



in Zusammenarbeit mit



**Bundesanstalt für
Arbeitsschutz
und Arbeitsmedizin**



**Christian-
Albrechts
Universität**



**Deutscher
Wetterdienst**



**Bayerisches
Landesamt
für Umwelt-**



**Niedersächsische
Gewerbeaufsicht**

Solare bodennahe UV-Strahlung in Deutschland

**Jahresberichte über das
solare UV-MESSNETZ in Deutschland (sUV-Mo-Net)**

Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 100149, 38201 Salzgitter

Inhaltsangabe

1. Zusammenfassung	S. 3
2. Messprinzip und Bewertungskriterien	S. 5
2.1 Allgemeine Bemerkungen zur solaren UV-Exposition	S. 5
2.2 Atmosphärische Einflussgrößen auf die solare UV-Strahlung	S. 5
2.3 Betrieb des UV-Messnetzes	S. 8
2.4 Gesundheitliche Bewertung der UV-Strahlung und Erythemdosis	S. 11
2.5 Ökologische Bewertung der UV-Strahlung	S. 13
2.6 Exemplarischer Tagesverlauf der UV-Strahlung	S. 13
2.7 UV-Index	S. 15
2.8 UVI Berichterstattung und Prognose	S. 16
3. Messwerte	S. 18
3.1 Unbewertete Messergebnisse	S. 18
3.2 Gesundheitlich bewertete Messergebnisse	S. 19
4. Gesamtbewertung der Messergebnisse	S. 22
4.1 Aktuelle Messwerte	S. 22
4.2 Trendanalyse	S. 24
5. Literatur	S. 26

1. Zusammenfassung

Zur Entwicklung zuverlässiger Vorhersagen über die Gesundheits- und Umweltkonsequenzen infolge der anthropogenen Änderungen der Erdatmosphäre betreibt das Bundesamt für Strahlenschutz zusammen mit dem Umweltbundesamt seit 1993 ein UV-Messnetz. Gemeinsam mit mittlerweile 5 weiteren assoziierten Institutionen wird die solare UV-Strahlung an allen strahlenklimatologisch wichtigen Standorten Deutschlands kontinuierlich und spektral aufgelöst in Erdbodennähe gemessen.

In diesem Bericht werden in einem allgemeinen Teil das Messprinzip und die Kriterien für eine gesundheitliche Bewertung dargelegt. Des Weiteren wird ausführlich auf die UVI-Berichterstattung und –Prognose eingegangen. Als Indikator für eine gesundheitliche UV-Bewertung dient dabei der Sonnenbrand, da er als kurzzeitig verzögerte biologische Antwort auf zu starke UV-Bestrahlung auftritt und sein Wirkungsspektrum dem der Hautalterung und des Hautkrebses sehr ähnlich ist.

In einem weiteren Abschnitt werden die Jahresverläufe der wichtigsten Bestrahlungsgrößen ab dem Jahr 2000 dargestellt. Dazu gehören die erythemwirksame Bestrahlungsstärke, die erythemwirksame Bestrahlung bzw. Dosis und der UV-Index. Der Übersichtlichkeit halber sind die umfangreichen Grafiken und Tabellen nach Jahrgängen gegliedert.

Den besten Überblick über die UV-Belastung der einzelnen Jahre geben die Farbflächendiagramme, in denen die UV-Dosiswerte des Jahres in einem 30 min-Zeitraster dargestellt sind. Die Diagramme zeigen ausgedehnte Zeitfenster mit durchaus hohen UV-Belastungen im Frühsommer bis in den Herbst. In dieser Zeit können Tagesspitzenwerte von über 5000 J/m² auftreten, d.h. mindestens das 20fache der minimalen erythemwirksamen Schwellendosis für den Hauttyp II.

Der hauptsächlich in der Öffentlichkeitsarbeit verwendete UV-Index ist als Messgröße ebenfalls in diesem Bericht aufgeführt. Er zeigt anschaulich, dass auch in unseren Breitengraden Werte von 6 und höher auftreten, die als hoch und sehr hoch klassifiziert werden. Bereits bei moderaten UV-Belastungen sind Schutzmaßnahmen empfehlenswert.

Für eine erste Trendanalyse wurden als Parameter nicht einzelne kurzzeitige Strahlungsspitzen, sondern vielmehr ein längerer Zeitabschnitt herangezogen, wie z.B. die mittlere Tagessumme der erythemwirksamen Bestrahlung H_{er} für den Monat August, ein Zeitabschnitt, in dem die Sonneneinstrahlung noch recht hoch ist und viele Freizeitaktivitäten im Außenbereich stattfinden. Es wurden aber auch Messwertmittelungen über das Jahr analysiert. Anhand der Messstation Neuherberg konnte gezeigt werden, dass die UV-Intensität in Deutschland im Zeitraum 2000-2007 nur marginal, d.h. geringer als 5% gestiegen ist.

Dieser Bericht soll dazu beitragen, der Bevölkerung eine Einschätzung ihrer aktuellen und zukünftigen UV-Belastung zu ermöglichen.

2. Messprinzip und Bewertungskriterien

2.1 Allgemeine Bemerkungen zur solaren UV-Exposition

Die Sonne ist die wichtigste UV-Strahlenquelle. Ihre UV-Intensität in Bodennähe ist ausreichend hoch, um einen großen Einfluss auf die Gesundheit des Menschen, sowie auf terrestrische und aquatische Ökosysteme auszuüben. Ein Abbau des Gesamtzongehaltes durch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) könnte diesen Einfluss weiter erhöhen. Aus diesem Grund ist die bodennahe solare UV-Strahlung ein wichtiger Umweltparameter geworden, den es ständig zu erfassen sowie strahlenhygienisch und ökologisch zu bewerten gilt.

Auf den Menschen bezogen, ist vor allem die in den letzten Jahrzehnten zu beobachtende sehr hohe Zunahme der Hautkrebserkrankungen besorgniserregend [1,2]. Diese Zunahme steht nicht im Zusammenhang mit der zu beobachtenden Verringerung des Gesamtzons, sondern vor allem mit einem veränderten Freizeit- und Sozialverhalten großer Teile der Bevölkerung. Bis zur Auslösung eines Hautkrebses dauert es in der Regel 20 bis 30 Jahre, d.h. die in den 70'er und 80'er Jahren UV-induzierten Schädigungen vor allem durch deutlich längere Aufenthalte im Freien und vermehrte Urlaube in sonnenreichen Regionen zeigen sich jetzt an der ansteigenden Zahl von Hautkrebserkrankungen. Um das Risiko, an Hautkrebs zu erkranken, möglichst gering zu halten, ist ein vernünftiger Umgang mit der Sonne geboten. Dazu ist es notwendig, der Bevölkerung eine Einschätzung ihrer aktuellen und zukünftigen UV-Belastung zu ermöglichen.

Darüber hinaus ist bei einer Erhöhung der UV-Strahlung mit Schäden an terrestrischen und aquatischen Ökosystemen [3,4] zu rechnen. Während sich im Wasser lebende Organismen - bewegliche Algen, Wassertiere - durch ihre Beweglichkeit den Folgen erhöhter UV-Strahlung entziehen können, ist dies für ortsfeste Pflanzen nicht möglich. Daher ergeben sich jeweils spezifische Fragen, denen für höhere Pflanzen und terrestrische Ökosysteme nachgegangen werden muss.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat aus diesem Grund zusammen mit dem Umweltbundesamt (UBA) ein UV-Messnetz aufgebaut, das mittlerweile gemeinsam mit 5 weiteren assoziierten Institutionen kontinuierlich und spektral aufgelöst die UV-Strahlung mit qualitativ hochwertigen Geräten in Erdbodennähe misst [5,6]. Die Messdaten werden in diesem Bericht vor allem unter gesundheitlichem Aspekt bewertet und die Ergebnisse in übersichtlicher Form dargestellt. Zur Zeit liegen für eine ausführliche ökologische Bewertung solarer UV-Strahlung noch keine ausreichend genauen Bewertungskriterien vor.

2.2 Atmosphärische Einflussgrößen auf die UV-Strahlung

Die solare UV-Bestrahlungsstärke in Bodennähe hängt von mehreren Größen ab, die unterschiedlich stark auf die UV-Strahlung einwirken. Eine der wichtigsten Größen neben dem Sonnenstand ist das Gesamtzoon, d.h. die Ozonmenge, die die UV-Strahlung beim Durchgang durch die gesamte Atmosphäre beeinflusst [7]. Die Filterfunktion des Ozons ist für die solare UV-Strahlung stark wellenlängenabhängig. Mit kleiner werdender Wellenlänge unterhalb ca. 330 nm fällt deshalb die UV-Bestrahlungsstärke am Erdboden immer stärker ab. Im Bereich von 330 bis 300 nm beträgt dieser Abfall im Sommer einen Faktor von ca. 100, im Bereich 300 bis 290 nm einen Faktor von bereits 10.000. Man spricht daher auch von der sog. UV-B-

Kante (Abb. 1). Unterhalb von ca. 280-290 nm ist die UV-Bestrahlungsstärke selbst im Sommer in unseren Breitengraden mit $< 10^{-6}$ W/m²/nm nicht mehr nachweisbar. Demnach sind die Intensitäten bei den 2 typischen Wellenlängen von 330 nm (kein Ozoneinfluss) und 300 nm (max. Ozoneinfluss bei noch detektierbarem UV-Signal) wichtige Größen, deren Jahresverläufe ebenfalls dokumentiert werden.

Neben dem Gesamtzongehalt der Atmosphäre ist die Sonnenhöhe der wichtigste Parameter, der die bodennahe UV-Strahlung beeinflusst. Die Sonnenhöhe variiert mit der Tageszeit, der Jahreszeit und dem Breitengrad. In Deutschland erreicht die Sonne eine maximale Höhe von 58° im Norden und 65° im Süden, im Winter eine maximale Höhe von 12° bzw. 19°. Mit dem Sonnenstand ändert sich nicht nur die Intensität sondern auch die spektrale Zusammensetzung der UV-Strahlung. In Abb.1 ist deutlich zu erkennen, wie sich in Abhängigkeit vom Sonnenstand die Spektren im Bereich der sog. UV-B-Kante bis zu 5 nm verschieben. Darüber hinaus liegt der Intensitätsabfall im kurzwelligen Bereich um bis zu 3 Größenordnungen höher als im langwelligen Bereich.

