

Dr. Peter Köpke

Address:

Meteorologisches Institut der Universität München
Abteilung Strahlung und Satellitenmeteorologie
Theresienstr. 37
D-80333 Muenchen
Germany
Tel: +49 89 2180 4367
Fax: +49 89 2180 4381
e-mail: peter.koepke@lrz.uni-muenchen.de

Current position:

Head of the UV group at the Meteorological Institute of the University of Munich

Current interest:

UV-Radiation:

[UV-Index](#), relevant properties of atmospheric components (albedo, aerosol, clouds) Biological weighting, adaptation, repair radiation, exposure over longer time periods.

Aerosol:

microphysical and radiative properties

[Optical Properties of Aerosols and Clouds OPAC](#)

[Global Aerosol Data Set GADS](#)

Maximale solare spektrale Bestrahlungsstärke im UV-Bereich in Düsseldorf (51.2 ° N)

Dr. Peter Köpke

München, den 20.02.2006

1. Einleitung

Zur Behandlung eines Luminiszenphänomens in der Erdatmosphäre werden Werte der solaren elektromagnetischen Strahlung der Sonne am Unterrand der Erdatmosphäre abgeschätzt. Die Untersuchung bezieht sich auf die maximalen Werte für den Standort Düsseldorf.

Für Wellenlängen unterhalb von 210 nm ergibt sich eine Transmission durch die Erdatmosphäre von weniger als 10^{-30} , deren Berechnung zusätzlichen Rechenaufwand erfordern würde. Da die extraterrestrische Sonne bei diesen Wellenlängen Werte weniger als $0,01 \text{ W/(m}^2\text{nm)}$ aufweist ergeben sich Bestrahlungsstärken, die so klein sind, dass sie für die vorliegende Untersuchung ohne Belang sind. Die Untersuchung wurde deshalb auf einen Spektralbereich mit Wellenlängen zwischen 200 und 320 nm beschränkt.

2. Theorie

Die Strahlung der Sonne wird in der Atmosphäre gestreut und absorbiert. Die daraus resultierende Bestrahlungsstärke am Boden wird üblicherweise mittels der Strahlungsübertragungstheorie bestimmt, die alle Prozesse einschließlich der Mehrfachstreuung und der Reflexion am Boden berücksichtigt, z.B. STAR (Koepke et al., 2006).

In dem interessierenden Spektralbereich mit Strahlungsflussdichten von weniger als $10^{-15} \text{ W/(m}^2\text{nm)}$ wird die Strahlung überwiegend durch Absorption geschwächt. Deshalb wird in der folgenden Untersuchung die Streuung vernachlässigt und die Transmission mit dem Bouguer-Gesetz berechnet. Die Berücksichtigung von Streuprozessen würde die Strahlung zusätzlich reduzieren.

Das Bouguer-Gesetz in der in der Atmosphärenphysik gebräuchlichen Form lautet:

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \cdot \exp(-OD(\lambda) \cdot ml) \quad (1)$$

Dabei bedeutet (λ), dass es sich um eine spektrale Größe handelt, und

$E(\lambda)$ die gesuchte Strahlungsflussdichte am Boden in $[\text{W/(m}^2\text{nm})]$,

$E_0(\lambda)$ die Strahlungsflussdichte der extraterrestrischen Sonne am Oberrand der Atmosphäre in $[\text{W/(m}^2\text{nm})]$,

$OD(\lambda)$ die optische Dicken der extingierenden Substanzen in der Erdatmosphäre mit der Dimension [1].

Diese ergibt sich als Summe der optischen Dicken aller vorhandener extingierenden Substanzen. Und ml die relative Luftmasse, ebenfalls mit der Dimension [1].

3. Bestimmung der relevanten Daten

3.1 Relative Luftmasse

Die Relative Luftmasse, ml , beschreibt die Länge des Weges der direkten Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre in Vielfachen des kürzesten, d.h. senkrechten, Weges.

