlung aus dem sichtbaren Spektralbereich.

Wird die Messapparatur im Zenitscan-Modus mit ebener, unverschatteter Empfängerfläche betrieben, so zeigt sich, dass das Maximum der auftreffenden Bestrahlungsstärke bei 307 nm nicht bei senkrechter Ausrichtung zur Sonne vorliegt, sondern zur Zeit des Sonnenhöchststands bei einem etwa 6° , bei einer Sonnenhöhe von 25.6° bei einem 24° größeren Höhenwinkel. Bei 550 nm hingegen werden zu jeder Tageszeit maximale Werte der Bestrahlungsstärke bei direkter Ausrichtung des Empfängers auf die Sonne gemessen. Darüber hinaus veranschaulichen die Messungen den relativ hohen, aus dem Horizontbereich unterhalb der Sonne kommenden Strahlungsanteil im sichtbaren sowie im UVA-Bereich. Die häufig zu Sonne senkrecht ausgerichteten Flächenelemente, die „Sonnenterrassen“ des menschlichen Körpers, sind dabei zur

Zeit des Sonnenhöchststands einer etwa 15 % bis 17 % höheren erythemwirksamen Bestrahlungsstärke ausgesetzt als horizontal ausgerichtete Empfängerflächen.

Über die zweidimensionale Art der Darstellung der Zenitscan-Messungen hinaus vermitteln die im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung erfassten Messdaten einen räumlichen Eindruck von der Verteilung der im Himmelsgewölbe gestreuten Strahlungsanteile. Die bisher diskutierten unterschiedlichen Eigenschaften der Wellenlängen 307 nm, 380 nm sowie 550 nm treten dabei noch deutlicher zutage. Bei 307 nm zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme der diffus-gestreuten Bestrahlungsstärke aus dem Umfeld der Sonne bis zum Horizont, wobei sich unter einem Winkel von 70° bis 80° zur Sonne ein Plateau gleicher Bestrahlungsstärke andeutet. Bei 380 nm zeigt sich, dass relativ hohe Werte der Bestrahlungsstärke nicht nur unmittelbar unterhalb der Sonnenposition gemessen werden, sondern über einen Azimutbereich von bis zu $\pm 60^\circ$ zur Sonne. Als Folge dessen ergibt sich über den Tag gemittelt ein hohes Strahlungsangebot im gesamten Bereich zwischen der Bahn der Sonne im Tagesverlauf und dem südlichen Horizont. Dabei entspricht dieser Bereich einer Ausrichtung, der beispielsweise die Gesichtsflächen aufrecht stehender oder gehender Personen senkrecht ausgesetzt sind. Selbst eine Schirmmütze verschattet diese Flächen in der Regel nicht. Eine Wellenlänge von 380 nm besitzt dabei eine hohe Wirksamkeit, eine Pigmentierung in der Haut zu erzielen. Das Phänomen, dass Personen, die in den Vormittags- bzw. Nachmittagsstunden lange Spaziergänge unternehmen anstatt sich zur Mittagszeit in die Sonne zu legen, eher stark bräunen als einen Sonnenbrand zu bekommen, kann auf diesen hohen Anteil langwelliger UV-Strahlung aus der Nähe des Horizonts zurückgeführt werden. Die zum Vergleich im sichtbaren Bereich bei einer Wellenlänge von 550 nm durchgeführten Messungen bestätigen den visuellen Eindruck der deutlichen Aufhellung des Horizontbereichs. Der Anteil diffuser Streustrahlung aus diesem Bereich ist über eine Größenordnung höher als bei ihrem Minimum unter einem Winkel von etwa 70° bis 80° zur Sonne.

Die Messungen im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung zeigen darüber hinaus, dass die hohen Bestrahlungsstärken aus dem Horizontbereich im UVA- sowie im sichtbaren Spektralbereich bei Messung mit einem horizontal ausgerichteten Empfänger keine nennenswerten Beiträge liefern. Horizontale Empfänger sind somit ungeeignet, die Bestrahlungsstärke auf zum Horizont senkrechte Flächenelemente zu bestimmen. Für eine biologische Bewertung der auf die verschiedenen Körperpartien auftreffenden Bestrahlungsstärke sind somit Messungen mit geneigten Empfängerflächen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, erforderlich.

Die gesamte, auf eine beliebig orientierte ebene Empfängerfläche fallende Bestrahlungsstärke wird im Modus der Himmelsgewölbe-Kartierung ohne vorgesetzte Blende bestimmt. Die in diesem Modus durchgeführten Messungen zeigen, dass im Tagesverlauf zu kürzeren Wellenlängen hin die diffus gestreuten Strahlungsanteile derart dominieren, dass Empfängerflächen nicht bei senkrechter Ausrichtung auf die Sonne, wie beispielweise bei 550 nm, sondern bei einer 10° höheren Ausrichtung bei 307 nm maximale Werte der Bestrahlungsstärke messen. Anwendungen dieser Ergebnisse, die jedoch nicht in der Zielsetzung dieser Arbeit liegen, befinden sich beispiels-

weise im Bereich der Photovoltaik für eine im Jahresverlauf optimale Ausrichtung von Solaranlagen in Abhängigkeit des spektralen Verhaltens der Solarzellen.

Anhand der abschließend aufgestellten Szenarien verschiedener Abschattungen der direkten sowie der diffusen Strahlung zeigt sich, dass eine effektive Reduzierung der empfangenen Bestrahlungsstärke zur Zeit des Sonnenhöchststands nur durch Vermeidung direkter Sonnenbestrahlung, also durch das Aufsuchen von Schattenbereichen zu erzielen ist. Dabei liefert jedoch selbst ein nach Norden ausgerichteter Strandkorb für Empfängerflächen, die um 45° gegenüber der Horizontalen gekippt sind, stellvertretend für die Körperoberfläche sich darin aufhaltender Personen, nur eine Reduzierung der Bestrahlungsstärke auf ein Fünftel derjenigen ohne Verschattung durch den Strandkorb. Das Aufsuchen eines Schattenbereichs nördlich eines hohen Gebäudes oder hoher Vegetation bewirkt für solche Empfängerflächen sogar nur eine Halbierung der empfangenen Bestrahlungsstärke. Betrachtet man den Einfluss der Verschattung auf horizontale Empfängerflächen, stellvertretend für die Körperoberfläche liegender Personen, so liefert die Ausblendung des Südhimmels durch ein Gebäude oder Vegetation eine Reduzierung auf ein Viertel. Bei Verschattung eines Bereichs des Himmelsgewölbes mit einem Radius von 30° um die Position der Sonne durch einen Sonnenschirm ergibt sich eine Reduzierung auf ein Fünftel der Bestrahlungsstärke ohne Verschattung. Dies entspricht einem „Lichtschutzfaktor“ von 5, also eine Verlängerung der Bestrahlungsdauer bis zum Einsetzen einer ersten Hautrötung um das Fünffache. Zur Mittagszeit auf Sylt beträgt diese Zeitspanne beispielsweise für eine nicht-vorgebräunte Person des Hauttyps II eineinhalb Stunden. Anhand der angeführten Szenarien zeigt sich somit, dass selbst das Aufsuchen von Schattenbereichen bei längeren Aufenthalten in dieser Zeit keinen sicheren Schutz vor einem Sonnenbrand liefert.

Schwierigkeiten bei der Durchführung der Messungen und der Interpretation der Messdaten lieferten die unterschiedlichen, nicht-standardisierbaren Messbedingungen aufgrund wechselhafter Bewölkung und Diesigkeit. In den Hochsommertagen der Jahre 2000 und 2001 gab es keine zwei aufeinander folgende komplett unbewölkte Tage mit idealen Messbedingungen. Aus diesem Grund konnten keine Messungen an benachbarten Tagen bei vergleichbaren Parametern wie Mittagshöhe, stratosphärischer Ozonkonzentration, optischer Sichtweite oder Aerosolgehalt durchgeführt werden. Die dargestellten Ergebnisse sind insofern als Momentaufnahmen bei den jeweiligen atmosphärischen Bedingungen zu verstehen. Um eine statistische Genauigkeit bei der Interpretation der Messdaten zu erhalten und um die atmosphärischen Einflüsse genauer beschreiben zu können, werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen auch weiterhin ein Schwerpunktthema der Arbeit im Institut für Medizinische Klimatologie in Westerland auf Sylt sein. Eine Fortsetzung der Messung diffuser, im Himmelsgewölbe gestreuter Strahlung über die Dissertation hinaus wird im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Untersuchung molekularer und zellulärer Entstehungsmechanismen UV-induzierter Hautkrebse stattfinden. Dabei bilden das in der vorliegenden Arbeit aufgebaute und charakterisierte UV-Mess-System in Verbindung mit der Schwenkvorrichtung sowie die entwickelten Software-Module wichtige Bestandteile für diese Untersuchungen.