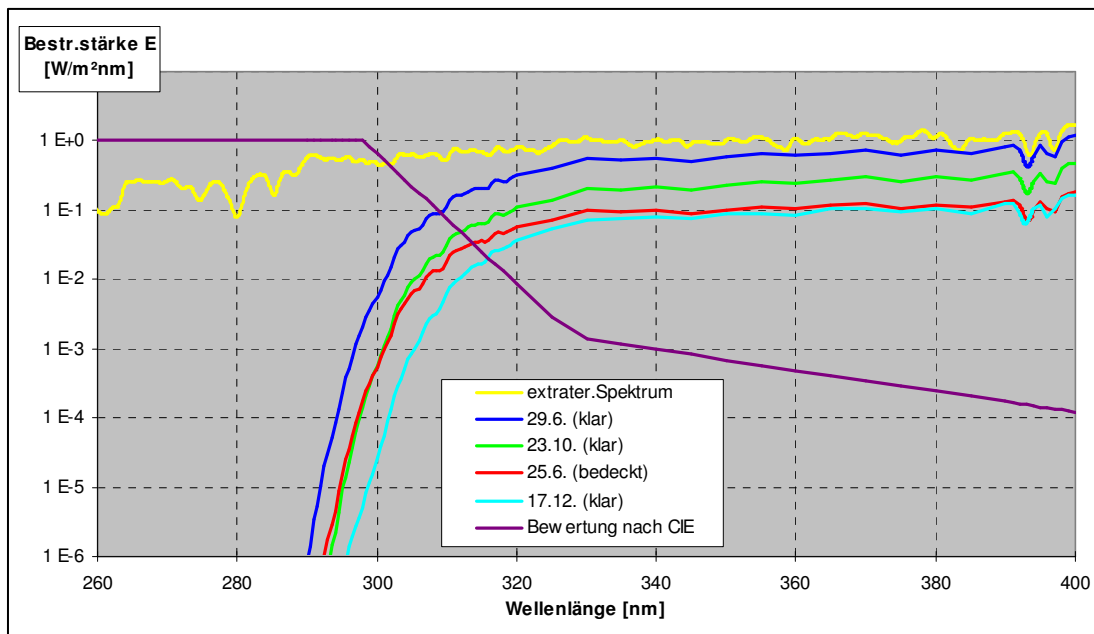


Abb.1: Einfluss von Ozon, Sonnenstand und Bewölkung auf die bodennahe UV-Strahlung. UV-Spektren bei klarem (29.6.) und stark bewölktem Himmel (25.6.) zum Jahressonnenhöchststand, bei klarem Himmel im Herbst (23.10.) und nahe am Jahressonnenniedrigststand (17.12.). Die Spektren wurden 1995 jeweils um 12:00 Uhr MEZ in Neuherberg gemessen (extrater. Spektrum = solares Spektrum außerhalb der Erdatmosphäre). Zusätzlich ist das Erythemwirkspektrum nach CIE aufgeführt.

Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre wird die extraterrestrische UV-Strahlung signifikant durch Wolken geschwächt. Die Intensitätsminderung wird in erster Linie durch Streuprozesse an Wassertropfen und/oder Eiskristallen hervorgerufen. Abbildung 1 zeigt für die Messstation Neuherberg den Einfluss der Bewölkung auf die UV-Strahlung im Sommer (25. und 29.Juni).

Da Wolken in Größe, Typ und Höhe über dem Erdboden stark variieren können, ist besonders bei teilweise bewölktem Himmel eine Angabe über die Schwächung der UV-Strahlung sehr schwierig. In diesem Punkt zeigen auch die existierenden Strahlungstransfermodelle ihre größten Unsicherheiten. In einigen Fällen kann die Abschwächung bis zu 90% betragen. Auf der anderen Seite kann durch zusätzliche

Rückreflexionen an Wolken in Richtung Boden die UV-Strahlung in Bodennähe um ca. 10% höhere Werte annehmen als an wolkenlosen Tagen [8].

Dunst, Spurengase, sowie Luftverunreinigungen in der Atmosphäre beeinflussen die Abschwächung der UV-Strahlung eher wenig. Der Einfluss der Bodenbeschaffenheit und damit zusätzlicher Rückreflexionen (Albedo) ist mit ca. 5% in der Regel eher gering. Höhere Werte von bis zu 20% treten bei sandigem Boden und insbesondere von bis zu 80% bei verschneiten Oberflächen auf [9]. Tritt die UV-Exposition im schneebedeckten Gebirge auf, so ist selbst im März bei noch relativ niedrigen Sonnenständen mit durchaus hohen UV-Belastungen zu rechnen.

Der derzeit beobachtete Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beeinflusst die UV-Strahlung in einem Spektralbereich, in dem die UV-Strahlungswerte sehr klein, die biologische Wirkung jedoch sehr groß ist (Abb.1). Deshalb haben auch kleine Änderungen des Ozongehaltes in der Stratosphäre ein durchaus ernst zu nehmendes Gefährdungspotenzial [10].

Hervorzuheben ist, dass die stärkste Abnahme im Gesamtozon mit bis zu 6% pro Dekade im Spätwinter/Frühjahr auftritt, also in einer Jahreszeit, in der das Gesamtozon normalerweise sehr hoch ist (Abb.2). Deutlich ist der Jahresgang des

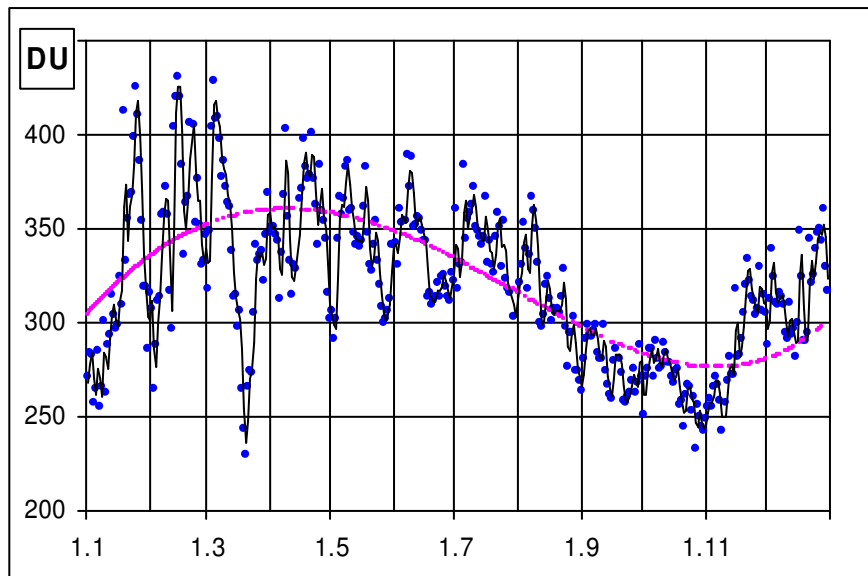


Abb.2: Jahresverlauf des mittleren Gesamtozongehaltes (rote Kurve) in DU (Dobson units) und die aus den Neuherberger UV-Messspektren ermittelten Gesamtozonwerte aus dem Jahr 2005

Gesamtozons mit einem Maximum im Frühjahr und einem Minimum im Herbst zu erkennen. Die Variabilität des Gesamtozongehaltes ist ebenfalls im Frühjahr am höchsten. In den letzten Jahren wurden zunehmend extrem niedrige Werte, so genannte „Mini-Holes“, gerade im Spätwinter/Frühjahr registriert. Ursache ist sowohl die Advektion ozonarmer Luft aus subtropischen als auch aus polaren Breiten, wenn der Polarwirbel sich im Frühjahr auflöst und aufgrund des FCKW-bedingten Ozonabbaus Luft mit geringem Ozongehalt in die gemäßigten Breiten transportiert wird [11,12].

2.3 Betrieb des UV-Messnetzes

Zur Entwicklung zuverlässiger Vorhersagen über Gesundheits- und Umweltkonsequenzen bzgl. Änderungen der UV-Exposition infolge anthropogener Änderungen der Erdatmosphäre hat das BfS zusammen mit dem UBA bereits 1993 mit der solaren UV-Messerfassung begonnen. Die 4 Messstationen befinden sich in Zingst (Ostseeküste), Langen (bei Frankfurt), Schauinsland (Bergstation Südschwarzwald) und Neuherberg (Peripherie München). München fungiert zusätzlich als Messnetzzentrale, die die Qualitätssicherung und Speicherung der Messdaten übernimmt [10]. Die Messstationen des BfS und UBA sind auf Abb.3a zu sehen.



Abb.3a: Die vier Messstationen des BfS und UBA mit Langen (oben links), Zingst (oben rechts), Schauinsland (unten links) und Neuherberg (unten rechts)

Im Laufe der Jahre haben sich 5 weitere auf diesem Gebiet tätige Institutionen unter dem Aspekt der Verbreiterung der Datenlage, Erhöhung der Qualitätssicherung und Teilung operativer Aufgaben mit dem BfS/UBA-Kernnetz zum bundesweiten UV-Monitoring zusammengeschlossen. Es sind die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) mit der Messstation in Westerland/Sylt, der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit der Messstation in Lindenberg/ Brandenburg, das Niedersächsische Landesamt für Ökologie (NLOE) mit der Messstation in Hannover, die Bundesanstalt für Arbeitsschutz (BAuA) mit der Messstation in Dortmund und mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) mit der Messstation in Kulmbach. Diese Stationen sind auf Abb.3b zu sehen.



Abb.3b Die 6 assoziierten Messstationen Norderney (oben links), Hannover (oben rechts), Westerland/Sylt (Mitte links) Dortmund (Mitte rechts), Lindenberg (unten links) und Kulmbach (unten rechts)

Bei der Auswahl der Messstandorte wurden neben der personellen und instrumentellen Infrastruktur der Institutionen insbesondere die in Deutschland vorhandenen Unterschiede in Breitengraden, Höhenlagen, im Klima und in der Lufttrübung berücksichtigt. Abb.4a zeigt die Standorte des UV-Messnetzes von BfS/UBA mit den assoziierten Stationen. Auf Basis einer ausführlichen Geräteevaluation [13,14] wurde für die Messungen ein Doppelmonochromator mit hohem Strahlungsdurchsatz (BENTHAM D150) und als Detektor ein stabiler Bialkali-Photomultiplier (EMI 9250QB) ausgewählt. An allen Standorten sind die empfindlichen Baugruppen der Messsysteme wie Monochromator und Elektronik in einem klimatisierten Laborraum untergebracht. Nur die robuste, weitgehend wetterbeständige Eingangsoptik befindet sich außerhalb des Gebäudes auf dem Dach und ist über ein 4 m langes Lichtwellenleiterbündel mit dem Monochromator verbunden (Abb.4b). Auf diese Weise kann das Messsystem unter nahezu konstanten Laborbedingungen arbeiten. Die Eingangsoptik ist horizontal ausgerichtet

und erfasst sowohl die direkte als auch die diffus gestreute Himmelsstrahlung (Globalstrahlung). Direkt um die Messstationen befindet sich nur niedriger Bewuchs und kein hohes Gebäude, so dass die jeweilige Umgebungsabschattung der Eingangsoptik unter 5° liegt. Zusätzlich wird die Gesamtglobalstrahlung (UV, VIS, IR) mit einem Pyranometer nach WMO-Standard (Hersteller: KIPP und ZONEN) in Abständen von 5 Sekunden erfasst.