Für Positionen der Sonne mit einer Elevation h_0 von mehr als 30 ° gilt

$$ml = 1 / \sin h_0 \quad (2)$$

In dieser Untersuchung ist die maximale Bestrahlungsstärke gefragt. Diese ergibt sich bei gleichen Atmosphärenbedingungen immer bei dem kleinsten ml , d.h. dem kürzesten Weg durch die Atmosphäre. Für Düsseldorf (51,2 ° N) ergibt sich dieser Wert zur Sommersonnenwende am 21.Juni, 12.00h d.h. bei einer Sonnenhöhe $h_0 = 62,24^\circ$ und damit einer relative Luftmasse $ml = 1,13$.

3.2 Extraterrestrische Sonne

3.2.1 Der Sonnenabstandsfaktor

Die außerhalb der Erdatmosphäre eintreffende spektral Strahlungsflussdichte von der Sonne $E_0(\lambda)$ wird üblicherweise für einen mittleren Abstand Erde-Sonne angegeben. Der Sonnenabstand ist im Juni größer als der im Mittel. Damit müssen die Bestrahlungswerte für den 21.Juni mit dem Sonnenabstandsfaktor 0.9674 reduziert werden.

3.2.2 Die spektrale Bestrahlungsstärke

Abb.1 (Figure 2 aus Lean et al., 2004) zeigt die spektrale Strahlungsflussdichte der extraterrestrischen Sonne zwischen 1 und 1000 nm. Ab rund 150 nm strahlt die Sonne in etwa wie ein schwarzer Körper, überlagert von Fraunhoferlinien. Für kürzere Wellenlängen ergibt sich keine gleichmäßige weitere Abnahme mit abnehmender Wellenlänge. Hier hat die Strahlungsflussdichte variable Werte, die generell in der Größenordnung zwischen 10⁻⁴ und 10⁻⁵ W/(m²nm) liegen. Allerdings gibt es Bereiche mit höheren Werten, in einem schmalen Wellenlängenbereichen (H I Lyα) sogar größer als 10⁻² W/(m²nm).

Abb.2 (Figure 6 aus Lean et al., 2004) zeigt die Variabilität der Strahlungsflussdichte durch die unterschiedliche Anzahl von Sonnenflecken im 11-jährigen solaren Zyklus. für Wellenlängen oberhalb von 300 nm beträgt die Variation weniger als 1 / 1000. Mit abnehmender Wellenlänge nimmt die Variation der Strahlungsflussdichte schnell zu und erreicht bei 180 nm Werte in der gleichen Dimension wie die mittlere Bestrahlungsstärke.

Für die Abschätzung der Strahlungsflussdichten werden Werte der extraterrestrischen Sonne nach Lean (1991) bzw. Woods et al. (1996) verwendet.

Abb. 1 Spektrale extraterrestrische Sonne

Figure 2: SORCE instruments and their wavelength coverage. (Gary Rottman)