Anhang A

Verwendete Formelzeichen und Symbole

Symbol	Bedeutung
c	Lichtgeschwindigkeit
d	Gitterkonstante
E	Bestrahlungsstärke
$E_{ges} = E_{ges, 2\pi}^{(h)}$	globale Gesamtstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche
$E_{ges}^{(s)} = E_{ges, 2\pi}^{(s)}$	mit einer 2π -Empfängerfläche erfasste Gesamtstrahlung bei senkrechter Ausrichtung auf die Sonne
$E_{ges, dir}^{(s)}$	direkte Gesamtstrahlung bei senkrecht auf die Sonne ausgerichteter Empfängerfläche
$E_{ges, dir}^{(h)} = E_{ges, dir}^{(s)} \cdot \sin(h)$	direkte Gesamtstrahlung umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche
$E_{ges, diff}^{(h)}$	diffuse Gesamtstrahlung auf eine horizontale Empfängerfläche
$E_{Er} = E_{Er, 2\pi}^{(h)}$	erythemwirksame globale UV-Strahlung auf eine horizontale Empfängerfläche
$E_{Er}^{(s)} = E_{Er, 2\pi}^{(s)}$	mit 2π -Empfängerfläche erfasste erythemwirksame UV-Strahlung bei senkrechter Ausrichtung zur Sonne
$E_{Er, dir}^{(s)}$	direkte erythemwirksame UV-Strahlung bei senkrecht auf die Sonne ausgerichteter Empfängerfläche
$E_{Er, dir}^{(h)} = E_{Er, dir}^{(s)} \cdot \sin(h)$	direkte erythemwirksame UV-Strahlung umgerechnet auf eine horizontale Empfängerfläche
$E_{Er, diff}^{(h)}$	diffuse erythemwirksame UV-Strahlung auf eine horizontale Empfängerfläche

E_{ex}	extraterrestrische Bestrahlungsstärke
$E_\lambda = E(\lambda) d\lambda$	spektrale Bestrahlungsstärke im Intervall $[\lambda \dots \lambda + d\lambda]$
H	Bestrahlung (Dosis)
H_{biol}	photobiologisch-wirksame Bestrahlung (Dosis)
h	PLANCKSches Wirkungsquantum
h	Sonnenhöhenwinkel
h_{min}	minimale Mittagshöhe am 22. Dezember
h_{max}	maximale Mittagshöhe am 21. Juni
I	Strahlstärke (Intensität)
$I_R(\lambda)$	Intensität der RAYLEIGH-Streuung
k	BOLTZMANN-Konstante
L	Strahldichte
L_λ	spektrale Strahldichte
M	spezifische Ausstrahlung
n	Beugungsordnung
$P_R(\theta)$	Phasenfunktion der RAYLEIGH-Streuung
$P_M(\theta)$	Phasenfunktion der MIE-Streuung
P_{sol}	gesamte von der Sonne abgestrahlte Leistung
\bar{R}	mittlerer Abstand Erde – Sonne
$S_{biol}(\lambda)$	Spektrale Empfindlichkeit eines biologischen Vorgangs
T	absolute Temperatur
z	Schichtdicke
α	Azimutwinkel der Sonne
α	Einfallswinkel
β	Reflexionswinkel
λ	Wellenlänge
λ	geographische Länge
ν	Frequenz
Ω	Raumwinkel
ϕ	Strahlungsleistung (Strahlungsfluss)
ϕ	geographische Breite
ρ	Teilchendichte
σ	Absorptionsquerschnitt
θ	Zenitwinkel der Sonne
θ	Streuwinkel

Anhang B

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
DIN	Deutsche Industrienorm
DWD	Deutscher Wetterdienst
DU	DOBSON-Units (Einheit der Gesamtozonsäule)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FWHM	Full Width at Half Maximum (Halbwertsbreite)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IR	Infrarot-Bereich (730 nm ... 1 mm) (nach [87], s.u.)
MED	Minimale Erythemale Dosis
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ = MEZ +1)
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
SI	Système International d'Unités
UBA	Umweltbundesamt
UTC	Universal Time Correlated (UTC = MEZ -1)
UVA	Bereich ultravioletter Strahlung von 315...400 nm [87]
UVB	Bereich ultravioletter Strahlung von 280...315 nm [87]
UVC	Bereich ultravioletter Strahlung von 100...280 nm [87]
VIS	Bereich des sichtbaren Lichts von 400...730 nm [87]
WMO	World Meteorologic Organisation
2AP	Two-Axis-Positioner

Anhang C

Technische Daten

Die folgende Auflistung gibt eine Übersicht über die technischen Daten, Spezifikationen und Herstellerangaben der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Geräte:

Verschattungsvorrichtungen:

Blendensystem:	Eigenkonstruktion entspr. WMO-Norm. Länge: 410 mm, vier Blenden in 100 mm Abstand, Öffnungshalbwinkel 2.5° , Böschungswinkel 1° , schwarz eloxiert
Schattenkugel:	Eigenkonstruktion. Bewegliche Kugel (40 mm \varnothing), Abstand zum Diffusor: 280 mm

Eingangsoptik:

Diffusor DM150:	Eigenkonstruktion, gewölbte 2π -Teflon-Scheibe (20 mm \varnothing) in Aluminiumgehäuse, Cosinusfehler $\leq 0.1\%$ im Bereich der Blendenöffnung, integraler Cosinusfehler 4.3 %
Diffusor DTM300:	Firma CMS Schreder, Oberndorf, A. Integraler Cosinusfehler $\leq 2.5\%$ [59]
Lichtwellenleiter:	4 m Lichtwellenleiterbündel mit Querschnittswandlung von 4.5 mm Durchmesser auf $20 \times 1 \text{ mm}^2$

Spektralradiometer DM150 (DTM300):

Typ:	Doppelmonochromator in Czerny-Turner-Anordnung [4]
Firma:	Bentham Instruments Ltd., Reading, GB Vertrieb: Firma Gigahertz-Optik, Puchheim, D
Fokusslänge:	150 mm (300 mm)
Spaltbreite/-höhe:	0.6 mm / 20 mm
Halbwertsbreite:	1.0 nm
Gitter:	2400 Linien/mm – holographisch
Dispersion:	1.35 nm/mm

λ -Genauigkeit:	± 0.15 nm im Bereich von 290 nm bis 450 nm
Reproduzierbarkeit:	± 0.02 nm
Detektor:	Selektierter Photomultiplier: Bentham DH3(Bi), Betriebsspannung: 750 V, Dunkelstrom: ≤ 30 pA (≤ 200 pA)
Nachweisgrenze:	$\leq 1 \mu\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{nm})$
Messgenauigkeit:	lässt sich durch Vergleich unterschiedlicher Kalibrationen, Vermessen externer Kalibrierstandards sowie Evaluation der Messwerte mit theoretisch berechneten Werten zu ± 8 % (± 5 %) abschätzen.

Pyranometer:

Firma:	Kipp & Zonen, Delft, NL [32, 81]
Ansprechzeit:	≤ 15 s
Spektralbereich:	305 ... 2800 nm (IR-Pyranometer 690 ... 2800 nm)
Empfindlichkeit:	4.77 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ (Pyranometer) 5.17 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ (IR-Pyranometer) 11.45 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ (Pyrheliometer)

Schwenkvorrichtung:

Typ:	Two-Axis-Positioner (2AP), Belt Drive [62]
Firma:	SCI-TEC Instruments, Saskatoon, Ca
Schwenkbereich:	Horizontal: 0° bis 360° , Vertikal: -6° bis 90°
Stromaufnahme:	Halte-/Schwenkbetrieb: 130 mA/200 mA, jeweils bei 220V
Genauigkeit:	$\pm 0.01^\circ$

PC:

Spezifikation:	IBM-PC 486DX mit numerischem Koprozessor, 40MHz
----------------	---

Kalibriervorrichtungen:

Wellenlängenkalibration:	Quecksilber-Pen-Ray 220 V, 17 mA; Firma L.O.T.-Oriel GmbH, Darmstadt
Systemempfindlichkeit:	Eigenkonstruktion mit 1000 W-Quarz-Halogenlampe (R7S DXW/01 Fa. General Electrics, Vertrieb: Schahl Speziallampen, Pullach) mit 220 V/50 W-Ventilator. Emissionsspektrum erstellt im BfS, München (rückführbar auf PTB-Standard [47])

Ozon-Messgerät:

Typ:	Microtops II
Firma:	Solar Light Co. Inc., Philadelphia, USA [67]
Messgenauigkeit:	$\pm 2^\circ$ % [34]

Anhang D

Berechnung der Sonnenephemeriden

Der folgende Programmauszug zeigt die Unteroutine des Programms Sol-pos 1.0 zur Berechnung der Sonnenhöhe und des Azimutwinkels (nach [23]).

```
Function Zenitwinkel(Jahr, Monat, Tag, TagSekunde: Longint) :Double;

Var
    A, B, JD, JDO, T, ML, MA, EX, F, LS, EP, X, Y, Z, DE, RA, ST, TW, ZW :Double;
    M, J :Longint;

Const
    GeogrBreite = 54.92554;          (* Geographische Breite der Mess-Station *)
    GeogrLaenge = 8.30951;         (* Geographische Laenge der Mess-Station *)
    C0 = 180 / Pi;                 (* Umrechnungskonstante von Bogen- auf Gradmass *)

Function Refraktion(Zw :Double) :Double;          (* Berechnung der Refraktion *)
Var a, b, c, d :Double;
Begin
    a:=1.55108e-4; b:=2.4735e-4; c:=-1.83511e-3; d:=-9.8317e-5;
    if Zw>=0 then Refraktion:=(a + b*Zw)/(1 + c*Zw + d*sqr(Zw))
    else Refraktion:=0;
End;

BEGIN (* of Function Zenitwinkel *)
    (* Umrechnung des buergerlichen auf das Julianische Datum *)
    if Monat<3 then begin Jahr:=Jahr-1; Monat:=Monat+12; end;
    A := Trunc(Jahr/100);
    B := 2 - A + Trunc(A/4);
    JDO:= Int(365.25*Jahr) + Int(30.6001*(Monat+1)) + Tag + B + 1720995;
    JD := JDO + TagSekunde/86400;
    T := (JD - 2415020)/36525;          (* Julianischer Tag *)
```

```

(* Berechnung der Bahnelemente durch beste Annaeherung an Ellipsenbahn *)
ML := 4.88168594 + 628.331953*T;      (* mittlere heliozentrische Laenge *)
MA := 6.25665633 + 628.301948*T;      (* mittlere Anomalie *)
EX := 0.01675 - 4.18E-5 *T;          (* numerische Exzentrizitaet *)

(* Reihenentwicklung der Mittelpunktsgleichung aus der mittleren Anomalie*)
F := 1.99997279*EX*Sin(MA) + 1.25000481*EX*EX*Sin(2*MA)
    + EX*EX*EX*(1.08332587*Sin(3*MA) - 0.249931149*Sin(MA));
LS := ML + F;

(* Transformation vom ekliptikalen in das aequatoriale Koordinatensystem *)
EP := 0.409314618 - 2.27067336E-4*T ;      (* Schiefe der Ekliptik *)
X := Cos(LS);
Y := Sin(LS)*Cos(EP);
Z := Sin(LS)*Sin(EP);

(* Bestimmung der Rektaszension RA und Deklination DE im Bogenmass *)
DE := ArcTan(Z/Sqrt(X*X+Y*Y));
RA := ArcTan(Y/X); if X<0 then RA := RA + Pi else if Y<0 then Ra:=RA+2*Pi;

(* Transformation vom aequatorialen in das horizontale Koordinatensystem *)
ST := 6.656306 + 0.0657098242*(JDO - 2445700.5)
    + 1.0027379093*TagSekunde/3600;
ST := Frac(ST/24)*24;                      (* Greenwich Sternzeit *)
ST := (ST*15 + GeogrLaenge)/CO;           (* Ortssternzeit als Winkel im Bogenmass *)
TW := ST - RA;                             (* Stundenwinkel *)

X := - Cos(DE)*Sin(TW);
Y := Sin(DE)*Cos(GeogrBreite/CO) - Cos(DE)*Cos(TW)*Sin(GeogrBreite/CO);
Z := Sin(DE)*Sin(GeogrBreite/CO) + Cos(DE)*Cos(TW)*Cos(GeogrBreite/CO);
ZW := Pi/2 - ArcTan(Z/Sqrt(X*X+Y*Y));      (* Zenitwinkel im Bogenmass *)
Zw := ZW*CO;                               (* Zenitwinkel im Gradmass *)

Zenitwinkel := Zw - Refraktion(Zw);
Azimut := ArcTan(X/Y);                      (* Azimutwinkel im Gradmass *)
if X<0 then Azimut := Azimut + Pi else if Y<0 then Azimut := Azimut +2*Pi;
Azimut := Azimut*CO;

END; (* of Function Zenitwinkel *)