Abb.4a: Solares UV-Messnetz in Deutschland

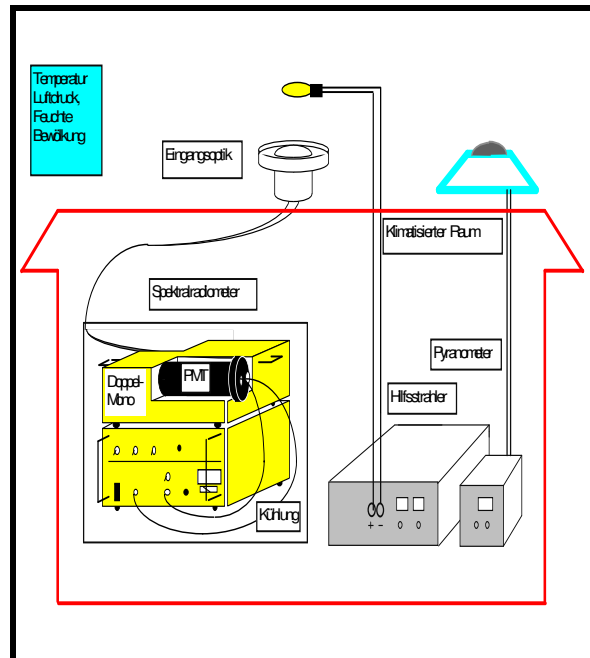


Abb.4b: Aufbau einer UV-Messstation

Zur Qualitätssicherung der aufgenommenen Messdaten wird jedes Messsystem in drei- bis sechsmonatlichen Abständen bezüglich Wellenlänge und Signalempfindlichkeit kalibriert. Darüber hinaus werden laufend die Wellenlängenkonstanz und täglich die Signalempfindlichkeit der Geräte überprüft. Dazu wird einerseits in jedem Spektrum die Fraunhoferlinie bei 393,36 nm hoch aufgelöst erfasst, andererseits - zumindest bei den BfS/UBA-Stationen jede Nacht die optische Intensität eines Hilfsstrahlers gemessen, der über die Eingangsoptik geschwenkt wird. Um den technisch hochwertigen Standard der Messsysteme dauerhaft zu erhalten, werden in der Messnetzzentrale die Messkomponenten und die Software laufend geprüft und entsprechend dem technischen Standard verbessert. Dazu steht ein komplett eingerichtetes UV-Kalibrierlabor zur Verfügung. Durch zunehmende Automatisierung in der Messerfassung und im Datenmanagement konnte mittlerweile der personelle Aufwand deutlich reduziert werden. Eine weitere Qualitätssicherungsmaßnahme ist der Vergleich der Messdaten mit Modellwerten. Bei Messdatenaufnahme in die Datenbank jede Nacht werden automatisiert alle abgerufenen Messwerte mit Modellwerten des Strahlungstransferprogramms STARneuro [15] verglichen.

Entsprechend Kapitel 2.2 wurde für eine hinreichend genaue Erfassung der bodennahen solaren UV-Strahlung das im folgenden beschriebene Messraster verwendet. Die solare UV-Strahlung wird in einem Wellenlängenbereich von 290 bis 450 nm gemessen (s. Abb.1), d.h. sowohl im UV-B-Bereich (280-320nm) als auch im UV-A-Bereich (320-400nm). Die Bestrahlungsstärke kürzerer Wellenlängen ist in unseren Breitengraden so gering, dass sie mit den derzeit zur Verfügung stehenden Messsystemen nicht mehr messbar ist. Im kurzwelligen Wellenlängenbereich wird in

Abständen von 0,5 nm gemessen, um die steile „UV-B-Kante“ ausreichend genau zu erfassen. Im längerwelligen Bereich genügen Schrittweiten von 5 nm. Die Bandbreite des Spektralradiometers beträgt 1,0 nm.

Kurzzeitige Veränderungen der UV-Strahlung, z.B. an wechselhaft bewölkten Tagen können aufgrund der geringen Zeitintervalle zwischen 2 aufeinander folgenden Messungen (6 Minuten) noch ausreichend erfasst werden. Die Messzeit für die Akquisition eines Spektrums beträgt ca. 60 bis 90 Sekunden.

Ein tagsüber von der Messzentrale abgerufener Datensatz (ca. 1 kByte) enthält die für eine aktuelle Berichterstattung (UV-Index) benötigten erythemgewichteten Strahlungswerte. Der daraus berechnete UV-Index wird zusammen mit einer Bewölkungsprognose basierend auf Daten des Deutschen Wetterdienstes via Internet der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Der komplette Datensatz eines Tages (ca. 250 kByte) mit allen Zusatzdaten wird jeden Abend nach Beendigung der Messungen von der Messnetzzentrale abgerufen, dort qualitätsgesichert und gespeichert.

2.4 Gesundheitliche Bewertung der UV-Strahlung und Erythemdosis

Das Ausmaß der UV-induzierten biologischen Effekte wird einerseits durch die Intensität, die Dauer und die spektrale Zusammensetzung der UV-Strahlung, andererseits durch die individuelle Konstitution bestimmt. Für eine gesundheitliche bzw. ökologische Bewertung der solaren UV-Strahlung sind daher zwei Schritte erforderlich. Zunächst muss ermittelt werden, welche biologischen Folgeerscheinungen mit der UV-Bestrahlung in kausalem Zusammenhang stehen. In einem zweiten Schritt können dann deren Risiken für eine Gefährdung quantitativ abgeschätzt werden [16,17,18].

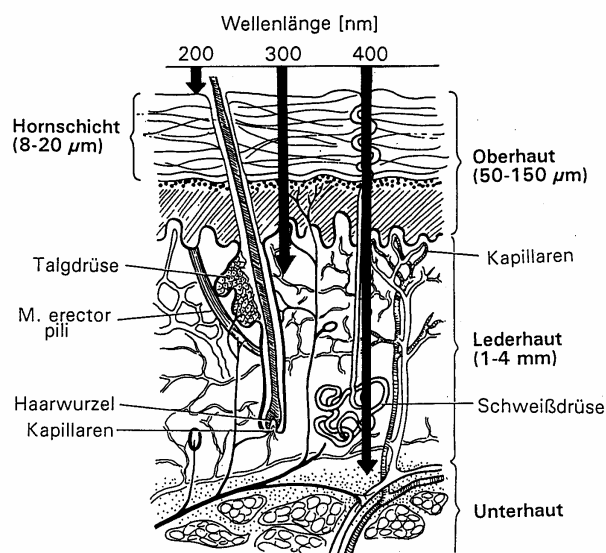


Abb.5: spektrales UV-Eindringvermögen an der Hautoberfläche. Grafik aus Bundesgesundheitsblatt Sonderheft „UV-Strahlung und Gesundheit“, 37.Jahrgang (1994).

Aufgrund der geringen Eindringtiefe ultravioletter Strahlung beschränken sich biologische Effekte beim Menschen auf die Organe Auge und Haut (Abb.5)..

Obwohl die Haut über langfristig wirkende Schutzmechanismen verfügt, wie die effektive Hornschichtverdickung ("Lichtschwiele") und Pigmentierung ("Hautbräunung"), kann kurzwellige solare UV-Strahlung ausreichender Intensität eine akute entzündliche Hautrötung hervorrufen [21,22]. Die erforderliche Bestrahlung zum Erreichen einer Hautrötung (Erythem) wird als minimale erythemwirksame Dosis (MED) bezeichnet und beträgt etwa 250 J/m² für den empfindlichen Hauttyp II. Der längerwellige solare UV - Anteil initiiert vorwiegend phototoxische und photoallergische Prozesse, die über körpereigene oder -fremde Stoffe die Strahlenempfindlichkeit der Haut erhöhen. Auch bezüglich chronischer Effekte ist vorwiegend der kurzwellige UV-Anteil für die frühzeitige Hautalterung [23] und die Bildung von Hautkrebs verantwortlich. Bei den

gene oder -fremde Stoffe die Strahlenempfindlichkeit der Haut erhöhen. Auch bezüglich chronischer Effekte ist vorwiegend der kurzwellige UV-Anteil für die frühzeitige Hautalterung [23] und die Bildung von Hautkrebs verantwortlich. Bei den

häufig auftretenden Basaliomen und Spinaliomen konnte ein direkter Zusammenhang zwischen UV-Bestrahlung und Hautkrebsinzidenz beobachtet werden. Beim malignen Melanom ist die Situation nicht so eindeutig [24].

Nach der Abklärung, welche der o. a. biologischen Folgeerscheinungen mit der UV-Bestrahlung in kausalem Zusammenhang stehen, geht es jetzt darum, deren Risiken für die gesundheitliche Gefährdung quantitativ abzuschätzen. Dazu müssen Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die einzelnen UV-induzierten biologischen Wirkungen bestimmt werden [25].

Die Wirkungen der UV-Strahlung zeigen eine sehr starke Wellenlängenabhängigkeit mit hoher Wirksamkeit im kurzwelligen UV-Bereich bis ca. 300 nm und deutlich geringerer bei längeren Wellenlängen. Aus diesem Grund muss die jeweilige biologische Wirksamkeit für jede einzelne Wellenlänge ermittelt werden. Auf diese Weise erhält man ein biologisches Wirkungsspektrum im entsprechenden Wellenlängenbereich. Es wird auf die Wellenlänge maximaler Wirksamkeit normiert (=1). Nach Verknüpfung mit der physikalisch gemessenen spektralen UV-Bestrahlungsstärke erhält man die biologisch wirksame spektrale UV-Bestrahlungsstärke für die jeweilige biologische Wirkung (s.Abb1). Allerdings sind bei dieser Vorgehensweise zu erwartende synergistische Effekte nicht berücksichtigt.

Nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand haben die Wirkungsspektren für das Erythem, für die frühzeitige Hautalterung und für die Hautkrebsentstehung einen ähnlichen Verlauf. Demzufolge kann der Sonnenbrand als kurzzeitig verzögerte biologische Antwort auf zu starke UV-Bestrahlung als ein geeigneter Indikator für eine gesundheitliche UV-Bewertung herangezogen werden.

Für die Bewertung ist entscheidend, in welchem Zeitraum die UV-Strahlung auf den Menschen einwirkt, d.h., welcher UV-Dosis sich der Mensch aussetzt. Daher wird aus den physikalisch gemessenen UV-Daten abgeleitet, welche "sonnenbrandwirksame" UV-Dosis in jeweils einem bestimmten Zeitraum auf den Erdboden einstrahlt.

Neben der Tagesdosis werden in diesem Bericht vor allem dosiswerte über ½ Stunde, korrespondierend mit der Bestimmung des UV-Index (s. Kapitel 2.7) dargestellt. Für die Ermittlung dieser erythemwirksamen Halbstunden-UV-Dosiswerte, im weiteren hED genannt, werden die an einem Tag aufgenommenen Spektren zunächst mit der Erythem-Wirkungsfunktion (CIE) gewichtet und über den Wellenlängenbereich von 290 bis 400 nm integriert [26]. Dies ergibt die zu der jeweiligen Messzeit resultierende "sonnenbrandwirksame" UV-Bestrahlungsstärke E_{ery} . Durch Multiplikation mit dem Messzeitintervall von 6 Minuten erhält man daraus die "sonnenbrandwirksamen" 6-min-UV-Dosiswerte. Eine Zusammenfassung von 5 dieser Werten über einem Zeitraum von 30 Minuten ergibt die obigen aufgeführten hED-Werte in der Einheit $[J/m^2/30 \text{ min}]$.

Neben dem bereits erwähnten Wellenlängenmonitoring bei 300 nm und 330 nm ist die zusätzliche Beobachtung bei 310 nm bedeutend, da bei dieser Wellenlänge die erythemwirksame spektrale Bestrahlungsstärke am höchsten ist.

2.5 Ökologische Bewertung

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass viele Reaktionen der höheren Pflanzen, wie z.B. photosynthetische CO_2 -Assimilation, Wuchsform und Ernteertrag durch kurzwellige UV-Strahlung beeinflusst werden können. Aber auch Phytoplankton und das Mikroalgen fressende Zooplankton kann prinzipiell gefährdet sein, da zumindest in den Sommermonaten in der Nähe der Wasseroberfläche letal wirkende UV-Dosiswerte auftreten können.