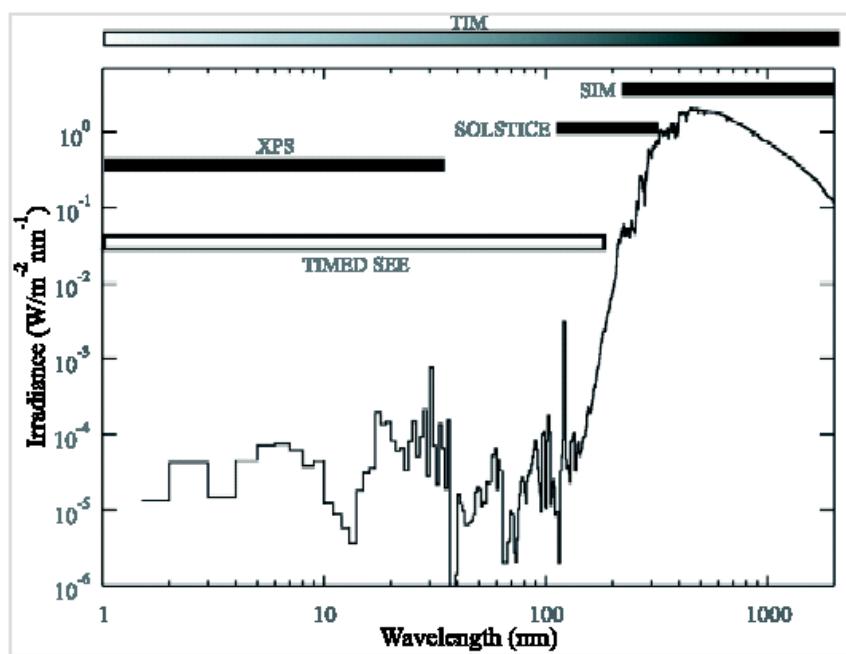
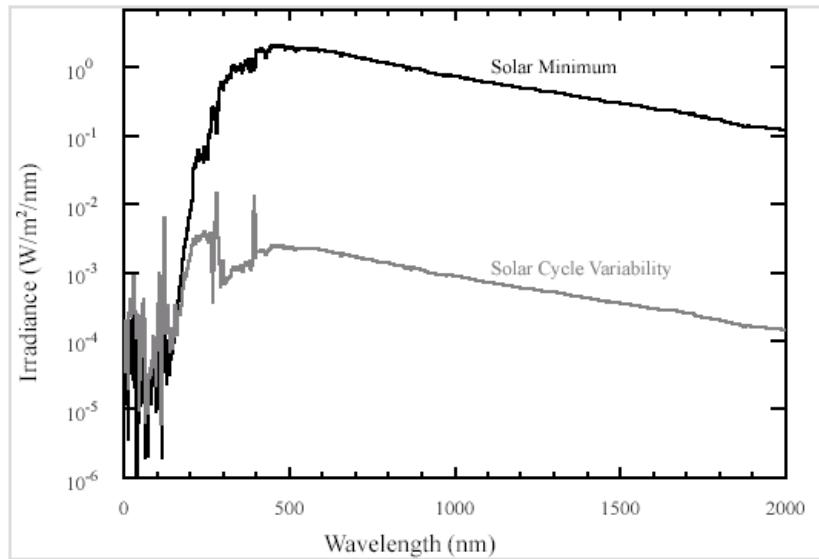


Abb. 2 Variationsbreite der Werte der extraterrestrischen Sonne

Figure 6: The solar irradiance spectrum is shown shortward of 2000 nm along with the estimated variability of the irradiance over the 11-year solar cycle. At the short ultraviolet wavelengths, the solar variability is larger than the solar minimum irradiance value, and the variability at the visible and infrared wavelengths is about 0.1% of the irradiance value. As listed in the table, the ultraviolet irradiance is a small amount of the total solar irradiance (TSI), but the ultraviolet variability is a more significant part of the TSI variability.



3.3 Spektrale Optische Dicke

3.3.1 Absorptionsquerschnitt und Absorbermenge

Abb.3 zeigt spektrale Werte der Absorptionsquerschnitte $A(\lambda)$ in $\text{cm}^2 / \text{Molek}\ddot{\text{u}}\text{l}$ (molekularer Absorptionskoeffizient) für die Gase, die im kurzweligen UV-Spektralbereich absorbieren. Diese Werte sind Druck und temperaturabhängig. Damit müsste höhenauflöst mit entsprechender Verteilung der Absorber und der Temperatur gerechnet werden. Für die vorliegende Abschätzung wird jedoch auf die integralen Gesamtwerte der Absorber O_3 und O_2 reduziert.