```

Tab. 4: *Unterroutine des Software-Programms Sol-pos 1.0 zur Berechnung der Höhe und des Azimutwinkels der Sonne für die Eingabevariablen Jahr, Monat, Tag und Tagsekunde. Die Berechnung erfolgt für die geographische Position der Messplattform des Instituts für Medizinische Klimatologie in Westerland auf Sylt unter Berücksichtigung der terrestrischen Refraktion.*

Die folgende Tabelle 5 zeigt die entsprechend 4 für das Jahr 2002 berechneten Zeiten in MEZ für Sonnenaufgang, Sonnenhöchststand (ZSH) und Sonnenuntergang sowie Mittagshöhe und Tageslänge.

Nr	Tag	Aufgang	ZSH	Höhe	Unterg.	Länge	Nr.	Tag	Aufgang	ZSH	Höhe	Unterg.	Länge
1	01.01	08:50:58	12:30:40	12.20	16:10:18	07:19:20	60	01.03	07:15:55	12:39:27	27.75	18:03:11	10:47:16
2	02.01	08:50:42	12:31:09	12.29	16:11:32	07:20:49	61	02.03	07:13:30	12:39:14	28.13	18:05:13	10:51:43
3	03.01	08:50:24	12:31:37	12.39	16:12:47	07:22:24	62	03.03	07:11:03	12:39:01	28.51	18:07:14	10:56:10
4	04.01	08:50:00	12:32:03	12.49	16:14:06	07:24:07	63	04.03	07:08:38	12:38:48	28.90	18:09:16	11:00:38
5	05.01	08:49:32	12:32:32	12.61	16:15:28	07:25:55	64	05.03	07:06:10	12:38:36	29.29	18:11:17	11:05:07
6	06.01	08:49:02	12:32:59	12.73	16:16:54	07:27:52	65	06.03	07:03:41	12:38:22	29.67	18:13:17	11:09:35
7	07.01	08:48:26	12:33:24	12.85	16:18:21	07:29:55	66	07.03	07:01:13	12:38:07	30.06	18:15:17	11:14:04
8	08.01	08:47:47	12:33:51	12.99	16:19:52	07:32:04	67	08.03	06:58:43	12:37:53	30.45	18:17:18	11:18:34
9	09.01	08:47:05	12:34:15	13.13	16:21:24	07:34:19	68	09.03	06:56:15	12:37:37	30.84	18:19:18	11:23:03
10	10.01	08:46:19	12:34:41	13.28	16:22:59	07:36:39	69	10.03	06:53:45	12:37:21	31.23	18:21:17	11:27:32
11	11.01	08:45:30	12:35:04	13.44	16:24:37	07:39:07	70	11.03	06:51:14	12:37:05	31.63	18:23:17	11:32:01
12	12.01	08:44:38	12:35:28	13.60	16:26:18	07:41:40	71	12.03	06:48:43	12:36:49	32.02	18:25:16	11:36:32
13	13.01	08:43:42	12:35:50	13.77	16:27:59	07:44:17	72	13.03	06:46:13	12:36:33	32.41	18:27:14	11:41:02
14	14.01	08:42:43	12:36:14	13.95	16:29:44	07:47:01	73	14.03	06:43:42	12:36:17	32.81	18:29:13	11:45:31
15	15.01	08:41:40	12:36:34	14.13	16:31:29	07:49:50	74	15.03	06:41:10	12:36:00	33.20	18:31:12	11:50:01
16	16.01	08:40:33	12:36:55	14.32	16:33:18	07:52:43	75	16.03	06:38:38	12:35:43	33.60	18:33:09	11:54:31
17	17.01	08:39:25	12:37:16	14.52	16:35:07	07:55:41	76	17.03	06:36:05	12:35:25	33.99	18:35:07	11:59:02
18	18.01	08:38:13	12:37:36	14.72	16:36:58	07:58:44	77	18.03	06:33:33	12:35:08	34.38	18:37:06	12:03:32
19	19.01	08:36:58	12:37:54	14.93	16:38:51	08:01:53	78	19.03	06:31:00	12:34:50	34.78	18:39:03	12:08:03
20	20.01	08:35:40	12:38:11	15.15	16:40:45	08:05:04	79	20.03	06:28:28	12:34:31	35.17	18:41:00	12:12:31
21	21.01	08:34:19	12:38:28	15.37	16:42:41	08:08:22	80	21.03	06:25:55	12:34:13	35.57	18:42:58	12:17:01
22	22.01	08:32:54	12:38:45	15.60	16:44:36	08:11:41	81	22.03	06:23:22	12:33:55	35.96	18:44:55	12:21:33
23	23.01	08:31:29	12:39:00	15.83	16:46:34	08:15:06	82	23.03	06:20:50	12:33:37	36.36	18:46:52	12:26:02
24	24.01	08:30:00	12:39:15	16.07	16:48:34	08:18:34	83	24.03	06:18:17	12:33:20	36.75	18:48:50	12:30:31
25	25.01	08:28:27	12:39:30	16.32	16:50:33	08:22:05	84	25.03	06:15:44	12:33:01	37.14	18:50:46	12:35:01
26	26.01	08:26:53	12:39:44	16.57	16:52:35	08:25:40	85	26.03	06:13:11	12:32:43	37.54	18:52:43	12:39:30
27	27.01	08:25:16	12:39:56	16.83	16:54:35	08:29:19	86	27.03	06:10:39	12:32:25	37.93	18:54:40	12:44:00
28	28.01	08:23:38	12:40:07	17.09	16:56:39	08:33:00	87	28.03	06:08:06	12:32:05	38.32	18:56:36	12:48:30
29	29.01	08:21:56	12:40:18	17.36	16:58:42	08:36:45	88	29.03	06:05:34	12:31:47	38.71	18:58:33	12:52:57
30	30.01	08:20:14	12:40:28	17.64	17:00:45	08:40:31	89	30.03	06:03:02	12:31:29	39.09	19:00:29	12:57:27
31	31.01	08:18:27	12:40:36	17.92	17:02:49	08:44:20	90	31.03	06:00:29	12:31:12	39.48	19:02:26	13:01:57
32	01.02	08:16:40	12:40:46	18.20	17:04:54	08:48:14	91	01.04	05:57:58	12:30:54	39.87	19:04:23	13:06:23
33	02.02	08:14:50	12:40:52	18.49	17:06:59	08:52:07	92	02.04	05:55:27	12:30:36	40.25	19:06:19	13:10:52
34	03.02	08:12:58	12:41:00	18.78	17:09:03	08:56:05	93	03.04	05:52:56	12:30:18	40.63	19:08:16	13:15:20
35	04.02	08:11:04	12:41:05	19.08	17:11:09	09:00:05	94	04.04	05:50:25	12:30:01	41.01	19:10:13	13:19:47
36	05.02	08:09:10	12:41:09	19.39	17:13:14	09:04:05	95	05.04	05:47:53	12:29:42	41.39	19:12:08	13:24:14
37	06.02	08:07:11	12:41:15	19.69	17:15:20	09:08:09	96	06.04	05:45:24	12:29:25	41.77	19:14:06	13:28:42
38	07.02	08:05:12	12:41:18	20.01	17:17:26	09:12:13	97	07.04	05:42:54	12:29:08	42.14	19:16:01	13:33:07
39	08.02	08:03:11	12:41:20	20.32	17:19:33	09:16:22	98	08.04	05:40:23	12:28:51	42.52	19:17:58	13:37:35
40	09.02	08:01:09	12:41:22	20.64	17:21:40	09:20:29	99	09.04	05:37:55	12:28:34	42.89	19:19:55	13:41:59
41	10.02	07:59:06	12:41:23	20.97	17:23:46	09:24:40	100	10.04	05:35:26	12:28:18	43.26	19:21:51	13:46:25
42	11.02	07:57:00	12:41:23	21.30	17:25:52	09:28:50	101	11.04	05:32:59	12:28:02	43.63	19:23:48	13:50:48
43	12.02	07:54:53	12:41:23	21.63	17:27:58	09:33:04	102	12.04	05:30:30	12:27:46	43.99	19:25:45	13:55:14
44	13.02	07:52:44	12:41:21	21.96	17:30:04	09:37:19	103	13.04	05:28:04	12:27:31	44.35	19:27:41	13:59:36
45	14.02	07:50:35	12:41:19	22.30	17:32:10	09:41:34	104	14.04	05:25:38	12:27:16	44.71	19:29:38	14:03:59
46	15.02	07:48:24	12:41:16	22.65	17:34:15	09:45:52	105	15.04	05:23:13	12:27:01	45.07	19:31:34	14:08:22
47	16.02	07:46:11	12:41:12	22.99	17:36:21	09:50:10	106	16.04	05:20:48	12:26:48	45.42	19:33:31	14:12:43
48	17.02	07:43:59	12:41:08	23.34	17:38:26	09:54:28	107	17.04	05:18:24	12:26:34	45.77	19:35:28	14:17:03
49	18.02	07:41:43	12:41:04	23.70	17:40:31	09:58:47	108	18.04	05:16:00	12:26:20	46.12	19:37:24	14:21:23
50	19.02	07:39:27	12:40:57	24.05	17:42:36	10:03:08	109	19.04	05:13:37	12:26:06	46.47	19:39:22	14:25:44
51	20.02	07:37:10	12:40:51	24.41	17:44:42	10:07:31	110	20.04	05:11:17	12:25:53	46.81	19:41:18	14:30:01
52	21.02	07:34:53	12:40:45	24.77	17:46:46	10:11:53	111	21.04	05:08:55	12:25:41	47.15	19:43:14	14:34:19
53	22.02	07:32:34	12:40:36	25.14	17:48:51	10:16:16	112	22.04	05:06:36	12:25:30	47.49	19:45:11	14:38:35
54	23.02	07:30:13	12:40:29	25.50	17:50:55	10:20:41	113	23.04	05:04:16	12:25:18	47.82	19:47:07	14:42:50
55	24.02	07:27:53	12:40:19	25.87	17:52:57	10:25:04	114	24.04	05:01:58	12:25:06	48.15	19:49:03	14:47:04
56	25.02	07:25:30	12:40:11	26.24	17:55:01	10:29:31	115	25.04	04:59:41	12:24:57	48.47	19:51:00	14:51:17
57	26.02	07:23:08	12:40:00	26.62	17:57:04	10:33:55	116	26.04	04:57:26	12:24:46	48.79	19:52:56	14:55:30
58	27.02	07:20:44	12:39:49	26.99	17:59:07	10:38:22	117	27.04	04:55:12	12:24:36	49.11	19:54:52	14:59:39
59	28.02	07:18:21	12:39:39	27.37	18:01:10	10:42:48	118	28.04	04:52:59	12:24:28	49.43	19:56:48	15:03:49
							119	29.04	04:50:47	12:24:18	49.74	19:58:43	15:07:56
							120	30.04	04:48:35	12:24:11	50.04	20:00:39	15:12:02