Für eine Bewertung, die sich das UBA bei Einrichtung des gemeinsamen UV-Monitoring als Aufgabe stellte, muss demnach abgeklärt werden, welche pflanzlichen bzw. tierischen Reaktionen durch UV-Strahlung beeinflusst werden und ob es zwischen verschiedenen Pflanzenarten bzw. Mikroorganismen Unterschiede in der Empfindlichkeit gegenüber der UV-Strahlung gibt. Weiterhin gilt es zu ermitteln, ob Schutzmechanismen existieren, welcher Art diese sind und ob diese ausreichen, um eine Schädigung durch erhöhte UV-Strahlung zu vermeiden.

Abb.6 zeigt in logarithmischer Darstellung das Wirkungsspektrum nach Caldwell aus der Literatur [27]. Das generalisierte Pflanzenwirkungsspektrum nach Caldwell (1971) stellt eine Synthese aus verschiedenen experimentellen Daten dar, die meist auf monochromatischer UV-Strahlung beruhen.

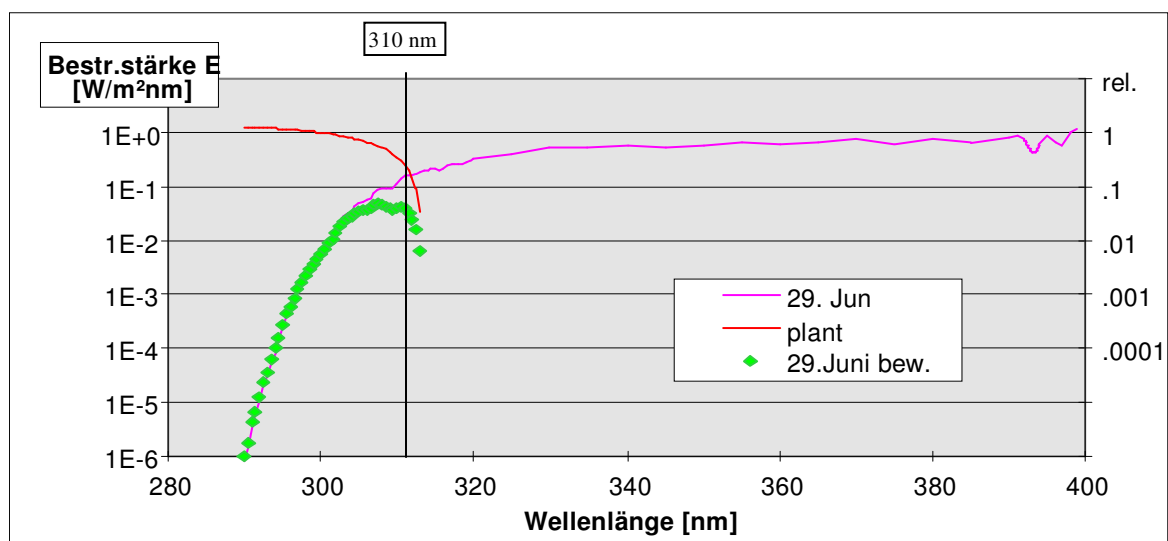


Abb.6: ungewichtetes gemessenes solares UV-Spektrum um 12 Uhr MEZ (29. Juni), Pflanzen-Wirkungsfunktion nach Caldwell (plant) und das mit der Pflanzen-Wirkungsfunktion gewichtete solares UV-Messspektrum (29. Juni bew.)

2.6 Exemplarischer Tagesverlauf der UV-Strahlung

Anhand eines einzelnen Messspektrums wurden bisher die atmosphärischen Einflüsse und die verschiedenen biologischen Bewertungen auf das Messergebnis dargestellt. Am Beispiel der Messstation Neuherberg werden im folgenden Abschnitt die abgeleiteten Messgrößen nicht mehr als Momentaufnahme, sondern als zeitlicher Verlauf über einen ganzen Tag gezeigt. Als Tag wurde wiederum der 29. Juni 1995 gewählt. In Abb.7 werden die Größen dargestellt, die im weiteren Verlauf des Jahresberichtes von Wichtigkeit sind. Besondere Bedeutung kommen den Werten zum Zeitpunkt 11 Uhr UTC zu. UTC ist die Abkürzung für 'universal time coordinated' und entspricht der Greenwich-Zeit. Um 11 Uhr UTC ist in Neuherberg

nahezu Sonnenhöchststand erreicht. Für die Umrechnung gilt:

$$\text{MEZ (Mittleuropäische Zeit)} = \text{UTC} + 1 \text{ Stunde}$$

Abbildung 7 zeigt links oben zunächst den Tagesverlauf der ungewichteten Intensitäten für die 3 Wellenlängen 300 nm, 310 nm und 330 nm. Wie den bereits dargestellten Spektren zu entnehmen ist, ist die Intensität für die kürzeste Wellenlänge kleiner als diejenige für 310 nm und erst recht im Vergleich zu der für 330 nm. Die Variation über den Tag ist allerdings bei 300 nm mit einem Faktor von ca. 1000 deutlich höher als bei 310 nm mit einem Faktor von 100 und bei 330 nm mit einem Faktor von ca. 10. Dies ist insofern von besonderer Bedeutung, weil bei kürzeren Wellenlängen die biologische Wirksamkeit deutlich höher ist als bei längeren Wellenlängen. Das Integral über alle Wellenlängen von 290 bis 400 nm ergibt die UV-Gesamtstrahlung. Der Kurvenverlauf der UV-Gesamtstrahlung ist mit der höchsten zeitlichen Abtastrate von jeweils 6 Minuten in Abb.7 rechts oben

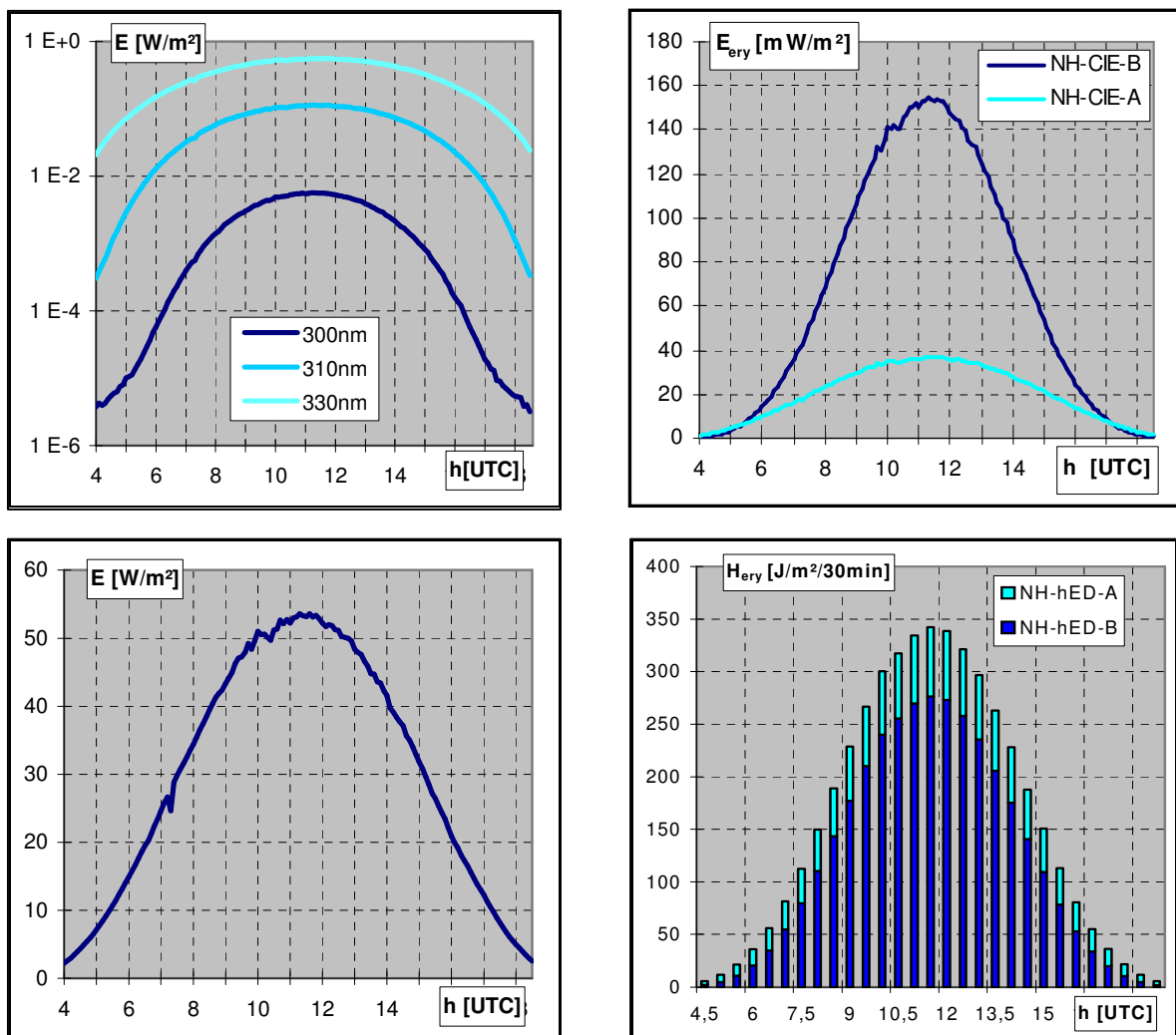


Abb.7: Tagesverlauf spektraler UV-Messdaten in Neuherberg vom 29.6.1995. **(oben links):** der Wellenlängen 300nm, 310nm und 330nm. **(unten links):** der ungewichteten UV-Gesamtstrahlung von 290-400nm, **(oben rechts):** der erythemgewichteten UV-B (NH-CIE-B) und UV-A (NH-CIE-A) Strahlungsanteile und **(unten rechts):** der erythemgewichteten Halbstunden-Dosiswerte für den UV-B (NH-hED-B) und UV-A-Anteil (NH-hED-A).

dargestellt. Entsprechend des sonnigen Wetters ist ein ausgeprägter glockenförmiger Tagesverlauf zu erkennen mit einem Spitzenwert zum Sonnenhöchststand von ca. 55 W/m². Im Vergleich zur gesamten, die Erdoberfläche erreichenden solaren Strahlung mit 1120 W/m² (senkrechter Sonnenstand, klarer Himmel) beträgt der reine UV-Anteil nur ca. 5%. Abbildung 7 rechts oben zeigt die erythemgewichtete UV-Strahlung.

Abbildung 7 rechts unten zeigt schließlich den Tagesgang der erythemgewichteten UV-Strahlung in Form von Säulendiagrammen. Dabei sind jeweils 5 Messwerte pro ½ Stunde zu einem erythemgewichteten Halbstunden-Dosiswert (hED) zusammengefasst. Die Gesamtsäule setzt sich hier aus dem jeweiligen erythemgewichteten UV-B-Anteil (dunkelblau) und dem erythemgewichteten UV-A-Anteil (hellblau) zusammen. Ebenfalls in dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass mit höheren Sonnenständen ein zunehmend höherer UV-B-Anteil und damit ein höherer Anteil biologisch hochwirksamer UV-Strahlung den Erdboden erreicht. Durch die zeitliche Integration über 30 Minuten ist der glockenförmige Tagesverlauf noch ausreichend genau dokumentierbar.

Neben der um fast einen Faktor von 1000 unterschiedlichen Größenordnung gewichteter und ungewichteter UV-Strahlungsintensitäten zeigt sich darüber hinaus in Abb.7 rechts unten, dass das Verhältnis von UV-B-Anteil und UV-A-Anteil über den Tag hinweg einer starken Änderung unterworfen ist.