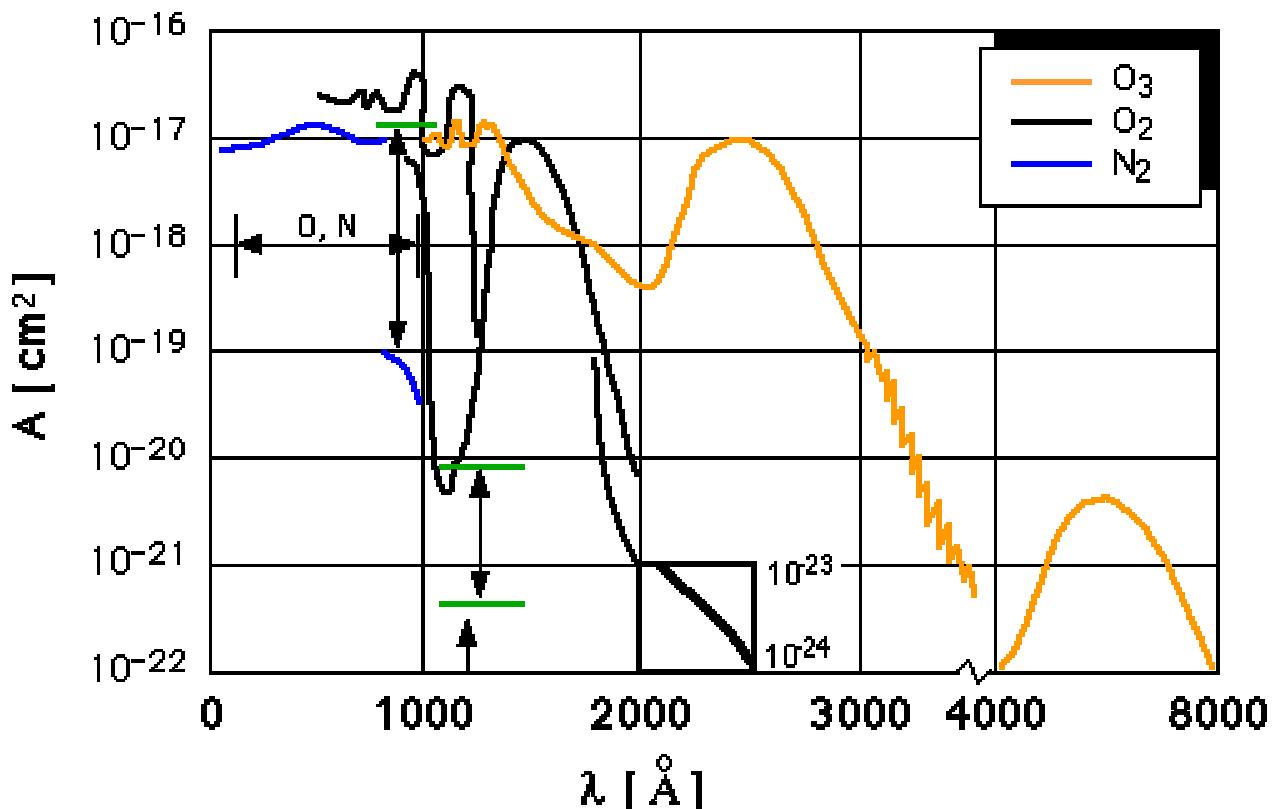
Für diese integralen Gesamtwerte (Konzentration auf eine Schicht) gilt für alle Molekülarten

$$1\text{atm}\cdot\text{cm} = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ [Moleküle / cm}^2\text{]}$$

Für einen Absorber mit der Menge m^* in atm-cm ergibt sich damit die spektrale Optische Dicke $\text{OD}(\lambda)$ zu

$$\text{OD}(\lambda) = m^* \cdot 2,687 \cdot 10^{19} \cdot A(\lambda) \text{ [Moleküle / cm}^2 \cdot \text{cm}^2 / \text{Molek}\ddot{\text{u}}\text{l}]$$