Nr.	Tag	Aufgang	ZSH	Höhe	Unterg.	Länge	Nr.	Tag	Aufgang	ZSH	Höhe	Unterg.	Länge
121	01.05	04:46:26	12:24:03	50.34	20:02:33	15:16:08	182	01.07	03:52:56	12:30:40	58.15	21:08:04	17:15:07
122	02.05	04:44:17	12:23:57	50.64	20:04:28	15:20:10	183	02.07	03:53:47	12:30:51	58.07	21:07:34	17:13:46
123	03.05	04:42:11	12:23:49	50.93	20:06:22	15:24:12	184	03.07	03:54:39	12:31:00	57.99	21:07:02	17:12:23
124	04.05	04:40:05	12:23:44	51.22	20:08:16	15:28:10	185	04.07	03:55:35	12:31:12	57.91	21:06:24	17:10:50
125	05.05	04:38:01	12:23:39	51.51	20:10:09	15:32:07	186	05.07	03:56:33	12:31:22	57.81	21:05:44	17:09:12
126	06.05	04:35:59	12:23:35	51.79	20:12:03	15:36:02	187	06.07	03:57:33	12:31:31	57.71	21:05:02	17:07:27
127	07.05	04:33:59	12:23:29	52.06	20:13:54	15:39:56	188	07.07	03:58:38	12:31:41	57.60	21:04:14	17:05:36
128	08.05	04:32:01	12:23:26	52.33	20:15:47	15:43:46	189	08.07	03:59:45	12:31:49	57.49	21:03:25	17:03:39
129	09.05	04:30:03	12:23:24	52.60	20:17:37	15:47:33	190	09.07	04:00:54	12:31:56	57.37	21:02:30	17:01:35
130	10.05	04:28:08	12:23:21	52.86	20:19:28	15:51:19	191	10.07	04:02:06	12:32:06	57.24	21:01:33	16:59:26
131	11.05	04:26:15	12:23:19	53.12	20:21:17	15:55:02	192	11.07	04:03:21	12:32:15	57.11	21:00:34	16:57:12
132	12.05	04:24:23	12:23:17	53.37	20:23:07	15:58:44	193	12.07	04:04:38	12:32:21	56.97	20:59:30	16:54:52
133	13.05	04:22:33	12:23:16	53.62	20:24:54	16:02:21	194	13.07	04:05:56	12:32:29	56.82	20:58:22	16:52:25
134	14.05	04:20:46	12:23:16	53.86	20:26:41	16:05:56	195	14.07	04:07:18	12:32:34	56.67	20:57:13	16:49:56
135	15.05	04:19:00	12:23:16	54.09	20:28:27	16:09:25	196	15.07	04:08:40	12:32:41	56.51	20:56:00	16:47:20
136	16.05	04:17:18	12:23:17	54.32	20:30:12	16:12:54	197	16.07	04:10:07	12:32:46	56.35	20:54:45	16:44:38
137	17.05	04:15:37	12:23:20	54.55	20:31:55	16:16:19	198	17.07	04:11:33	12:32:50	56.18	20:53:26	16:41:53
138	18.05	04:13:57	12:23:22	54.77	20:33:37	16:19:39	199	18.07	04:13:02	12:32:54	56.00	20:52:05	16:39:01
139	19.05	04:12:21	12:23:25	54.98	20:35:19	16:22:58	200	19.07	04:14:33	12:32:59	55.82	20:50:40	16:36:08
140	20.05	04:10:47	12:23:27	55.19	20:36:59	16:26:11	201	20.07	04:16:06	12:33:02	55.63	20:49:14	16:33:08
141	21.05	04:09:16	12:23:31	55.39	20:38:38	16:29:21	202	21.07	04:17:39	12:33:04	55.44	20:47:45	16:30:05
142	22.05	04:07:47	12:23:36	55.59	20:40:14	16:32:26	203	22.07	04:19:15	12:33:06	55.24	20:46:13	16:26:58
143	23.05	04:06:20	12:23:40	55.78	20:41:49	16:35:28	204	23.07	04:20:51	12:33:07	55.03	20:44:39	16:23:47
144	24.05	04:04:56	12:23:45	55.96	20:43:22	16:38:25	205	24.07	04:22:30	12:33:08	54.82	20:43:02	16:20:32
145	25.05	04:03:35	12:23:51	56.14	20:44:53	16:41:18	206	25.07	04:24:08	12:33:09	54.61	20:41:22	16:17:13
146	26.05	04:02:18	12:23:58	56.31	20:46:23	16:44:06	207	26.07	04:25:49	12:33:08	54.39	20:39:41	16:13:50
147	27.05	04:01:02	12:24:03	56.48	20:47:52	16:46:49	208	27.07	04:27:30	12:33:07	54.16	20:37:56	16:10:26
148	28.05	03:59:50	12:24:12	56.64	20:49:16	16:49:26	209	28.07	04:29:13	12:33:06	53.93	20:36:10	16:06:56
149	29.05	03:58:41	12:24:18	56.79	20:50:40	16:52:00	210	29.07	04:30:58	12:33:04	53.69	20:34:23	16:03:25
150	30.05	03:57:34	12:24:27	56.94	20:52:02	16:54:26	211	30.07	04:32:42	12:33:02	53.45	20:32:32	15:59:51
151	31.05	03:56:32	12:24:35	57.08	20:53:20	16:56:49	212	31.07	04:34:27	12:32:59	53.20	20:30:41	15:56:13
152	01.06	03:55:32	12:24:45	57.22	20:54:36	16:59:05	213	01.08	04:36:12	12:32:54	52.95	20:28:46	15:52:34
153	02.06	03:54:35	12:24:53	57.35	20:55:51	17:01:16	214	02.08	04:38:00	12:32:49	52.69	20:26:51	15:48:51
154	03.06	03:53:41	12:25:03	57.47	20:57:02	17:03:20	215	03.08	04:39:48	12:32:45	52.43	20:24:53	15:45:05
155	04.06	03:52:52	12:25:14	57.58	20:58:10	17:05:18	216	04.08	04:41:36	12:32:38	52.16	20:22:53	15:41:18
156	05.06	03:52:04	12:25:23	57.69	20:59:15	17:07:11	217	05.08	04:43:24	12:32:32	51.89	20:20:52	15:37:28
157	06.06	03:51:22	12:25:34	57.80	21:00:18	17:08:56	218	06.08	04:45:13	12:32:26	51.62	20:18:50	15:33:36
158	07.06	03:50:42	12:25:46	57.89	21:01:19	17:10:36	219	07.08	04:47:02	12:32:17	51.34	20:16:45	15:29:41
159	08.06	03:50:06	12:25:56	57.98	21:02:16	17:12:09	220	08.08	04:48:51	12:32:10	51.05	20:14:39	15:25:47
160	09.06	03:49:32	12:26:07	58.06	21:03:09	17:13:37	221	09.08	04:50:43	12:32:01	50.77	20:12:32	15:21:49
161	10.06	03:49:03	12:26:20	58.14	21:04:01	17:14:56	222	10.08	04:52:32	12:31:51	50.47	20:10:23	15:17:49
162	11.06	03:48:38	12:26:32	58.21	21:04:47	17:16:09	223	11.08	04:54:24	12:31:42	50.18	20:08:13	15:13:48
163	12.06	03:48:16	12:26:43	58.27	21:05:32	17:17:15	224	12.08	04:56:15	12:31:31	49.88	20:06:01	15:09:46
164	13.06	03:47:58	12:26:55	58.33	21:06:12	17:18:14	225	13.08	04:58:05	12:31:21	49.57	20:03:49	15:05:43
165	14.06	03:47:43	12:27:09	58.37	21:06:49	17:19:05	226	14.08	04:59:57	12:31:10	49.26	20:01:34	15:01:37
166	15.06	03:47:34	12:27:21	58.42	21:07:23	17:19:50	227	15.08	05:01:48	12:30:57	48.95	19:59:18	14:57:29
167	16.06	03:47:26	12:27:33	58.45	21:07:53	17:20:27	228	16.08	05:03:40	12:30:44	48.63	19:57:03	14:53:22
168	17.06	03:47:22	12:27:46	58.48	21:08:20	17:20:58	229	17.08	05:05:33	12:30:31	48.31	19:54:45	14:49:11
169	18.06	03:47:23	12:27:59	58.50	21:08:44	17:21:19	230	18.08	05:07:24	12:30:18	47.99	19:52:26	14:45:03
170	19.06	03:47:27	12:28:12	58.51	21:09:02	17:21:35	231	19.08	05:09:16	12:30:04	47.67	19:50:06	14:40:50
171	20.06	03:47:35	12:28:25	58.52	21:09:19	17:21:42	232	20.08	05:11:08	12:29:50	47.34	19:47:47	14:36:38
172	21.06	03:47:46	12:28:37	58.52	21:09:30	17:21:43	233	21.08	05:13:00	12:29:35	47.00	19:45:24	14:32:25
173	22.06	03:48:02	12:28:50	58.52	21:09:39	17:21:37	234	22.08	05:14:52	12:29:19	46.67	19:43:03	14:28:11
174	23.06	03:48:20	12:29:03	58.50	21:09:43	17:21:21	235	23.08	05:16:43	12:29:03	46.33	19:40:38	14:23:55
175	24.06	03:48:43	12:29:16	58.48	21:09:44	17:21:00	236	24.08	05:18:35	12:28:47	45.99	19:38:15	14:19:39
176	25.06	03:49:10	12:29:28	58.45	21:09:41	17:20:31	237	25.08	05:20:27	12:28:30	45.64	19:35:49	14:15:22
177	26.06	03:49:39	12:29:40	58.42	21:09:33	17:19:55	238	26.08	05:22:19	12:28:13	45.29	19:33:25	14:11:05
178	27.06	03:50:11	12:29:52	58.38	21:09:22	17:19:10	239	27.08	05:24:11	12:27:56	44.94	19:30:57	14:06:46
179	28.06	03:50:47	12:30:05	58.33	21:09:09	17:18:21	240	28.08	05:26:03	12:27:38	44.59	19:28:31	14:02:27
180	29.06	03:51:27	12:30:17	58.28	21:08:50	17:17:23	241	29.08	05:27:55	12:27:20	44.23	19:26:03	13:58:08
181	30.06	03:52:11	12:30:27	58.22	21:08:28	17:16:18	242	30.08	05:29:47	12:27:00	43.88	19:23:35	13:53:47
							243	31.08	05:31:39	12:26:41	43.52	19:21:07	13:49:27