2.7 UV-Index

Für eine Abschätzung des gesundheitlichen Risikos solarer UV-Strahlung ist die Kenntnis der Expositionswerte notwendig. Für die Unterrichtung der Öffentlichkeit wurde dazu in den 90er Jahren in verschiedenen Ländern ein UV-Index eingeführt, in Deutschland vom DWD und dem BfS unter Berücksichtigung der Empfehlungen der SSK [21]. Der UVI ist zwischenzeitlich in mehreren Expertensitzungen von WMO, WHO und ICNIRP harmonisiert worden [28, 29]. Der globale solare UV Index (Global solar UV Index) ist eine auf eine horizontale Empfangsfläche bezogene Messgröße. Er ist definiert als maximale tägliche erythemwirksame Bestrahlungsstärke in



$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda$$

Bodennähe über eine zeitliche Dauer von 10 bis 30 min. Als dimensionslose Größe kann er nach folgender Formel bestimmt werden: mit E_{λ} als solare spektrale Gesamtbestrahlungsstärke in der Dimension [W·/m²/nm] bei der Wellenlänge λ , $d\lambda$ ist das im Integral definierte Wellenlängenintervall, $s_{er}(\lambda)$ ist die spektrale Wirkungsfunktion für das Erythem nach CIE [26] und k_{er} eine Konstante mit dem Wert 40 und der Dimension [m²/W]. Durch den konstanten Faktor 40 erhält der UV-Index einen Wertebereich, der zwischen Null als (winterlichem) Minimum und etwa 15 als mittlerem Jahresmaximum in tropischen Breiten variiert.

Die in vielen Ländern gebräuchliche Angabe von Zeiten bis zum Erreichen eines Sonnenbrandes werden von Strahlenschützern kontrovers diskutiert. Einerseits erscheinen sie ein einfaches Konzept zu sein, das von der Bevölkerung direkt in eine Verhaltensmaßnahme umgesetzt werden kann. Auf der anderen Seite können konkrete Zeitangaben von der Öffentlichkeit so interpretiert werden, dass es einen sicheren Wert gibt, bis zu dem Sonnenbestrahlung sicher ist. Der dimensionslose UVI soll nicht implizieren, dass ausgedehntes Besonnen akzeptabel ist, sondern aufzeigen, dass kumulative UV - Exposition auch die Hautkrebsentwicklung fördert.

UVI	Klassifikation	Zeit zum Erreichen eines Erythem	Schutz	Schutzmaßnahmen
>10	extrem	< 15 min	extra Schutz	mittags im Innenraum, unbedingt Hemd, Sonnenlotion und Hut
8,9,10	sehr hoch	< 20 min	extra Schutz	mittags im Innenraum, unbedingt Hemd, Sonnenlotion und Hut
6,7	hoch	ab 20 min	erforderlich	mittags Schatten, Hemd, Sonnenlotion, Hut
3,4,5	moderat	ab 30 min	erforderlich	mittags Schatten, Hemd, Sonnenlotion, Hut
1,2	niedrig	ab 30 min	nicht erforderlich	

Tab. 1 Empfohlenes UVI - Schutzschema von der WHO/WMO/ICNIRP/SSK mit Angaben über Zeiten zum Erreichen eines Erythems (Hauttyp II)

In der Tabelle 1 sind die UVI - Schutzschemata aufgeführt, die seit kurzem von der WHO, WMO und ICNIRP als Konsensus veröffentlicht worden sind [30]. Die Ermittlung des UVI kann durch Modellberechnungen oder Messungen erfolgen.

2.8 UVI Berichterstattung und Prognose

Die deutliche Zunahme an Hautkrebs-Neuerkrankungen in der Bevölkerung wird, wie bereits erwähnt, vor allem auf übermäßige UV-Exposition infolge eines veränderten Freizeitverhaltens zurückgeführt. Um einem weiteren Anstieg UV-bedingter Erkrankungen entgegenzuwirken, ist es erklärtes Ziel, die Bevölkerung über die Risiken der solaren UV-Strahlung auch mit Hilfe einer UVI-Prognose zu unterrichten. Zur Dokumentation der eingetretenen Belastung werden aktuelle Messergebnisse zusätzlich übermittelt. Als Maß wird der international abgestimmte UV-Index verwendet.

Aus gesundheitlichen und meteorologischen Gründen empfiehlt die SSK [31], wegen großer biologischer Schwankungsbreiten nur ganzzahlige UV-Werte anzugeben, den Vorhersagebereich auf 3 Regionen in Nord-Süd-Richtung und 2 Regionen in Ost-West-Richtung und auf Zeiten starker UV-Bestrahlung (Mai - September) zu beschränken. Demzufolge veröffentlicht das BfS von April bis September jeweils am Montag, Mittwoch und Freitag 3-Tages-UV-Index-Prognosen für Nord-, Mittel- und Süddeutschland (Abb.8, links).

Die manuell erstellte Prognose basiert im Gegensatz zur modellgestützten DWD - Prognose auf einer statistischen Auswertung der bisherigen UV-Messungen nebst dem dazugehörigen Wettergeschehen [28]. Bei Kenntnis des zukünftigen Wettergeschehens wird dann der entsprechende UVI - Wert für die Prognose verwendet. Die Wettervorhersage für die 3 Vorhersagegebiete wird auf Basis der vom DWD zur Verfügung gestellten Wetterdaten im BfS vorgenommen.

Die grafisch aufbereiteten 3- Tagesprognosen werden via Internet verbreitet. In den Wintermonaten Oktober bis März werden 3-Monats-UV-Index-Prognosen

veröffentlicht. Für klaren Himmel werden die entsprechenden maximalen UVI Werte eines Monats angegeben.

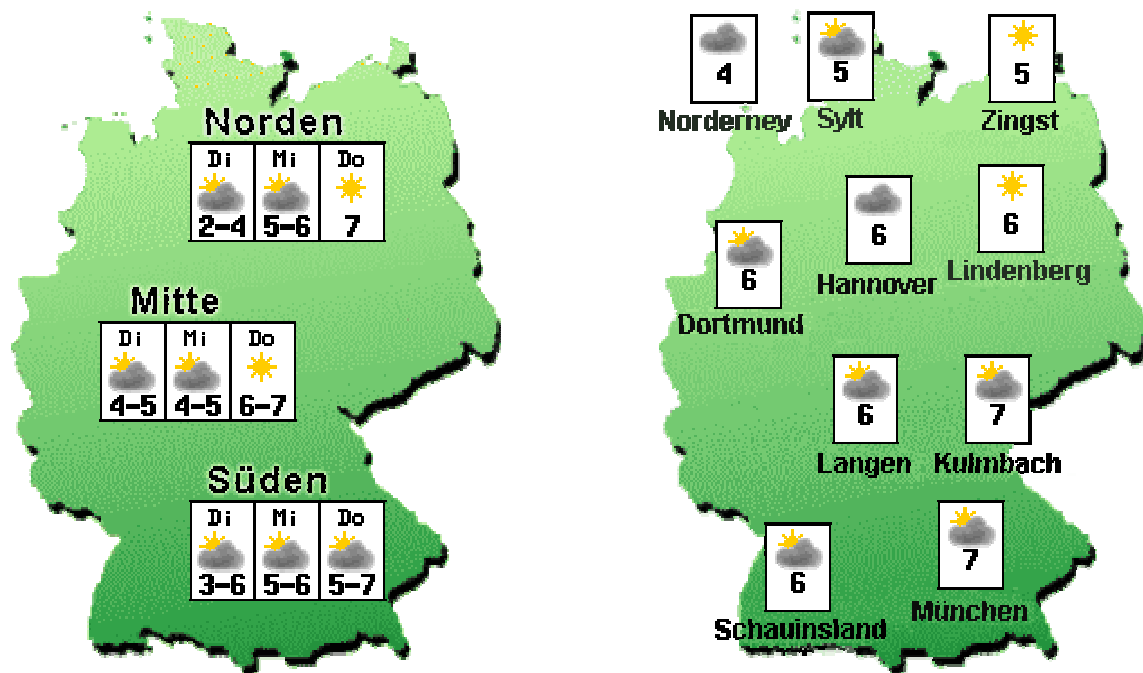


Abb.8 (links): Grafische Darstellung der 3-Tages-UVI-Prognose, **(rechts):** grafische Darstellung der aktuellen UVI - Messwerte an den einzelnen Stationen,

Im Internet werden neben der UV-Vorhersage täglich auch komplett automatisiert die aktuell gemessenen UV-Indizes von allen 9 Stationen zusammen mit einem geeigneten Symbol für das jeweilige Wettergeschehen dargestellt (Abb.8, rechts). Neben der Dokumentation über die tatsächliche UV-Belastung kann bei gleich bleibenden Wetterverhältnissen für den nächsten Tag der gemessene UV-Index-Wert für die entsprechende Region fortgeschrieben werden.

In Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Umweltschutz Bayern (LfU) und dem Bayerischen Rundfunk (BR) wird für den gleichen Zeitraum eine regionale Prognose für Nord- und Südbayern im Videotext des 3. Fernsehprogramms des BR veröffentlicht zusammen mit einer aktuellen regionalen Berichterstattung und Schutzempfehlungen.

Neben den Prognosen wird zusätzlich über Hauttypen und Schutzmaßnahmen zur Vermeidung eines Sonnenbrandes informiert, wie z.B. Gebrauch von Sonnenschutzmitteln, Verhalten im Wasser und Schutzwirkung von Kleidung. Da Urlaube in die sonnigen Regionen der Erde ständig zunehmen, können Fernreisende darüber hinaus maximal mögliche UVI – Werte in über 25 Regionen weltweit abrufen.

3. Messwerte

Auf den folgenden Seiten werden die bisher gemeinsam verfügbaren Messwerte aller 9 Messstationen des UV-Messnetzes dargestellt. Von Norden nach Süden sind dies Westerland/Sylt (WS), Zingst(ZI), Rinteln (HR), Lindenberg in Brandenburg (BL), Dortmund (DO), Langen (LG), Kulmbach (KU), München-Neuherberg (NH) und Schauinsland (SL). Bis zum Jahr 2002 befand sich die Station Langen in Offenbach (OF), bis zum Jahr 2003 die Station Lindenberg in Potsdam (BP), bis zum Jahr 2008 die Station Rinteln in Hannover (HR). Als Messgrößen werden neben ungewichteten spektralen Bestrahlungsstärken hauptsächlich erythemgewichtete 30 min-Dosiswerte hED, Tagessummenwerte und UV-Indexwerte verwendet.

3.1 Unbewertete Messergebnisse

Abbildung 9 (s. Anhang) zeigt die ungewichteten spektralen Bestrahlungsstärken E_λ für die Wellenlängen $\lambda = 300$ nm, 310 nm und 330 nm von allen nach geographischer Breite angeordneten 9 Stationen. Die Werte sind jeweils um 11 Uhr UTC eines Tages erfasst worden. UTC ist die Abkürzung für 'universal time coordinated' und entspricht der Greenwich-Zeit. Um 11 Uhr UTC ist in Neuherberg nahezu Sonnenhöchststand erreicht. Sowohl im Tagesverlauf (Abb.7a) als auch im Jahresverlauf (Abb. 9 a-c) ist die Wellenlängenabhängigkeit der Messwerte deutlich zu erkennen. Im kurzwelligen, biologisch hochwirksamen Bereich sind die Unterschiede in den spektralen Bestrahlungsstärken bezogen auf den geografischen Standort deutlich größer als im längerwelligen Bereich. In Zingst werden um den Jahressonnenhöchststand bei 300 nm Messwerte generell von $0,0045 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ erreicht, in Neuherberg von $0,0065 \text{ W/m}^2/\text{nm}$. Im Bereich der nicht mehr ozonbeeinflussten Wellenlänge von 330 nm liegen zum Jahressonnenhöchststand die Messwerte in Zingst generell bei $0,50 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ und in Neuherberg bei $0,70 \text{ W/m}^2/\text{nm}$.

Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Variationsbreite über das Jahr bei kürzeren Wellenlängen um bis zu 3 Größenordnungen höher ist als bei längeren Wellenlängen. Ursache dafür ist, dass mit niedrigeren Sonnenständen der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre länger wird und damit die von der Wellenlänge abhängige Absorption und die Anzahl der Streuprozesse zunehmen. Dies führt zu einer überproportionalen Schwächung der kürzerwelligen Strahlung..

Die leicht erhöhte Streubreite der Messungen bei der Wellenlänge 300 nm in den ersten und letzten Monaten des Jahres ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass diese Werte im Bereich der Nachweisgrenze der Messsysteme liegen ($10 \mu\text{W/m}^2$) und demzufolge das Signal-Rauschverhältnis gering ist. Der Anstieg der Messwerte gegen Ende des Jahres gerade bei der Wellenlänge 300 nm ist auf den wieder ansteigenden Sonnenstand nach dem 21. Dezember zurückzuführen.

Die oben bei unterschiedlichen Wellenlängen beobachtete Variationsbreite der spektralen Bestrahlungsstärken kann nur erfasst werden, da für das solare UV-Monitoring die relativ aufwendige Methode der spektral aufgelösten Messung eingesetzt wird.

Integration der ungewichteten Spektren eines Tages über die Wellenlängenbereiche 290 – 315 nm und 315-400 nm und nachfolgende Multiplikation über den Tagesmesszeitraum (ca. $\frac{1}{2}$ h nach Sonnenaufgang bis $\frac{1}{2}$ h vor Sonnenuntergang) ergeben die ungewichtete UV-B- und UVA-Tagesdosis in der physikalischen Einheit kW/m^2 . In Tabelle 1 (s. Anhang Tab1) sind die Monatsmittelwerte der UV-B- und UV-A-Tagesdosiswerte aufgelistet. Ergänzt werden sie durch die mit einem zusätzlichen Pyranometer erfassten Monatsmittelwerte der Globalstrahlung. Liegen für weniger als 20 Tage pro Monat Messwerte vor, entfällt die Mittelung.

3.2 Gesundheitlich bewertete Messergebnisse

Wie in Kapitel 2.5 ausgeführt, ist das Erythem für die gesundheitliche Bewertung von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund werden für die weitere Darstellung der Ergebnisse ausschließlich erythemwirksame Größen verwendet und zwar die erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{ery} , der UV-Index UVI und die erythemwirksame Bestrahlung bzw. erythemwirksame Dosis H_{ery} . Die Abb. 10 a-i (s. Anhang) zeigen die täglichen erythemwirksamen Bestrahlungsstärken aller 9 Messstationen für den Sonnenhöchststand (11 Uhr UTC). Die Abbildungen zeigen einen ähnlichen Verlauf wie der Tagesverlauf der erythemwirksamen Strahlung (Abb.7b). Das liegt daran, dass die erythemgewichtete UV-Strahlung in Erdbodennähe bei konstanten Bedingungen (Ozon, Aerosol, Wolken) nur von der Sonnenhöhe abhängt. Das zeigt sich vor allem durch den Vergleich der Einstrahlung zur Sommer- und Winterzeit. Während in Neuherberg im Sommer Werte von über 200 mW/m² auftreten können, liegen diese im Winter nur bei 20 mW/m². Aber auch der Einfluss des Breitengrades ist deutlich in den Messwerten zu erkennen. Im Vergleich zum Norden (Zingst), wo die erythemwirksame Bestrahlungsstärke Werte von ca.160 mW/m² erreicht, sind die Werte im Süden Deutschlands um das ca. 1,3fache höher.

Entsprechend des ausgeprägten Jahresganges des Gesamtzongehaltes (Abb.2) werden an allen Stationen im Herbst bei gleichen Sonnenständen und Witterungsverhältnissen höhere UV-Werte erwartet als im Frühjahr. Ein Vergleich zwischen dem 90. Tag und 254. Tag zeigt in der Regel ein Verhältnis der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke von ca. 1:1,3 bei einem entsprechenden Gesamtzonzonverhältnis von ca. 1,2:1.

An den einzelnen Stationen wurden weiterhin zeitlich begrenzt hohe UV-Werte beobachtet, vor allem im Frühjahr und Frühsommer. Die aufgetretenen Spitzen sind vor allem auf einen kurzzeitig sehr geringen Gesamtzongehalt in der Atmosphäre und einer damit verbundenen höheren UV-Durchlässigkeit zurückzuführen.

Tagesmaxima der UV-Bestrahlungsstärke treten nicht zwangsläufig bei Sonnenhöchststand auf. Wetteränderungen um die Mittagszeit, die die UV-Transmission der Atmosphäre beeinflussen, können zu einer zeitlichen Verschiebung der UV-Tagesmaxima vor bzw. nach 11 Uhr UTC führen. Die maximale erythemgewichtete Bestrahlungsstärke an einem Tag wird üblicherweise durch die Größe UV-Index erfasst. In Tabelle 2 (s. Anhang) sind die Bestrahlungsmaxima des Jahres als UVI mit der entsprechenden erythemgewichteten Bestrahlungsstärke E_{ery} und der 30 min-Bestrahlungsdosis hED aufgelistet. Eine Korrespondenz zwischen UVI und hED ergibt sich über den Zeitraum von 30 min (1 UVI entspricht 45 J/m²). Hinzugefügt sind die minimale Zeit zum Erreichen eines Erythems und die erythemwirksame Tagesdosis.

Neben den höchsten erythemgewichteten Bestrahlungsstärken des Jahres, die erwartungsgemäß im Sommer im Süden Deutschlands auftreten, sind unter dem gesundheitlichen Aspekt besonders ausgeprägte UV-Strahlungsperioden von Bedeutung. Dabei sind vor allem die Zeiten von Interesse, in denen die erythemwirksame UV-Strahlung den Wert 250 J/m²/30 min erreicht bzw. überschritten hat. Dies entspricht einem UVI von 6 und wird als hohe UV-Belastung klassifiziert..

Tabelle 3 (s. Anhang) zeigt die Jahreszeiträume für alle Stationen, innerhalb derer an den Stationen der hED - Wert von 250 J/m² (entsprechend einem UVI von 6) und höher erstmalig bzw. letztmalig im Jahr gemessen worden ist. Zum Vergleich sind nach dem STARneuro – Modell bei wolkenfreiem Himmel und mit gemittelten Gesamtzonzonwerten modellierte UVI-Werte mit aufgeführt. Zusätzlich ist die Anzahl der hED -Werte über 250 J/m² pro Jahr aufgelistet zusammen mit der Anzahl von Tagen, an denen die Messsysteme in diesem Zeitraum

nicht messen konnten.

Abbildungen 11a-i (s. Anhang) zeigen die jährlichen UV-Belastungen in Form von Farbflächendiagrammen. Die Farbflächendiagramme sind eine Erweiterung der zuvor gezeigten Jahresverläufe. Es wird hier über einen einzigen Wert zu einem bestimmten Zeitpunkt des Tages hinaus der Jahresverlauf aller Tageswerte gezeigt. Als Einheit wurde der erythemwirksame 30-Min-Dosiswert gewählt. Entsprechend der Umrechnung $1 \text{ UVI} = 45 \text{ J/m}^2$ kann aus den Abb. 4a bis 4i ebenfalls die aufgetretene Intensität jeder $\frac{1}{2}$ Stunde ermittelt werden. Durch die dosisabhängige Farbmarkierung kann die Variation der UV-Dosis über den Tag und das Jahr quantitativ gut verfolgt werden. Da für eine gesundheitliche Bewertung der Messdaten die UV-Bestrahlung oberhalb von 250 J/m^2 (UVI von 6) von besonderer Wichtigkeit ist, wurden diese Werte mit roter Farbe gekennzeichnet.

Die Farbflächendiagramme bestätigen die o. a. Analysen der Jahresverläufe der erythemwirksamen Bestrahlungsstärken in Abb. 10a-i. Sie zeigen darüber hinaus in anschaulicher Weise, in welchen Zeiträumen des Tages und des Jahres welche UV-Dosiswerte aufgetreten sind. Mit zunehmendem Sonnenstand bis zur Jahresmitte erhöht sich der Tageszeitraum, in der erythemwirksame UV-Strahlung den Erdboden erreicht. Deutlich sind die unterschiedlichen UV-Dosiswerte zu erkennen, die über den Tag und das gesamte Jahr auftreten. Das Auftreten ganztägig dunkelblauer Streifen im Zeitraum März bis Oktober ist größtenteils auf den Ausfall des entsprechenden Messgerätes zurückzuführen.

UV-Bestrahlungsverhältnisse können innerhalb eines Tages sehr stark schwanken. Daher reicht die alleinige Darstellung eines Tageshöchstwertes, wie z.B. der UV-Index oder ein 30min-Dosis-Wert zur Beschreibung der aktuellen UV-Strahlungssituation nicht aus.

Für Vergleiche mit anderen Stationen und Vergleiche mit Vorjahren wurden deshalb neben den UVI – Werte auch über einen gewissen Jahreszeitraum gemittelte Tagesdosiswerte, herangezogen. Auf diese Weise kann der mögliche Einfluss kurzzeitiger starker Schwankungen in kürzeren Zeiträumen wie Tag oder Woche abgefangen und der eher charakteristische Verlauf besser dargestellt werden. Als geeigneter Zeitraum bietet sich der Monat an. Der Monat wird in vielen Lebensbereichen als überschaubarer Zeitabschnitt angesehen und sehr häufig für Vergleiche zu gleichen Zeiträumen der Vorjahre herangezogen.

Für die weitere Betrachtung werden Tagesdosis- und UVI-Werte herangezogen, die auf einen Monat bezogen sind. Als Messgröße werden sowohl die mittleren Tagesdosiswerte eines Monats als auch die maximalen Tagesdosiswerte eines Monats berücksichtigt. Auf diese Weise wird die in den Farbflächendiagrammen dargestellte Informationsdichte für die folgenden statistischen Auswertungen genügend reduziert, ohne aus Sicht der gesundheitlichen Bewertung an Aussagekraft zu verlieren.

In der Abb.12a-b (s. Anhang) sind zunächst auf den Monat bezogen die mittleren und maximalen UVI-Werte aller 9 Stationen für das gesamte Jahr aufgeführt. Es wurden nur dann Werte angegeben, wenn an mindestens 20 Tagen im Monat gemessen werden konnte.

In Abb. 13a-b (s. Anhang) und 14a-b (s. Anhang) sind die mittleren bzw. maximalen erythemwirksamen Tagesdosiswerte eines jeden Monats für jede Station in einem Säulendiagramm dargestellt. Die Abbildungen zeigen die Werte des BfS/UBA-Kernnetzes in der Reihenfolge von links nach rechts in nördlicher und die der assoziierten Stationen in südlicher Richtung. Die entsprechenden Zahlenwerte sind zusätzlich in Tab.4 (s. Anhang) aufgelistet. Es wurden nur dann Werte angegeben, wenn an mindestens 20 Tagen im Monat gemessen werden konnte.