Abb. 3 Absorptionsquerschnitte relevanter Gase



3.3.2 Ozon

Bei Ozon wird die Schichtdicke in Dobson-Units (DU) angegeben, mit

$$1 \text{ DU} = 10^{-3} \text{ atm-cm}$$

Um Bedingungen mit minimaler Transmission zu simulieren wird ein Wert von 200 DU angenommen. Dieser liegt knapp unter den geringsten in Mitteleuropa aufgetretenen Werten (z.B. Claude et al., 1999). Da die niedrigsten Ozonwerte üblicherweise Ende des Winters erreicht werden, ist durch die Kombination des Wertes 200 DU mit dem Sonnenhöchststand im Juni eine Abschätzung der maximalen Strahlungsflussdichte gegeben, die in der Praxis kaum erreicht werden wird. Es handelt sich eben um die Abschätzung eines worst case.

Spektrale Absorptionskoeffizienten für Ozon $A_{O3}(\lambda)$ wurden für Wellenlängen kleiner 280 nm nach Molina and Molina (1986) für 226 K verwendet und für Wellenlängen 280 nm und größer nach Burrows et al. (1999) für 221 K.

3.3.3 Sauerstoff

Die Menge der Sauerstoffmoleküle in einer vertikalen Säule der Atmosphäre wird aus dem Partialdruck bestimmt, der bei Normalbedingungen von 1013 hPa und 20,95 % O₂ einen Wert $P_{O2} = 212 \text{ hPa}$ hat. Daraus ergeben sich für eine Säule durch die ganze Atmosphäre für Sauerstoff die Werte:

$$\begin{aligned} \text{O}_2\text{Säule: } & 216 \text{ g/cm}^2 \\ & 6,75 \text{ mol/cm}^2 \\ & 4,065 \cdot 10^{24} \text{ molec/cm}^2 \end{aligned}$$

4. Die spektrale Bestrahlungsstärke am Boden

4.1 Ergebnisse

Tab. 1 und Abb. 4 zeigen die resultierenden Ergebnisse, unter Annahme der oben beschriebenen Bedingungen, d.h. Sonnenhöchststand in Düsseldorf bei 200 DU Ozon. Berücksichtigt ist nur die Absorption der direkten Strahlung durch Ozon und Sauerstoff. In Wirklichkeit werden die Werte noch niedriger liegen.

In Tab. 1 haben die Spalten folgende Bedeutung:

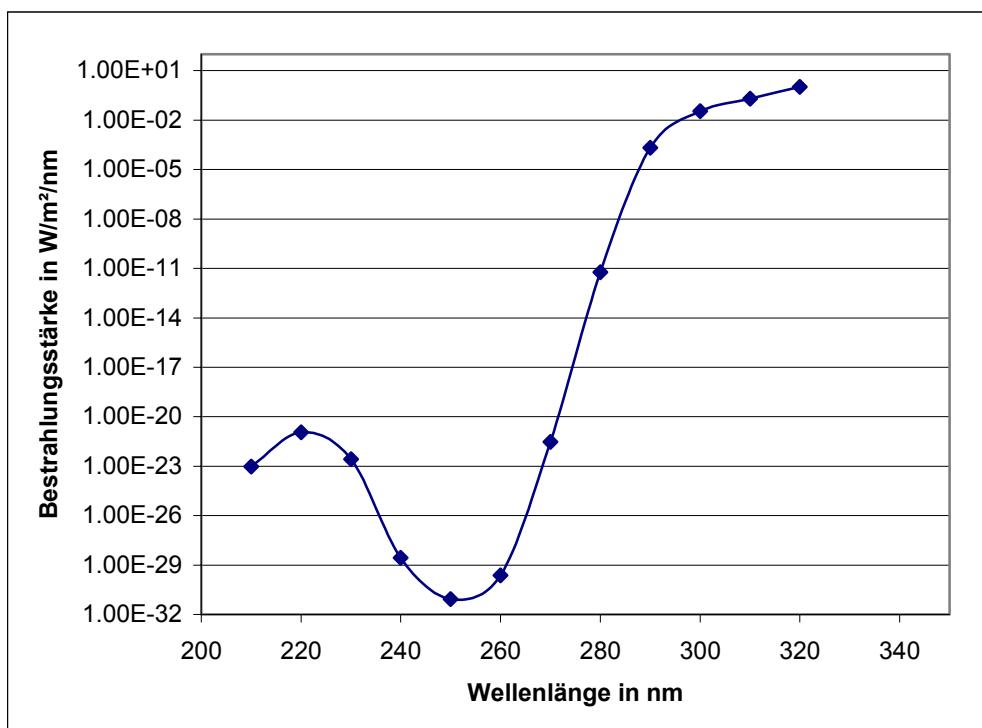
1. Wellenlänge in nm
2. spektraler Absorptionsquerschnitt von Ozon in cm^2/molec
3. spektrale Optische Dicke von Ozon für eine Ozonschichtdicke von 200 DU
4. spektraler Absorptionsquerschnitt von Sauerstoff in cm^2/molec