Nr.	Tag	Aufgang	ZSH	Höhe	Unterg.	Länge	Nr.	Tag	Aufgang	ZSH	Höhe	Unterg.	Länge
244	01.09	05:33:31	12:26:23	43.15	19:18:36	13:45:06	305	01.11	07:30:37	12:10:02	20.50	16:49:19	09:18:40
245	02.09	05:35:22	12:26:03	42.79	19:16:07	13:40:45	306	02.11	07:32:39	12:10:02	20.19	16:47:16	09:14:35
246	03.09	05:37:14	12:25:44	42.42	19:13:37	13:36:22	307	03.11	07:34:43	12:10:02	19.88	16:45:14	09:10:32
247	04.09	05:39:04	12:25:23	42.05	19:11:05	13:32:00	308	04.11	07:36:45	12:10:02	19.57	16:43:15	09:06:30
248	05.09	05:40:56	12:25:02	41.68	19:08:35	13:27:38	309	05.11	07:38:46	12:10:04	19.27	16:41:17	09:02:31
249	06.09	05:42:47	12:24:43	41.31	19:06:03	13:23:14	310	06.11	07:40:47	12:10:07	18.97	16:39:20	08:58:32
250	07.09	05:44:39	12:24:21	40.94	19:03:30	13:18:51	311	07.11	07:42:49	12:10:12	18.68	16:37:26	08:54:36
251	08.09	05:46:31	12:24:00	40.56	19:00:58	13:14:28	312	08.11	07:44:50	12:10:16	18.39	16:35:34	08:50:44
252	09.09	05:48:22	12:23:41	40.18	18:58:26	13:10:03	313	09.11	07:46:51	12:10:20	18.10	16:33:43	08:46:51
253	10.09	05:50:13	12:23:19	39.81	18:55:53	13:05:40	314	10.11	07:48:52	12:10:27	17.82	16:31:56	08:43:02
254	11.09	05:52:04	12:22:57	39.43	18:53:19	13:01:14	315	11.11	07:50:52	12:10:34	17.55	16:30:09	08:39:16
255	12.09	05:53:55	12:22:37	39.04	18:50:46	12:56:51	316	12.11	07:52:52	12:10:41	17.28	16:28:26	08:35:32
256	13.09	05:55:46	12:22:15	38.66	18:48:13	12:52:25	317	13.11	07:54:52	12:10:50	17.01	16:26:43	08:31:50
257	14.09	05:57:39	12:21:53	38.28	18:45:39	12:48:00	318	14.11	07:56:51	12:11:00	16.75	16:25:03	08:28:13
258	15.09	05:59:30	12:21:32	37.89	18:43:06	12:43:35	319	15.11	07:58:50	12:11:10	16.50	16:23:26	08:24:36
259	16.09	06:01:22	12:21:11	37.51	18:40:31	12:39:10	320	16.11	08:00:46	12:11:22	16.25	16:21:51	08:21:04
260	17.09	06:03:13	12:20:48	37.12	18:37:57	12:34:44	321	17.11	08:02:43	12:11:34	16.01	16:20:19	08:17:36
261	18.09	06:05:04	12:20:28	36.74	18:35:24	12:30:19	322	18.11	08:04:38	12:11:46	15.77	16:18:51	08:14:12
262	19.09	06:06:55	12:20:06	36.35	18:32:50	12:25:53	323	19.11	08:06:34	12:12:00	15.54	16:17:23	08:10:50
263	20.09	06:08:47	12:19:44	35.96	18:30:16	12:21:28	324	20.11	08:08:27	12:12:15	15.32	16:15:58	08:07:32
264	21.09	06:10:39	12:19:24	35.57	18:27:41	12:17:01	325	21.11	08:10:20	12:12:30	15.10	16:14:37	08:04:18
265	22.09	06:12:31	12:19:02	35.18	18:25:07	12:12:36	326	22.11	08:12:10	12:12:46	14.88	16:13:18	08:01:08
266	23.09	06:14:23	12:18:40	34.79	18:22:34	12:08:10	327	23.11	08:14:00	12:13:03	14.68	16:12:04	07:58:03
267	24.09	06:16:16	12:18:20	34.41	18:20:00	12:03:42	328	24.11	08:15:49	12:13:21	14.47	16:10:50	07:55:01
268	25.09	06:18:08	12:17:59	34.02	18:17:26	11:59:18	329	25.11	08:17:36	12:13:41	14.28	16:09:42	07:52:05
269	26.09	06:20:01	12:17:38	33.63	18:14:52	11:54:50	330	26.11	08:19:21	12:14:00	14.09	16:08:35	07:49:13
270	27.09	06:21:54	12:17:17	33.24	18:12:20	11:50:25	331	27.11	08:21:04	12:14:19	13.91	16:07:32	07:46:28
271	28.09	06:23:47	12:16:58	32.85	18:09:47	11:45:58	332	28.11	08:22:45	12:14:40	13.74	16:06:32	07:43:45
272	29.09	06:25:40	12:16:38	32.46	18:07:13	11:41:33	333	29.11	08:24:26	12:15:02	13.57	16:05:35	07:41:10
273	30.09	06:27:33	12:16:17	32.07	18:04:41	11:37:07	334	30.11	08:26:02	12:15:24	13.41	16:04:42	07:38:39
274	01.10	06:29:28	12:15:58	31.69	18:02:10	11:32:42	335	01.12	08:27:39	12:15:46	13.25	16:03:53	07:36:13
275	02.10	06:31:22	12:15:40	31.30	17:59:38	11:28:15	336	02.12	08:29:12	12:16:11	13.11	16:03:06	07:33:55
276	03.10	06:33:16	12:15:21	30.91	17:57:06	11:23:51	337	03.12	08:30:43	12:16:34	12.97	16:02:23	07:31:40
277	04.10	06:35:10	12:15:03	30.53	17:54:35	11:19:25	338	04.12	08:32:11	12:17:00	12.83	16:01:44	07:29:33
278	05.10	06:37:05	12:14:45	30.14	17:52:06	11:15:00	339	05.12	08:33:37	12:17:25	12.71	16:01:10	07:27:32
279	06.10	06:39:01	12:14:26	29.76	17:49:35	11:10:34	340	06.12	08:35:00	12:17:50	12.59	16:00:39	07:25:38
280	07.10	06:40:55	12:14:09	29.38	17:47:05	11:06:10	341	07.12	08:36:20	12:18:17	12.48	16:00:10	07:23:51
281	08.10	06:42:52	12:13:52	29.00	17:44:37	11:01:44	342	08.12	08:37:37	12:18:43	12.37	15:59:47	07:22:09
282	09.10	06:44:47	12:13:35	28.62	17:42:08	10:57:21	343	09.12	08:38:52	12:19:10	12.28	15:59:28	07:20:35
283	10.10	06:46:43	12:13:19	28.24	17:39:41	10:52:56	344	10.12	08:40:04	12:19:39	12.19	15:59:12	07:19:07
284	11.10	06:48:40	12:13:04	27.86	17:37:13	10:48:33	345	11.12	08:41:11	12:20:07	12.11	15:59:00	07:17:47
285	12.10	06:50:38	12:12:49	27.49	17:34:47	10:44:09	346	12.12	08:42:16	12:20:35	12.03	15:58:51	07:16:34
286	13.10	06:52:34	12:12:34	27.12	17:32:22	10:39:46	347	13.12	08:43:19	12:21:04	11.97	15:58:47	07:15:28
287	14.10	06:54:33	12:12:22	26.75	17:29:56	10:35:24	348	14.12	08:44:16	12:21:33	11.91	15:58:47	07:14:31
288	15.10	06:56:30	12:12:08	26.38	17:27:33	10:31:01	349	15.12	08:45:12	12:22:03	11.86	15:58:51	07:13:40
289	16.10	06:58:28	12:11:55	26.01	17:25:08	10:26:39	350	16.12	08:46:02	12:22:33	11.81	15:59:00	07:12:56
290	17.10	07:00:27	12:11:42	25.64	17:22:46	10:22:20	351	17.12	08:46:50	12:23:03	11.78	15:59:12	07:12:21
291	18.10	07:02:26	12:11:32	25.28	17:20:25	10:17:59	352	18.12	08:47:35	12:23:32	11.75	15:59:29	07:11:53
292	19.10	07:04:26	12:11:21	24.92	17:18:04	10:13:38	353	19.12	08:48:15	12:24:02	11.73	15:59:49	07:11:34
293	20.10	07:06:24	12:11:10	24.56	17:15:45	10:09:19	354	20.12	08:48:50	12:24:32	11.72	16:00:12	07:11:21
294	21.10	07:08:24	12:11:01	24.21	17:13:26	10:05:00	355	21.12	08:49:23	12:25:03	11.71	16:00:40	07:11:17
295	22.10	07:10:24	12:10:51	23.86	17:11:07	10:00:42	356	22.12	08:49:53	12:25:34	11.72	16:01:12	07:11:19
296	23.10	07:12:24	12:10:44	23.51	17:08:51	09:56:26	357	23.12	08:50:17	12:26:05	11.73	16:01:49	07:11:32
297	24.10	07:14:25	12:10:35	23.16	17:06:36	09:52:09	358	24.12	08:50:38	12:26:35	11.75	16:02:30	07:11:51
298	25.10	07:16:26	12:10:29	22.82	17:04:22	09:47:54	359	25.12	08:50:55	12:27:05	11.77	16:03:13	07:12:17
299	26.10	07:18:27	12:10:22	22.48	17:02:09	09:43:41	360	26.12	08:51:07	12:27:36	11.81	16:04:00	07:12:53
300	27.10	07:20:28	12:10:18	22.14	16:59:56	09:39:28	361	27.12	08:51:16	12:28:05	11.85	16:04:52	07:13:35
301	28.10	07:22:31	12:10:13	21.80	16:57:46	09:35:15	362	28.12	08:51:21	12:28:35	11.90	16:05:46	07:14:24
302	29.10	07:24:33	12:10:08	21.47	16:55:37	09:31:05	363	29.12	08:51:22	12:29:04	11.96	16:06:46	07:15:22
303	30.10	07:26:35	12:10:05	21.15	16:53:29	09:26:55	364	30.12	08:51:20	12:29:35	12.02	16:07:48	07:16:27
304	31.10	07:28:35	12:10:03	20.82	16:51:23	09:22:48	365	31.12	08:51:13	12:30:04	12.10	16:08:53	07:17:39