4. Gesamtbewertung der Messergebnisse

4.1 Aktuelle Messergebnisse

Erster Diskussionspunkt sind die Jahresverläufe der erythemwirksamen Bestrahlungsstärken E_{ery} jeweils um 11 Uhr UTC eines Tages, d.h. in Deutschland nahezu zum jeweiligen Sonnenhöchststand eines Tages. Diese Messwerte dokumentieren anschaulich die jahreszeitliche Variabilität der solaren UV-Strahlung zum jeweils gleichen Tageszeitpunkt im Jahr und ermöglichen darüber hinaus einen ersten Anhaltspunkt über den Zeitraum, innerhalb dessen das gesundheitliche Risiko gegenüber UV-Strahlung deutlich erhöht ist.

Im Jahr 2009 sind bei keiner Station starke, länger währende Abweichungen vom sog. glockenförmigen Jahresverlauf zu beobachten. Kurzzeitige signifikante Erhöhungen sind Anfang Mai in Rinteln, Lindenberg und Neuherberg, im Juni in Lindenberg und Neuherberg und Anfang Juli in Westerland, Rinteln und Lindenberg zu beobachten. Ähnliche Ereignisse sind aus den vorherigen Jahren bekannt und in erster Linie temporär auf teilweise bis zu 30% reduzierte Gesamtozonwerte zurückzuführen.

Die in Abb. 10 eingezeichneten Modellwerte ergeben eine Abweichung vom Gros der Messwerte von 10 bis 20%. Größere Abweichungen liegen nur bei stark bewölkten Wetterverhältnissen vor, die als schwer modellierbar gelten. Bei einer generellen Unsicherheit der Messdaten von ca. 10%, einer Unsicherheit der Modellwerte von ebenfalls 10% bis 20% und einer aktuellen Abweichung der Gesamtozonwerte von bis zu 5% ist die Übereinstimmung zwischen Modellwerten und Messdaten daher als gut einzustufen.

Wie bereits in Kap. 3.2 aufgeführt, kann das UV-Tagesmaximum wetterbedingt vor bzw. nach 11 Uhr UTC liegen. An durchschnittlich über 250 Tagen lagen die höchsten Bestrahlungsstärken E_{ery} bei allen Stationen (Differenz $\geq 15 \text{ mW/m}^2$) außerhalb 11 Uhr bis 11:30 Uhr UTC. D.h., in knapp zwei Drittel des Jahres änderten sich die Wetterbedingungen um die Mittagszeit in signifikanter Weise. Zur quantitativen Bestimmung des Jahresmaximums und des Jahreszeitraumes mit hoher UV-Belastung ($UVI \geq 6$), sind die o. a. Bestrahlungsstärken E_{ery} um 11 Uhr UTC daher nur bedingt zu verwenden. Für diese Fragestellung eignet sich der UVI, dem Maß für die max. erythemgewichtete UV-Bestrahlungsstärke am Tag.

Nach Tab.2 liegen die Jahresmaxima 2009 der UVI-Werte vor allem der nördlichen Stationen etwas höher als 2008, aber bis auf Lindenberg noch ca. 5% - 10% niedriger als im Jahr 2005. Die UVI-Werte im Jahr 2005 waren allerdings die seit Messbeginn höchsten und auf außergewöhnlich niedrige Gesamtozonwerte Ende Mai und Mitte Juni 2005 zurückzuführen [35]. Das UVI - Jahresmaximum ist in diesem Jahr, wie in den meisten vorherigen Jahren, im Süden Deutschlands. Es ist allerdings nicht, wie sonst beobachtet, wesentlich höher als im Norden, was nur durch außergewöhnliche Wetterlagen erklärbar ist. Weiterhin ist der Tabelle zu entnehmen, dass das UVI - Jahresmaximum nur bei 5 Stationen an dem Tag auftrat, an dem auch die höchste erythemwirksame Tagesdosis gemessen wurde. Das bedeutet, dass hohe UV-Bestrahlungsstärken an einem Tag nicht mit durchgehend sonnigen Wetterverhältnissen korrespondieren müssen.

Neben diesen eher singulären Ereignissen ist bezüglich des gesundheitlichen Risikos, die UV-Belastung für das gesamte Jahr von größerem Interesse. Wie bereits ausgeführt, sind für die gesundheitlichen Bewertungen UV-Dosiswerte von 250 J/m^2 (entspricht einer minimalen erythemwirksamen Dosis für den Hauttyp II) und mehr pro halbe Stunde von besonderer Bedeutung (entsprechend $UVI=6$). Nach dem STARneuro - Modell sind die Werte im Norden Deutschland im Juni und Juli und im Süden von Mitte April bis Ende August zu erwarten.

Entsprechend Tab.3 ergibt sich im Vergleich zwischen Rechnung und Messung für die südli-

chen Stationen eine Abweichung des jahreszeitlichen Beginns und des Endes dieses Zeitraumes im Bereich von ± 10 Tagen. Im Norden und in der Mitte Deutschlands ist der Messzeitraum mit bis zu 40 Tagen größer als vom Modell vorhergesagt. In diesen Zeiträumen werden bis auf Westerland (ca. 75%), Rinteln (ca.50%) und Dortmund (ca.50%) ähnlich viele hED – Werte von über 250 J/m²/30 min gemessen. Im Vergleich zum Vorjahr 2008 sind die Messtage mit diesen hED – Werten ungefähr gleich bis Westerland (- 30%) und Zingst (+ 30%) und liegen insgesamt im Bereich des sonnenreichen Jahres 2005.

Für die Einschätzung der UV-Belastung über das gesamte Jahr sind auch die Farbflächen-diagramme in Abb. 11 von hohem Nutzen. Die hED - Werte von mehr als 250 J/m²/30 min sind rot eingefärbt. Sie zeigen im Frühsommer bis in den Herbst ausgedehnte Zeitfenster mit hoher UV-Belastungen (gemäß der SSK-Klassifizierung). Das bedeutet, dass auch in unseren Breitengraden länger anhaltende hohe UV-Belastungen auftreten und damit der UV-Strahlung auch in Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken ist. In dieser Zeit können Tagesspitzenwerte von bis nahezu 6000 J/m² auftreten, d.h. das 24-fache einer minimalen erythemwirksamen Schwellendosis für den Hauttyp II (!).

Nach Abb.12 zeigen die jahreszeitlichen Verläufe der mittleren und maximalen UVI - Werte eines Monats aller Stationen einen ähnlichen Verlauf wie der der erythemwirksamen Bestrahlungsstärke um 11 Uhr UTC. Es fällt auf, dass sich zu Beginn und Ende des Jahres mittlere und maximale UVI – Werte bis um den Faktor 2, im Sommer um den Faktor bis 1,5 unterscheiden. Mittlerer und max. UVI - Wert sind in diesem Jahr im Sommer im Süden Deutschlands nur marginal höher als im Norden.

Auch die jahreszeitlichen Verläufe der mittleren und maximalen Tagessummen eines Monats aller Stationen zeigen nach Abb.13 und Abb.14 einen ähnlichen Verlauf wie der der erythemalen Bestrahlungsstärke um 11 Uhr UTC. In Erweiterung zum UVI, der nur den höchsten Wert eines Tages im definierten Zeitraum von 30 min darstellt, beinhaltet die Tagessumme den kompletten Zeitverlauf der UV-Strahlung eines Tages und bildet das UV-Geschehen im Monat besser ab. In Tab:4 sind die jahreshöchsten mittleren und maximalen Tagessummen eines Monats nochmals als Zahlenwerte aufgeführt und zeigen, wie beim UVI, nur marginale Unterschiede zwischen dem Süden und Norden Deutschlands.

Zusammenfassend aufgeführt zeigt das Jahr 2009 im Vergleich zu früheren Jahren kein ausgeprägtes Süd-Nordgefälle, allerdings auf hohem UV-Belastungsniveau von über 500kJ/m² mittlerer Jahresdosis (Abb.15d). Damit ist der UV-Strahlung auch in unseren Breitengraden weiterhin in Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Temporäre Unregelmäßigkeiten in der Messaufnahme der Systeme in Langen und Schauinsland führten zu längeren Datenausfällen.

Bei den Bewertungen ist zu beachten, dass die Messungen der bodennahen solaren UV-Strahlung üblicherweise und auch im UV-Messnetz des BfS/UBA mit horizontal ausgerichteten Empfängerflächen durchgeführt werden. Dies ist historisch auf den zunächst meteorologisch relevanten Ansatz zurückzuführen. Für eine exakte Erfassung der UV-Exposition des Menschen ist zu berücksichtigen, dass der menschliche Körper über gekrümmte Hautoberflächen verfügt, die bereichsweise senkrecht zur Sonne ausgerichtet sind (Sonnenterassen). Neuere Veröffentlichungen legen den Schluss nahe, dass die UV-Messwerte bei einer geneigten Empfängerfläche abhängig vom Sonnenstand um 20% und mehr erhöht sein können als bei einer horizontal ausgerichteten Fläche.

4.2 Trendanalyse

Von besonderem Interesse ist die Frage, ob aus den bisher akquirierten Datensätzen ein Trend hin zu höheren UV-Expositionen zu erkennen ist. Hierbei ist weniger die Analyse einzelner kurzzeitigen Strahlungsspitzen innerhalb eines Jahres, sondern vielmehr die längerer Zeitabschnitte von Bedeutung.

Aus den in Abb. 15a (s. Anhang) dargestellten maximalen UVI - Jahreswerten im Zeitraum 2000 bis 2009 lässt sich bezogen auf alle Stationen kein signifikanter Trend (lineare Regression) hin zu höheren erythemgewichteten UV – Bestrahlungsstärken eines Jahres ableiten. Im Süden (NH) ist ein leichter Trend abwärts, im Norden (ZI) hingegen ein Trend aufwärts zu beobachten. Die Trendentwicklung im Bereich von etwa 5% liegt jedoch voll im Genauigkeitsbereich der Messung und gestattet daher noch keine Aussage für einen gesicherten Trend.

Daher wurde für die Trendanalyse (lineare Regression) in einem zweiten Schritt anstatt der erythemgewichteten Bestrahlungsstärke die erythemgewichtete UV-Dosis gewählt und der Zeitraum von 30 min auf einen Monat erweitert. Hierzu wurde für jedes Jahr die mittlere Tagessumme der erythemwirksamen Bestrahlung H_{ery} für den Monat August berechnet, der in der Regel sonnenreicher als der Juli ist, aber noch ausreichend hohe UV-Bestrahlungswerte hat. Die für die vier Messstationen des Kernnetzes ermittelten Daten sind in Abb. 15b (s. Anhang) zusammengestellt. Auch hier ist die Trendentwicklung für Zingst und Neuherberg in Form gestrichelter Geraden dargestellt. Im Gegensatz zu den max. UVI-Werten in Abb. 15a ist ein gegenläufiger Trend zu beobachten. Während der Norden mit der Station Zingst einen deutlichen Abfall von über 15% zeigt, ist im Süden mit der Station Neuherberg ein leichter Aufwärtstrend von ca. 5-10% festzustellen. Diese Trendentwicklung liegt ebenfalls noch größtenteils im Genauigkeitsbereich der Messung und gestattet nur eine eingeschränkte Aussage für einen gesicherten Trend. Der Einfluss wetterbedingter Parameter wie z.B. der Bewölkung und von Aerosolen, wird durch die Mittelung abgeschwächt.