5. spektrale Optische Dicke von Sauerstoff für Normalbedingungen 1013 hPa
6. spektrale Optische Dicke von Ozon und Sauerstoff gemeinsam
7. spektrale Transmission nach Gl. 1, d.h. hervorgerufen durch Absorption von Ozon und Sauerstoff bei einem Sonnenelevationswinkel von 62,2°
8. Extraterrestrische Strahlungsflussdichte der Sonne mit Sonnenabstandsfaktor 0,9674 in W/m²/nm
9. Spektrale Strahlungsflussdichte am Unterrand der Atmosphäre in W/m²/nm, berechnet mit den im Text angegeben Annahmen.

Tab.1 Angaben zur Strahlungsflussdichte am Boden

1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	3.1E-19	1.69	7.5E-21	30487.50	30489.19	0.0E+00	0.009	0.00E+00
210	5.8E-19	3.12	1.0E-23	40.65	43.77	3.3E-22	0.029	9.60E-24
220	1.8E-18	9.67	7.5E-24	30.49	40.16	2.0E-20	0.058	1.14E-21
230	4.5E-18	24.22	4.8E-24	19.51	43.73	3.5E-22	0.077	2.69E-23
240	8.4E-18	44.96	2.7E-24	10.98	55.94	3.5E-28	0.077	2.73E-29
250	1.1E-17	60.94			60.94	1.2E-30	0.068	8.39E-32
260	1.1E-17	58.36			58.36	2.3E-29	0.102	2.32E-30
270	8.0E-18	42.78			42.78	1.0E-21	0.290	2.93E-22
280	3.9E-18	20.69			20.69	7.0E-11	0.085	5.97E-12
290	1.3E-18	7.09			7.09	3.3E-04	0.653	2.16E-04
300	3.5E-19	1.88			1.88	1.2E-01	0.296	3.53E-02
310	8.5E-20	0.45			0.45	6.0E-01	0.335	2.01E-01
320	2.7E-20	0.15			0.15	8.5E-01	1.226	1.04E+00

Abb. 4 Maximale solare UV-Bestrahlungsstärke bei Sonnenhöchststand in Düsseldorf



4.2 Nicht berücksichtigte Prozesse

Bei der obigen Berechnung der Strahlungsflussdichte wurde keine Streuung der Strahlung durch Luftmoleküle und Aerosolteilchen berücksichtigt und keine Reflexion der Strahlung am Boden, die über Mehrfachstreuoprozesse die Strahlung erhöhen würde. Es wurde keine Höhenverteilung und keine Druck- und Temperaturabhängigkeit der Absorptionsgrößen berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Untersuchung maximaler Strahlungsflussdichten sind alle diese Effekte zu vernachlässigen. Aerosolpartikel würden bei starker Trübung die Strahlung um bis zu 50 % schwächen, die Reflexion diese geringfügig erhöhen und die Höhen- Temperatur und Druckverteilung sie etwas modifizieren.