Tab. 5: Zeiten in MEZ für Sonnenaufgang, Sonnenhöchststand (ZSH) und Sonnenuntergang sowie Mittagshöhe und Tageslänge bei gegebenem Datum des Jahres 2002. Die Genauigkeit beträgt etwa ± 30 s.

Literaturverzeichnis

- [1] W.AMBACH, M.BLUMTHALER and A.CEDE: Attenuation of solar UVB- and total irradiance by cloudiness, Meteorologische Zeitschrift, Vol.4, 213-217, 1995
- [2] Arbeitsgemeinschaft Bevölkerungsbezogener Krebsregister in Deutschland: Krebs in Deutschland – Häufigkeiten und Trends, 2. Aktualisierte Ausgabe, Saarbrücken, 1999
- [3] A.F.BAIS: Spectrometers: Operational errors and uncertainties, In: C.S.ZEREFOS, A.F.BAIS (ed.): Solar Ultraviolet Radiation – Modelling, Measurements and Effects, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-62711-1, 165-173, 1997
- [4] Bentham: A Guide to Spectroradiometry: Instruments and Applications for the Ultraviolet, Bentham Inst. Ltd, 2 Boulton Road, Reading, England, 1994
- [5] L.BERGMANN, C.SCHAEFER: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3: Optik, De Gruyter-Verlag, Berlin New York, 1993
- [6] L.BERGMANN, C.SCHAEFER: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 7: Erde und Planeten, De Gruyter-Verlag, Berlin New York, 2001
- [7] M.BLUMTHALER, J.GRÖBNER, M.HUBER and W.AMBACH: Measuring spectral and spatial variations of UVA and UVB sky radiance, Geophys. Res. Let., Vol. 23. No. 5, 547-550, 1996
- [8] M.BORN: Optik – Ein Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1985
- [9] I.N.BRONSTEIN, K.A.SEMENDJAJEW: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/Main, 1987
- [10] G.E.BRUECKNER, L.E.FLOYD, P.A.LUND, D.K.PRINZ and M.E.VAN-HOOSIER: Solar ultraviolet spectral-irradiance observations from the SUSIM-UARS experiment, Metrologia, Vol. 32, 661-665, 1996
- [11] K.BULLRICH: Atmosphäre und Mensch, Umschau-Verlag, Frankfurt/Main, 1981

-
- [12] Deutsche Krebshilfe e.V.: Hautkrebs – Vermeidung, Früherkennung, Behandlung, Die blauen Ratgeber 5, Bonn, 1998
- [13] B.L.DIFFEY: Analysis of the risk of skin cancer from sunlight and solarium in subjects living in northern Europe, *Photodermatol.* 4, 118-126, 1987
- [14] DIN 5031-1 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik, Beuth Verlag, Berlin
- [15] DIN 5031-7 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Beuth Verlag, Berlin
- [16] DIN 5031-10 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektrum, Beuth Verlag, Berlin
- [17] Epidemiologisches Krebsregister Saarland, Statistisches Landesamt, Berechnung der Hautkrebsinzidenz auf der Basis der Jahresberichte des Saarländischen Krebsregisters
- [18] R.P.GALAGHER, G.B.HILL, C.D.BADJDIK, S.FINCHAM, A.J.COLDMAN: Sunlight exposure, pigmentary factors, and risk of nonmelanocytic skin cancer. I. Basal cell carcinoma, *Arch. Dermatol.* 131,2, 157-163, 1995
- [19] B.G.GARDINER: Spectroradiometer calibration methods and techniques, In: C.S.ZEREFOS, A.F.BAIS (ed.): *Solar Ultraviolet Radiation – Modelling, Measurements and Effects*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-62711-1, 119-132, 1997
- [20] R.M.GOODY, J.C.G.WALKER: *Atmosphären*, F.Enke Verlag Stuttgart, 1985
- [21] T.E.GRAEDEL, P.J.CRUTZEN: *Chemie der Atmosphäre – Bedeutung für Klima und Umwelt*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin Oxford, 1994
- [22] GRIMSEHL, *Lehrbuch der Physik, Band III Optik*, Teubner-Verlag, Leipzig, 1988
- [23] K.HEMPE, J.MOLT: *Sterne im Computer*, Rudolf Mueller Verlag, Köln, 1986
- [24] E.HEYER: *Witterung und Klima: Eine allgemeine Klimatologie*, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart Leipzig, 1993
- [25] G.HOEPPE: *Blau – Die Farbe des Himmels*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin, 1999
- [26] A.F.HOLLEMAN, E.WIBERG: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, de Gruyter Verlag, Berlin New York, 1995