In einem dritten Schritt wurde der Zeitraum für die Trendanalyse von einem Monat auf jeweils ein Jahr erweitert. Hierzu wurde für jedes Jahr die Anzahl der erythemgewichteten Halbstundenwerte, die den Wert $250 \text{ J/m}^2/30\text{min}$ (entsprechend $\text{UVI}=5,6$) überschritten, für jede Station ermittelt (s. Tab.3). Die für die Messstationen Zingst (Norden) und Neuherberg (Süden) des Kernnetzes ermittelten Daten sind in Abb. 15c (s. Anhang) zusammengestellt. Auch hier ist die Trendentwicklung für Zingst und Neuherberg in Form gestrichelter Geraden dargestellt. Ähnlich wie bei den max. UVI - Jahreswerten in Abb.15a zeigt die Station Zingst einen deutlichen Anstieg von ca. 25%, die Station Neuherberg einen Abwärtstrend von ca. 20%. Bei Angabe dieser Trendwerte ist zu berücksichtigen, dass einige Messwerte bis zu 5% schwanken können, da in den entsprechenden Messzeiträumen teilweise einige Tage nicht gemessen werden konnten (Näheres siehe Tab. 3).

Eine weitere Möglichkeit eines Vergleiches bieten die mittleren Jahressummen, gebildet aus den zwölf mittleren Tagessummen eines jeden Monats, multipliziert mit der Anzahl der Tage im Monat und zur Jahressumme aufaddiert (s. Abb.15d). Im Vergleich mit der reinen Jahressumme, die durch einige Fehltag an den Stationen nicht immer gebildet werden kann, gibt es zumindest in Neuherberg Abweichungen über die 10 Jahre von 1% bis max. 5%. In Ermangelung einer kompletten Messreihe sind für die Mitte Deutschland Langen und Kulmbach in der Abbildung aufgeführt. Für die Trendentwicklung gilt gleiches wie im Absatz zuvor.

Gerade die Wertereihe der Jahressummen kann Aufschluss darüber geben, inwieweit sich durch wetterbedingte bzw. teilweise auch klimatische Veränderungen die UV-

Jahresbelastung im Vergleich zu vorherigen Jahren ändert. Diese Werte decken das gesamte Jahr ab, werden also in hohem Maße durch das Wettergeschehen beeinflusst. Im Vergleich zu früheren Jahren ist das Jahr 2009 auffällig mit ähnlich hohen Jahressummen im Norden und Süden Deutschlands

Um eine Trendaussage über die UV-Intensität über den gesamten Zeitraum 2000-2009 zu erhalten, wurde in einem letzten Schritt dazu die erythemwirksame Bestrahlungsstärke E_{ery} , um 11 Uhr UTC eines Tages, die entsprechende Globalbestrahlungsstärke sowie der mit Hilfe des STARneuro - Programms ermittelte Modellwert herangezogen. In Abb. 16 (s. Anhang) sind die drei Kurvenverläufe über den Zeitraum 2000 bis 2009 am Beispiel der Station Neuherberg dargestellt.

Für die Analyse wurde der gleitende Durchschnitt gewählt, d.h. diese Messreihe setzt sich zusammen aus dem arithmetischen Mittelwert über 365 Tage, beginnend 1.1. bis 31.12.2000 eines Jahres und fortlaufend um jeweils einen Tag verschoben, als 2.1.2000 bis 1.1.2001, 3.1.2000 bis 2.1.2001. Schaltjahre werden nicht berücksichtigt.

Durch seine Resistenz gegen Ausreißer eignet sich der Median besonders gut als Lageparameter für nicht normalverteilte Grundgesamtheiten und wurde deshalb als 2. Kurve mit demselben Auswerteschema wie der gleitende Durchschnitt in die 3 Grafiken mit aufgenommen.

Die Kurven des gleitenden Durchschnitts und Medians von erythemaler Bestrahlungsstärke (Abb.16a,) und Gesamtglobalbestrahlungsstärke (Abb.16c, s. Anhang) verlaufen nahezu gleich, beide mit einer Erhöhung im Jahr 2003, dem Jahr mit sonnenreichen Monaten. Die modellierte Kurve zeigt ebenfalls den gleichen Verlauf, jedoch, wie zu erwarten, ohne die Erhöhung im Jahre 2003.

Eine Trendanalyse des gleitenden Durchschnitts der Gesamtglobalbestrahlungsstärke zeigt nur eine leichte Erhöhung im gesamten Zeitbereich von weniger als 5%, eine etwas deutlichere Erhöhung des Medians im gesamten Zeitbereichs von bis zu 10%. Keine Erhöhung ist bei der modellierten Bestrahlungsstärke zu beobachten.

Zusammenfassend konnte durch die Messungen keine Veränderung der UV-Intensität in Deutschland im Zeitraum 2000 – 2009 statistisch abgesichert werden. Dies dokumentiert in eindrücklicher Weise der nahezu gleiche Verlauf der gemessenen Bestrahlungsstärke mit den anderen zwei Trendlinien von modellierter Bestrahlungsstärke und Gesamtglobalbestrahlungsstärke. Am Beispiel der Neuherberger Messstation konnte gezeigt werden, dass die erythemwirksame UV-Bestrahlungsstärke im Messzeitraum weniger als 5% zugenommen hat. In Zingst konnte hingegen eine deutliche Abnahme um etwa 15% registriert werden. Auf der anderen Seite ist die UV-Belastung durch länger anhaltende UV-Bestrahlung mit Werten über $250 \text{ J/m}^2/30\text{min}$ zumindest regional bis zu 20% gestiegen. Dieser Parameter kann durchaus dazu genutzt werden, erwartete Veränderungen in der UV-Belastung durch veränderte klimatische Bedingungen hinreichend genau zu dokumentieren.

5. Literatur

- [1] Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland e.V. und Robert Koch Institut (Hrsg.) „Krebs in Deutschland: Häufigkeiten und Trend“ 5.Ausgabe (2006)
- [2] Diepgen, T.L. and V. Mahler, The epidemiology of skin cancer. Br J Dermatol, 146 Suppl 61: p. 1-6 (2002).
- [3] Tevini, M.: “Erhöhte UV-B-Strahlung : ein Risiko für Nutzpflanzen”. Biologie in unserer Zeit 4, 246-254 (1996)
- [4] Siebeck, O. et al.:”Impact of UV-B radiation on zooplankton and fish in pelagic freshwater ecosystems”. Arch.Hydrobiol.Beih. Ergebn.Limnol., 43, 197-206 (1994)
- [5] Steinmetz, M. Hrsg.:”1. Arbeitsgespräch “terrestrisches solares UV-Monitoring”. 2.6.1992 in München. BfS/ISH-Bericht 163 (1993)
- [6] Steinmetz, M.: “Continuous solar UV monitoring in Germany. Photochem. Photobiol B 41 181-187 (1997)
- [7] Bojkov, R.D.: "The Changing Ozone Layer", WMO, 1995, ISBN 92-63-10828-5
- [8] Sandmann, H. Stick, C. : „Körperflächenbezogene UV-Dosimetrie solarer UV-Strahlung an Tagen mit durchbrochener Bewölkung “ Abschlussbericht zum BfS-Forschungsvorhaben StSch 4289 (2006)
- [9] Köpke, P.: “Spektrale und integrale UV-B-Strahlung und Ozon in Bayern”. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd.8 "Klimaforschung in Bayern" (1994)
- [10] Van der Leun, J.C and de Gruijl, F.R : "Influences of Ozone Depletion on Human and Animal Health". In :UV-B Radiation and Ozone Depletion. M.Tevini, ed. Lewis Publishers, London (1993)
- [11] Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes, Ausgabe Nr.104 (Mai 2005)
- [12] Stick, C., Krüger, K., Schade, N.H., Sandmann, H., Macke, A. „Episode of unusual high solar ultraviolet radiation in central Europe due to dynamical reduced stratospheric ozone in May 2005” Atmos.Chem.Phys.Discuss. **5**, (2005)
- [13] Gibson, J.H. ed.: “Justification and Criteria for the Monitoring of UV Radiation”. Report of UV-B-Measurements workshop, Denver, Colorado (1991)
- [14] Seckmeyer et.al. EDUCE (<http://www.muk.uni-hannover.de/EDUCE/>)
- [15] Schwander, H., A. Kaifel, A. Ruggaber and P. Koepke, “Spectral radiative transfer modeling with minimized computation time by use of neural-network technique, Appl. Opt., **40**, 3, 331-335 (2001)
- [16] Schopka, H.J., Steinmetz, M. (Hrsg.): ”Environmental UV Radiation and Health Effects”. International Symposium München, 4.-6.Mai 1993. BfS-ISH-171/95 (1995)
- [17] WHO: Environmental Health Criteria 160 ”Ultraviolet Radiation”, World Health Organization, Genf (1994)
- [18] Greinert, R. et.al. “Molekulare und zelluläre Reaktionen nach UV-Bestrahlung” in Steinmetz, M.(Hrsg.): “200 Jahre solare UV-Strahlung: Geschichte und Perspektiven BfS-Schr-36/05 (2005)

- [19] Commission of the European Communities-General XII: Report 13 in the Ecosystem Research reports Series of the Environmental Research Programme: The Effects of Environment UV-B-Radiation on Health and Ecosystems (1994)
- [20] Wittenberg, S.: "Solar radiation and the eye: a review of knowledge relevant to eye care". *Am.J.Ophthalmol Physiol Optics*, 63: 676-689 (1986)
- [21] Empfehlung der Strahlenschutzkommission: "Schutz des Menschen vor UV-Strahlung" SSK/6-93/UV (1993)
- [22] Gilchrest, B.A. et al. "The human sunburn reaction: histologic and biochemical studies". *J. Am. Acad. dermatol.* 5: 411-422 (1981)
- [23] Kligman, L.H. and Kligman, A.M.: "The nature of photoaging: its prevention and repair". *Photodermatology*, 3: 215-227 (1986)
- [24] Grosche, B. et al: Risikofaktoren für das maligne Melanom " in Steinmetz, M.(Hrsg.): "200 Jahre solare UV-Strahlung: Geschichte und Perspektiven" BfS-Schr-36/05 (2005)
- [25] Gruijl, F.R.: Biological action spectra" in McKinlay A.F., Repacholi, M.,H. (Hrsg) "Radiation Protection Dosimetry Vol 91 Nos.1-3 ISBN 1 870965655 .(2000)
- [26] Mc Kinlay, A.F. and Diffey, B.L.: "A reference spectrum for UV induced erythema in human skin". *CIE Journal* 6: 17-22 (1987)
- [27] Caldwell, M.M. : "Solar UV Irradiation and the Growth and Development of Higher Plants". *Photophysiology Vol. VI*, A.C.Giese ed., Academic Press, New York (1971).
- [28] Steinmetz, M.(Hrsg): "UV Index in practical use" BfS - Schrift 29/04
- [29] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: "Global solar UV-Index" ICNIRP-1/95 ISBN 3-9804789-0-4 (1995)
- [30] WHO: "Global Solar UV Index – A Practical Guide" (ISBN 92 4 159007 6, NLM classification: QT 162.U4, Marketing and Dissemination, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Genf 27, Schweiz
- [31] SSK: "Praktische Anwendung des UV Index Stellungnahme mit Anhang: Unterrichtung der Bevölkerung über die gesundheitlichen Auswirkungen/Risiken der solaren UV-Strahlung" (1996)