Einzig die Streuung an Luftmolekülen würde einen größeren Effekt haben. Die Luftmoleküle würden die direkte Strahlung von der Sonne durch Streuung reduzieren, aber ein großer Anteil dieser gestreuten Photonen würde der Bestrahlungsstärke als diffuse Himmelsstrahlung wieder hinzugefügt werden.

Diese Effekte durch die Luftmoleküle sind stark, da deren Streukoeffizient mit abnehmender Wellenlänge mit der 4. Potenz zunimmt. Durch die mengen- und damit höhen-abhängige Wechselwirkung von Streuung und Absorption (Detour-effekt ; Schwander et al., 1997) sind diese Effekte jedoch nur mittels aufwändiger Berechnung zu berücksichtigen.

Ebenso sind keine Effekte durch Höhenstrahlung, d.h. kosmische Strahlung von der Sonne oder aus dem Weltraum, berücksichtigt. Diese Strahlung besteht aus wenigen, aber sehr energiereichen Teilchen, die in der Atmosphäre unterschiedlichste Sekundärprozesse auslösen. Da diese Teilchen nicht den hier behandelten Streu- und Absorptionsprozessen unterliegen, kann die Sekundärstrahlung auch in Bodennähe entstehen und in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden.

Für Wellenlängen größer als 280 nm ist diese aufwändige Berechnung mit Berücksichtigung aller Prozesse mit dem Strahlungsübertragungsmodell STAR (Koepke et al., 1998; Koepke et al, 2006) durchgeführt worden. Zusätzlich zu den oben genannten Annahmen, nämlich Düsseldorf am 21. Juni mit 200 DU Ozon, wurde hierbei noch eine geringe, aber realistische Aerosolbelastung angenommen (AOD bei 550 nm = 0.05; Aerosoltyp: clean continental), eine Albedo von 3% und die Streuung an Luftmolekülen entsprechend einem Luftdruck von 1013 hPa. Natürlich berücksichtigt STAR die Mehrfachstreuoprozesse. Die so berechneten Strahlungsflussdichten sind in Tab. 2 in Spalte 3 den Werten der Berechnung nach Tab. 1 , d.h. ohne Prozesse an Luftmolekülen und Aerosol, gegenüber gestellt. Spalte 4 gibt den Quotient zwischen den Werten nach STAR und nach Gl. 1 an. Dieser zeigt, dass die Werte bei Berücksichtigung von Streuprozessen an Luftmolekülen deutlich kleiner sind als nach der Abschätzung in Tab.1. Die Unterschiede sind aber andererseits so gering, dass die exakten Werte in Abb. 4 eine Kurve ergeben würden, die um weniger als eine Symbolgröße unter der gezeigten Kurve liegen würde. Die Unterschiede der beiden Berechnungsmethoden sind wellenlängenabhängig, entsprechend den wellenlängenabhängigen Streueigenschaften der Luftmoleküle.

In Tab.2 haben die Spalten folgende Bedeutung:

1. Wellenlänge in nm
2. Spektrale Strahlungsflussdichte am Unterrand der Atmosphäre in W/m²/nm, berechnet mit GI.1 und den im Text angegeben Annahmen.
3. Spektrale Strahlungsflussdichte am Unterrand der Atmosphäre in W/m²/nm, berechnet mit STAR und den im Text angegeben Annahmen.
4. Faktor Strahlungsflussdichte mittels STAR zu Strahlungsflussdichte nach GI.1

Tab. 2 Spektrale solare Strahlungsflussdichten nach GI.1 und nach STAR

1	2	3	4
280	5.97E-12	1.45E-12	0.24
290	2.16E-04	6.95E-05	0.32
300	3.53E-02	1.52E-02	0.43
310	2.01E-01	1.04E-01	0.52
320	1.04E+00	3.70E-01	0.36

4.3 Abhängigkeit der Strahlungsflussdichte von der Ozonmenge

Als Ergänzung zu der Abschätzung über den Spektralbereich größer 200 nm wurden die Strahlungsflussdichten für Wellenlängen größer oder gleich 280 nm zusätzlich für die Ozonschichtdicken 100 DU und 300 DU mit STAR berechnet, jeweils mit den oben genannten Werten für Aerosol, Albedo und Luftmoleküle in Düsseldorf. Die Werte sind in Tab.3 gezeigt.