-
- [27] ICNIRP: Global Solar UV Index, ICNIRP-1/95, Bundesamt für Strahlenschutz, Oberschleißheim, 1995
- [28] Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V.: Die Methode zur Bestimmung des Lichtschutzfaktors, Frankfurt/M., 1995
- [29] W.JESSEL: Die diffuse Himmelsstrahlung. Eine vergleichende Darstellung der Bestrahlungsstärke bezogen auf eine kugelförmige und eine ebene horizontale Empfängerfläche, Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B, 32, 23-52, 1983
- [30] Keithley: Multimeter 2000 Bedienungsanleitung, Keithley Instruments GmbH, Germering
- [31] M.KERKER: The scattering of light and other electromagnetic radiation, Academic Press, New York and London, 1969
- [32] Kipp & Zonen: Bedienungsanleitung Pyranometer CM 11/14 Teilnr. 0305-201 (9111)
- [33] W.KLÖVERKORN und G.KLÖVERKORN: Sonnenallergie, Apotheker Journal, Vol 18. Nr. 5, 1996
- [34] U.KÖHLER: A comparison of the new filter ozonmeter Microtops II with Dobson and Brewer spectrometers at Hohenpeißenberg, Geophys. Res. Let., Vol. 26. No. 10, 1385-1388, 1999
- [35] D.R.LIDE (Editor): Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 1995
- [36] S.G.LIPSON, H.S.LIPSON, D.S.TANNHAUSER: Optik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1997
- [37] S.MADRONICH: The atmosphere and UV-B radiation at ground level, In: A.R.YOUNG et.al.(ed.): Environmental UV Photobiology, Plenum Press, New York, ISBN 0-306-44443-7, 1-39, 1993
- [38] B.MAYER: Messung und Modellierung der spektralen UV-Bestrahlungsstärke in Garmisch-Partenkirchen, Dissertation, IFU-Schriftenreihe, Wissenschafts-Verlag Dr. Wigbert Maraun, Frankfurt/M., 1997
- [39] A.F.MCKINLEY, B.L.DIFFEY: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, CIE J.6, 17-22, 1987
- [40] G.MIE: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen, Annalen der Physik, IV. Folge (25), 1908
- [41] D.L.MITCHELL and D.KARENTZ: The induction and repair of DNA photo-damage in the environment, In: A.R.YOUNG et.al.(ed.): Environmental UV Photobiology, Plenum Press, New York, ISBN 0-306-44443-7, 345-377, 1993

- [42] J.MOAN and A.DAHLBACK: Ultraviolet radiation and skin cancer: Epidemiological data from Scandinavia, In: A.R.YOUNG et.al.(ed.): Environmental UV Photobiology, Plenum Press, New York, ISBN 0-306-44443-7, 255-293, 1993
- [43] L.T.MOLINA and M.J.MOLINA: Absolute absorption cross sections of ozone in the 185– to 350-nm wavelength range, Geophys. Res., Vol. 91, No. D13, 14,501-14,508, 1986
- [44] O.MONTENBRUCK: Grundlagen der Ephemeridenrechnung, Verlag Sterne und Weltraum, München, 1984
- [45] G.MÜLLER-WESTERMEIER: Klimadaten von Deutschland – Zeitraum 1961 – 1990, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, ISBN 3-88148-324-1, 1996
- [46] The NASA AMES format: <http://www.ram.uni-bremen.de/nasa.html>
- [47] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 01LU9301/1 des BMBF: Entwicklung von Normallampen für das UV-B-Meßprogramm, PTB-Bericht PTB-Opt-52. 1996
- [48] C.PUGMIRE: GLE3.2 User Manual, Physical Sciences, Information Technology Groupe, Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt, New Zealand, 1991
- [49] LORD W.RAYLEIGH: On the transmission of light through an atmosphere containing small particles insuspension, and the origin of the blue of the sky, Philosophical Magazine, 5. Ser. 47, 375-384, 1899
- [50] M.A.RICHARD, J.J.GROB: Photoprotektion: Wirksamer Schutz gegen Sonnenlichtexposition. Informationen zur Gesundheitsaufklärung, Akt. Dermatol.22 Sonderheft 2, 93-96, 1996
- [51] H.SANDMANN: Aufbau eines kompakten Meßsystems zur online Detektion von Tracern in Gewässern auf der Grundlage der laserinduzierten Fluoreszenzspektroskopie, Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1996
- [52] H.SANDMANN, O.SCHEEL, M.STEINMETZ: Solarer UV-Meßgerätevergleich – Aufbau und Charakterisierung des BfS/UBA-Meßsystems, BfS Jahresbericht, ISSN 0940-7650, S24-S26, Salzgitter, 1997
- [53] H.SANDMANN, O.SCHEEL, M.STEINMETZ, M.WALLASCH: QA/QC of BfS/UBA UV Monitoring Network in Practise, Poster Presentation: 2nd Workshop of the Thematic Network for Ultraviolet Measurements, Braunschweig, 09.-11.November 1998
- [54] H.SANDMANN: Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle im Solaren-UV-Monitoring-Meßnetz, BfS Jahresbericht, ISSN 0940-7650, S29-S33, Salzgitter, 1998

- [55] H.SANDMANN: Über die ultraviolette Sonnenstrahlung – Physikalische Grundlagen, Strahlungstransfer durch die Erdatmosphäre sowie biologische Wirkungen auf den Menschen, Der Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht (MNU), 54/5, ISSN 0025-5866, 260-265, 2001
- [56] J.S.SCHAFFER, V.K.SAXENA, B.N.WENNY, W.BARNARD, and J.J.DE-LUISI: Observed influence of clouds on ultraviolet-B radiation, Geophys. Res. L., Vol.23, No.19, 2625-2628, 1996
- [57] G.SCHAUBERGER, G.KECK, A.CABAJ: Das Verhalten des Menschen im solaren Strahlungsfeld im Hinblick auf seine UV-Exposition, Hautarzt 43, 542-547, 1992b
- [58] E.W.SCHPOLSKI: Atomphysik Teil I, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1962
- [59] J.Schreder: User's Manual Diffusor J1002, Fa. CMS Schreder, Oberndorf, A
- [60] A.SCHUH, Angewandte Medizinische Klimatologie – Grundlagen und Praxis, Sonntag Verlag Stuttgart, 1995
- [61] E.G.SCHULZE, H.JUNGMANN: Praxis der Heliotherapie, In: M.BÜHRING, E.G.JUNG (Ed.): UV-Biologie und Heliotherapie, Hippokrates, Stuttgart, 73-84, 1992
- [62] SCI-TEC: Two Axis Positioner (2AP, Belt Drive) – Accessory Manual, SCI-TEC Instr. Inc., 1526 Fletcher Road, Saskatoon, Canada, 1996
- [63] G.SECKMEYER, B.MAYER, G.BERNHARD: The 1997 Status of Solar UV Spectrometry in Germany: Results from the National Intercomparison of UV Spectrometers, IFU-Schriftenreihe, Band 55-1998, 1998
- [64] P.C.SIMON: Extraterrestrial Solar irradiance in the near and medium UV ranges, In: C.S.ZEREFOS, A.F.BAIS (ed.): Solar Ultraviolet Radiation – Modelling, Measurements and Effects, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-62711-1, 1-11, 1997
- [65] M.SINN: Berechnung der solaren Bestrahlung einer Kugel sowie des menschlichen Körpers aus Werten der Global- und Himmelsstrahlung, Dissertation, Institut für Meereskunde an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1984
- [66] D.SLINEY and M.WOLBARSH: Safety with lasers and other optical sources – A comprehensive handbook, Plenum Press, New York, ISBN 0-306-40434-6, 1985
- [67] Solar Light: User's Guide Microtops II Ozone Monitor & Sunphotometer Version 2.43, Document No. MTP05 Feb. 2001, Solar Light Company, 721 Oak Lane, Philadelphia, USA

- [68] K.STAMNES, J.SLUSSEK, and M.BROWN: Derivation of total ozone abundance and cloud effects from spectral irradiance measurements, *Applied Optics*, Vol 30. (30) 4418-4426, 1991
- [69] K.STAMNES: Transfer of Ultraviolet Light in the atmosphere and ocean: A tutorial review, In: C.S.ZEREFOS, A.F.BAIS (ed.): *Solar Ultraviolet Radiation – Modelling, Measurements and Effects*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-62711-1, 49-64, 1997
- [70] M.STEINMETZ, *Tropensonne – wie gefährlich? Ein Vergleich mit unseren Breitengraden*, *Apotheker Journal*, Vol 18. Nr. 5, 1996
- [71] M.STEINMETZ: Continuous solar UV monitoring in Germany, *J. Photochem. Photobiol. B: Biology*, Vol.41, 181-187, 1997
- [72] M.STEINMETZ, R.MATTHES, P.HOFMANN, G.BRIX: Erfassung und strahlenhygienische Bewertung der solaren UV-Exposition in Deutschland, *Z.Med.Phys.* Vol. 11, 227-235, 2001
- [73] C.STICK: Die Beiträge von direkter und indirekt diffuser Sonnenstrahlung im UV-Spektrum, *Akt. Dermatol.* 27, 7-12, 2001
- [74] C.STICK: Die ultraviolette Sonnenstrahlung, aktinische Komponente des Reizklimas, In: *Sonne, Luft, Strand und Meer – natürliche Attraktionen auf Sylt im Lichte der Wissenschaft*, Schriftenreihe Hippokrates – Medizinische Forschungsergebnisse Band 58, Verlag Dr. Kovac, Hamburg, ISSN 1435-6309, 2001
- [75] C.STICK, V.HARMS, L.PIELKE: Spektroradiometrische Erfassung der solaren Ultraviolettstrahlung an der Nordseeküste, *Phys. Rehab. Kur. Med.*, Vol 6, 1-6, 1996
- [76] C.STICK, V.HARMS, L. PIELKE: Auf den Menschen beziehbare Messung der ultravioletten Sonnenstrahlung, *Phys. Rehab. Kur. Med.*, Vol 7, 55-59, 1997
- [77] C.STICK, L.PIELKE: Ultraviolette Sonnenstrahlung und Sonnenbrandgefahr, *Akt. Dermatol.*, Vol.23, 328-332, 1997
- [78] C.STICK, L.PIELKE: Die Zusammensetzung der solaren UV-Strahlung im Tagesverlauf, *Akt. Dermatol.*, Vol.24, 159-163, 1998
- [79] Strahlenschutzkommission: Schutz des Menschen vor solarer UV-Strahlung – Empfehlungen und Stellungnahmen der Strahlenschutzkommission, Nr. 4, 1998
- [80] Susim-Server: <ftp://susim0.nrl.navy.mil/pub/susimsl2/>
- [81] Thies Clima: Pyranometer CM 11 Bedienungsanleitung 7.1414.01.000, Adolf Thies GmbH, Hauptstr. 76, 33083 Göttingen

-
- [82] A.UNSÖLD, B.BASCHEK: Der neue Kosmos, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1981
- [83] VDI-Richtlinien: Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Oberflächen, VDI 3789, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1999
- [84] A.R.WEBB, B.G.GARDINER, T.J.MARTIN, K.LESZCZYNSKI, J.METZDORF, V.A.MOHNEN: Guidelines for site quality control of UV monitoring, WMO Global Atmosphere Watch, No. 126, WMO TD No. 884, Geneva, 1998
- [85] W.WEISCHET: Einführung in die allgemeine Klimatologie, Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1988
- [86] A.WISKEMANN: Zu Hautkrebsrisiko durch UV-Strahlung, In: M.BÜHRING, E.G.JUNG (Ed.): UV-Biologie und Heliotherapie, Hippokrates, Stuttgart, 13-18, 1992
- [87] World Meteorological Organisation: Guide to meteorological instruments and methods of observation, WMO, Genf, Schweiz, 1983
- [88] R.ZELLNER u.a. (Hrsg.): 10 Jahre Deutsche Ozonforschung – Eine Dokumentation des Ozonforschungsprogramms des Bundesministerium für Bildung und Forschung 1989-1999, Verlag für Marketing und Kommunikation GmbH, Worms, 1999

Index

- 2AP, *siehe* Schwenkvorrichtung
- Absorptionsquerschnitt, 17
Absorptionsvermögen, 12
Aequinoktien, 8
Aerosol, 21, 82
ALEXANDER VON HUMBOLDT, 1
Aphel, 9
Apoptose, 23
Augenempfindlichkeit, 27, 36
- Basalzellkarzinom, *siehe* Hautkrebs
Bestrahlung, 6
Beugung, 30
Bundesamt für Strahlenschutz, 3, 31
- CHAPMAN-Reaktionen, 16
Chromophore, 2, 23
Cosinusfehler, 40, 86
- Dermis, 22
Diffusion, 14
Diffusor, 29, 31, 39, 40, 86
Dipolstrahlung, 20
Dispersion, 86
DNA, 2, 22, 23
DOBSON-Units, 18, 34
- Ekliptik, 5, 9
Epidermis, 22
Erythem, 23–25
Erythemfunktion, 25, 26, 48
erythemwirksame Bestrahlungsstärke
 diffuse, 31, 35, 44–48
 direkte, 44–48
 Jahresverlauf, 42–44
 Messgerät, *siehe* Spektralradiometer
 Tagesverlauf, 44–48, 53, 63
Exosphäre, 14
- FCKW, 1, 2, 16
FRAUNHOFERSche Linien, 13, 17, 32
- Gesamtstrahlung, 4, 15, 32
 diffuse, 33, 35, 44–48, 53, 63
 direkte, 33, 35, 44–48
 extraterrestrische, 13–15
 Jahresverlauf, 42, 43
 Messgerät, *siehe* Pyranometer
 Tagesverlauf, 44–48, 53, 63
Globalstrahlung, 3, 33
- Halbwertsbreite, 40, 41, 86
Hautkrebs, 1–3, 27, 28, 82
Hauttyp, 23, 24, 27
Heliotherapie, 4
HERTZscher Dipol, 19
Himmelsblau, 21
Hornzellen, *siehe* Keratinozyten
- Inzidenz, 2, 27, 28
Ionosphäre, *siehe* Thermosphäre
- Kalibration, 32, 41, 79
Kalibriervorrichtung, 33, 79, 87
Kartierung des Himmelsgewölbes
 mit Blende, 53–62, 80
 mit ebenem Empfänger, 63–70, 81
 Modus, 36–38
- Karzinom, *siehe* Hautkrebs
KEPPLERSche Gesetze, 9
Keratinozyten, 22
Klima, 1
Konvektion, 14
Kulminationszeit, 8, 9
- LAMBERT-BEERSches Gesetz, 18
Lederhaut, *siehe* Dermis
Lichtschutzfaktor, 77, 78, 82

Lichtwellenleiter, 29, 31, 39
 Melanom, *siehe* Hautkrebs
 Melanozyten, 23, 27
 Mesosphäre, 14
 MIE-Streuung, 21
 Mittagshöhe, 7–9, 90
 Monochromator, 29–31

 Nachweisgrenze, 87

 Oberhaut, *siehe* Epidermis
 Ozon-Kante, 17, 18, 32, 41
 Ozonmessgerät, 34, 44, 87
 Ozonsäule
 Jahresverlauf, 18, 19
 Ozonschicht, 2, 15–17

 Perihel, 9
 Phasenfunktion, 20, 21, 49
 Photomultiplier, 30, 40, 87
 Photovoltaik, 4, 81
 PLANCKSches Strahlungsgesetz, 12
 Polarisation, 19
 Pyranometer, 32–34, 87
 Pyrheliometer, 33–35, 87

 Rückwärtsstreuung, 20, 49, 62
 RAYLEIGH-Streuung, 19–21, 47–49, 62
 Reflexionsgitter, 29
 Reflexionsvermögen, 12
 Refraktion, 10, 89

 Saarländisches Krebsregister, 2, 27, 28
 Schattenkugel, 3, 4, 31, 35, 46, 86
 Schattenring, 3, 33, 46
 Schrittmotorsteuerung, 30, 31
 Schwarzer Strahler, 12, 13
 Schwenkvorrichtung, 34–37, 79, 87
 SNELLIUSSches Brechungsgesetz, 10
 Sofortpigmentierung, 23–25, 36
 Software, 34–38, 79, 89
 Solarien, 24
 Solarkonstante, 13, 14
 Sonnenbrand, *siehe* Erythem
 Sonnenephemeriden, 89
 Sonnenhöhenwinkel, 7, 11, 47, 53

 Sonnennachführung, 44–48, 80
 Modus, 34, 38
 Spätpigmentierung, 23–25
 Spektrale Bestrahlungsstärke, 6
 Spektralradiometer, 29–32, 39–42, 86
 Spezifische Ausstrahlung, 6
 Stachelzellkarzinom, *siehe* Hautkrebs
 Stachelzellschicht, 22
 Statosphäre, 16
 Strahldichte, 6
 Strahlstärke, 6
 Strahlungsenergie, 6
 Strahlungsleistung, 6
 Strahlungstransfer, 14
 Stratosphäre, 2, 14–16
 Streuquerschnitt, 20

 Thermosphäre, 14
 Totalreflexion, 39
 Treibhauseffekt, 1
 Tropopause, 14
 Troposphäre, 2, 14

 Umweltbundesamt, 3, 31
 Unterhaut, 22
 UVB-Kante, *siehe* Ozon-Kante

 Verschattung
 durch Gebäude, 71–73, 82
 durch Sonnenschirm, 76–78, 82
 durch Strandkorb, 74, 75, 81
 Vorwärtsstreuung, 20, 21

 Wellenlängengenauigkeit, 40, 41, 86
 WIENSches Verschiebungsgesetz, 12
 Wirkungsfunktion, 24–26
 World Meteorological Organisation, 3,
 14, 15, 30, 31

 Zeitgleichung, 9
 Zenitscan
 mit Blende, 48–50, 80
 mit ebenem Empfänger, 51, 52, 80
 Modus, 36, 38

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt

- Prof. Dr. CARSTEN STICK für die Beschaffung und Zurverfügungstellung des Arbeitsplatzes und das interessante Thema der Promotion. Darüber hinaus hat Prof. STICK mit seinen fachlichen Hinweisen und Diskussionen nicht nur sehr zum Gelingen der Arbeit sondern auch zur Fortbildung seines Doktoranden beigetragen,
- Prof. Dr. VOLKMAR HELBIG für die unkomplizierte und kompetente Betreuung über die Institutsgrenzen hinweg,
- Dr. MANFRED STEINMETZ vom Bundesamt für Strahlenschutz in München-Neuherberg für die jahrelange freundschaftliche Zusammenarbeit und das stete Interesse am Fortgang und Gelingen sowohl der Promotion als auch der Selbständigkeit,
- allen Mitarbeitern des Instituts für Medizinische Klimatologie für das freundliche Arbeitsklima und die Unterstützung, die mir zuteil wurde,
- sowie allen Mitarbeitern der Elektronik- und der Feinmechanikwerkstatt des Physiologischen Instituts, insbesondere Herrn WERNER KOSSELLEK für die Anfertigung verschiedenster Halterungen, Diffusoren und Blendenkonstruktionen.

Lebenslauf



Persönliche Daten:

Name: HENNER SANDMANN
Geboren: 03. Januar 1968 in Bremerhaven
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

Schulabschluss:

02. Juni 1987 Allgemeine Hochschulreife in Bremerhaven

Wehrdienst:

10/87 – 10/88 Marinesoldat in Brake und Wilhelmshaven

Studium:

10/88 – 10/89 Studium der Elektrotechnik an der Universität Bremen
11/89 – 07/96 Studium der Physik an der Universität Kiel
18. Juli 1996 Diplom. Thema der Arbeit: *Aufbau eines kompakten Meßsystems zur online-Detektion von Tracern in Gewässern auf der Grundlage der laserinduzierten Fluoreszenzspektroskopie*

Zusatzausbildung:

3/94 , 7/94 Zweimonatige Ausbildung zum geprüften Forschungstaucher

Berufstätigkeit:

12/96 – 02/97 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Kiel
02/97 – 12/98 Wissenschaftlicher Referent im Bundesamt für Strahlenschutz in München, Fachbereich: Nichtionisierende Strahlung

Selbständigkeit:

seit 02/99 freiberufliche Selbständigkeit in Kiel, www.uv-tech.de

Promotion:

12/99 - 07/02 Dissertation zum Dr. rer. nat., Thema der Arbeit:
Über die Verteilung der diffusen, im Himmelsgewölbe gestreuten ultravioletten Strahlung: Spektrale Messungen und Szenarien für eine medizinische Bewertung

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel erstellt habe.

Kiel, den 06. Juni 2002

(Henner Sandmann)

ISBN 3-00-009681-7