In Tab .3 haben die Spalten folgende Bedeutung:

1. Wellenlänge in nm
2. Spektrale Strahlungsflussdichte am Unterrand der Atmosphäre in W/m²/nm, berechnet mit STAR und den im Text angegeben Annahmen für 100 DU.
3. Spektrale Strahlungsflussdichte am Unterrand der Atmosphäre in W/m²/nm, berechnet mit STAR und den im Text angegeben Annahmen für 200 DU.
4. Spektrale Strahlungsflussdichte am Unterrand der Atmosphäre in W/m²/nm, berechnet mit STAR und den im Text angegeben Annahmen für 300 DU.

Tab. 3 Spektrale solare Strahlungsflussdichten berechnet mit STAR

1	2	3	4
280	1.94E-07	1.45E-12	1.17E-17
290	4.31E-03	6.95E-05	1.17E-06
300	4.72E-02	1.52E-02	4.96E-03
310	1.38E-01	1.04E-01	7.81E-02
320	4.06E-01	3.70E-01	3.38E-01

5. Bewertung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die interessierende Strahlungsflussdichte mit maximalen Werten zwischen 1 E-15 und 1 E-20 W/m²/nm im Wellenlängenbereich zwischen 280 und 270 nm erreicht wird. Die Werte werden im Wesentlichen durch die Absorption durch Ozon bestimmt, so dass sie stark mit der Ozonmenge variieren. Der worst case für Düsseldorf ist in der Kombination von Sonnenhöchststand mit 200 DU angesetzt worden (Tab.1 und Tab.2). Realistischer sind im Sommer Werte von 300 DU (Tab. 3), bei denen es schon bei 280 nm zu Strahlungsflussdichten von weniger als 1 E-15 W/m²/nm kommt. Im Winter kann die Ozonmenge geringere Werte erreichen, aber dann wird die Strahlungsflussdichte geringer wegen der niedrigeren Sonnenhöhe.

Literatur

- Burrows, J.P. and 6 co-authors (1999) Atmospheric remote-sensing reference data from GOME – 2. Temperature dependent absorption cross sections of O₃ in the 231-794 nm range. *J Quant Spectros Radiat Transfer*, 61,4, 509-517
- Claude, H., U. Köhler u. W. Steinbrecht (1999) Ozon-Streamer erreicht Europa. *Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes*, 72, 1-2
- Lean, J. and 7 co-authors (2004) SORCE Scince Meeting , *The Earth Observer*,16, 6, 3-16
- Lean, J. (1991) Variations in the Sun's radiative output, *Review Geophys.* 29, 4, 505-535
- Koepke, P. and 23 co-authors (1998) comparison of models used for UV Index calculations. *Photochem Photobiol*, 67,6,657-662
- Koepke, P. and 8 co-authors (2006) Actual state of the UV radiation transfer model package STAR. In: Fischer, H. a. B.-J. Sohn (Edts.) IRS 2004: Current Problems of Atmospheric Radiation; A. Deepak Pbl., in print
- Molina L.T. and M.J. Molina (1986) Absolute absorption cross sections of ozone in the 185- to 350-nm wavelength range. *J Geophys Res* 91, D13, 14501-14508
- Schwander, H. , P. Koepke and R. Ruggaber (1997) Uncertainties in modeled UV irradiances due to limited accuracy and availability of input data. *J Geophys Res* 102, D8, 9419-9429
- Woods, T.N., and 15 co-authors (1996) Validation of the UARS solar ultraviolet irradiances: Comparison with Atlas 1 and 2 measurements. *J Geophys Res* 101, D6, 9541-9569

