

Messungen der spektralen optischen Aerosoldicke mit einem Sunphotometer im Raum Innsbruck

von

Alois BLASBICHLER, Mario BLUMTHALER & Walter AMBACH *)

Spectral aerosol optical depth in the area around Innsbruck determined with a Sunphotometer

Synopsis: A hand held Sunphotometer was used to determine aerosol optical depth in the area around Innsbruck at different atmospheric conditions. The instrument was equipped with a standard set of 5 narrow-band interference filters and with 4 optional narrow-band interference filters, covering the wavelengthrange from 368 nm to 1024 nm. The Sunphotometer was frequently calibrated by use of the Langley plot method. The calibration constants of the 5 standard filters remained stable within $\pm 2\%$. On the contrary, the calibration constants of the 4 optional filters showed a strong change with time. As a consequence, it is necessary to recalibrate the optional filters within about 1 month before or after the measurements. In general, the Sunphotometer data agree well with simultaneous actinometric and spectral measurements of the aerosol optical depth up to 500 nm. The Sunphotometer measurements of aerosol optical depth was used to determine the Ångström quantities α and β , showing a broad variation. In Innsbruck, α ranges from 0.8 to 1.7 and β from 0.025 to 0.15, depending on the actual atmospheric condition.

1. Einleitung:

Im Zusammenhang mit der Abnahme des stratosphärischen Ozons (STOLARSKI et al. 1992) und dem damit verbundenen Anstieg der solaren UV-Strahlung (CRUTZEN 1992), gewinnt die Bestimmung der optischen Aerosoldicke an Bedeutung, weil an wolkenlosen Tagen die Intensität der solaren UV-Strahlung neben der Ozonkonzentration auch durch die Menge, Art und Verteilung der Aerosole in der Atmosphäre bestimmt ist. An Tagen mit Bewölkung ist der dominierende Einfluß auf die solare UV-Strahlung durch Menge und Art der Bewölkung gegeben (BLUMTHALER et al. 1994).

Messungen der optischen Aerosoldicke wurden früher vor allem mit Aktinometern durchgeführt. Diese sind mit breitbandigen Kantenfiltern (Quarzfilter, OG1-, RG2-, RG8-Filter) ausgerüstet und erlauben die Angabe der optischen Aerosoldicke nur für einen breiten Wellenlängenbereich (KUHN 1972). Aktinometer zeichnen sich besonders durch Langzeitstabilität aus. Ein neuer Trend ging hin zu schmalbandigen Messungen der optischen Aerosoldicke mit Geräten, die mit schmalbandigen Interferenzfiltern ausgerüstet sind (Sunphotometer). Diese Geräte zeigen jedoch gerätetechnische Probleme in der Langzeitstabilität der Interferenzfilter (BASHER & MATTHEWS 1977). Das Sunphotometer, das für die vorliegenden Messungen verwendet wurde, ist mit neun Interferenzfiltern ausgestattet und erlaubt die Bestimmung des spektralen Verlaufes der optischen Aerosoldicke zwischen 368 nm und 1024 nm.

*) Anschriften der Verfasser: Mag. rer. nat. A. Blasbichler, Ass.-Prof. Univ.-Doz. Dr. phil. M. Blumthaler, o. Univ.-Prof. Mag. rer. nat. Dr. phil. W. Ambach, Institut für Medizinische Physik, Müllerstraße 44, A-6020 Innsbruck, Österreich.

Zur Angabe der spektralen optischen Aerosoldicke werden üblicherweise die Ångström'schen Parameter α und β verwendet (ÅNGSTRÖM 1929). Dabei charakterisiert α im wesentlichen die Größenverteilung der Aerosole und β die Konzentration der Aerosole.

2. Meßgeräte und Meßmethode:

Das Sunphotometer (Firma Noll) ist mit neun schmalbandigen Interferenzfiltern ausgestattet. Das Standardset von 5 Interferenzfiltern, mit den optischen Schwerpunkten bei 368, 500, 675, 778 und 862 nm, wurde um 4 Interferenzfilter mit den optischen Schwerpunkten bei 412, 450, 610 und 1024 nm erweitert. Die Halbwertsbreite (FWHM) der Interferenzfilter wird mit 2 - 5 nm angegeben. Der Öffnungswinkel des Sunphotometers beträgt 2.2° . Das Sunphotometer ist mit einem Diopter zum Anvisieren der Sonne ausgestattet. Die Datenerfassung erfolgt mittels interner Elektronik und interner Speicherung und späterer Übertragung auf einen PC. Da das Sunphotometer keine Temperaturstabilisierung besitzt, wird die Gerätetemperatur laufend gemessen und die Meßdaten werden für die Auswertung temperaturkorrigiert. Für eine Messung mit neun Interferenzfiltern werden ca. 5 min benötigt.

Die Eichung des Sunphotometers und die Bestimmung der optischen Aerosoldicke basieren auf dem Lambert-Beerschen Gesetz

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) e^{-(\tau_R \cdot m_R + \tau_O \cdot m_O + \tau_A \cdot m_A)}$$

$S(\lambda)$ ist das gemessene relative Signal der direkten Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge (λ) und $S_0(\lambda)$ das relative spektrale Signal der direkten Sonnenstrahlung, das mit dem Sunphotometer außerhalb der Atmosphäre gemessen würde. $S_0(\lambda)$ wird als spektraler Eichfaktor bezeichnet. τ_R , τ_O und τ_A sind die optischen Dicken der Rayleighstreuung, der Ozonabsorption und der Aerosolextinktion und m_R , m_O und m_A sind die entsprechenden relativen optischen Massen. Es werden für die Abschwächung der direkten Sonnenstrahlen in der Atmosphäre nur Rayleighstreuung, Ozonabsorption und Aerosolextinktion berücksichtigt, weil die optischen Schwerpunkte der Interferenzfilter so gewählt sind, daß sie keinen Absorptionsbanden anderer Gase in der Atmosphäre entsprechen. Zur Berechnung der relativen optischen Massen und der optischen Dicken der Rayleighstreuung und Ozonabsorption wurde ein Schichtenmodell der Atmosphäre verwendet (HUBER et al. 1995). Der aktuelle Ozonwert wurde meist simultan mit einem hochauflösenden Spektrometer (HUBER et al. 1995) gemessen, ansonsten wurde er vom Light Climatic Observatory (Arosa, Schweiz) übernommen.

Das Sunphotometer wurde mit der Langley-Methode geeicht. Diese erlaubt das relative spektrale Signal außerhalb der Atmosphäre (spektraler Eichfaktor $S_0(\lambda)$) zu ermitteln, indem das gemessene relative spektrale Signal der direkten Sonnenstrahlung auf die relative optische Masse Null für Aerosole extrapoliert wird. Diese Methode setzt voraus, daß keine Störung der direkten Sonnenstrahlung durch Bewölkung und ein konstanter Wert der optischen Aerosoldicke über die Meßzeit vorliegt. Die Eichfaktoren wurden vorwiegend im Hochgebirge bestimmt, weil dort am ehesten über einen Tag zeitlich konstante atmosphärische Bedingungen vorgefunden werden. Abb. 1 zeigt für Messungen am 12.10.1995 auf der Seegrube bei Innsbruck (Österreich, 1905 m) modifizierte Langley-Plots, bei denen der Unterschied der verschiedenen relativen optischen Massen, m_R , m_O und m_A , berücksichtigt wird (SCHMID & WEHRLI 1995). Das logarithmierte relative spektrale Signal $\ln(S(\lambda)) + \tau_R m_R + m_{O\tau O}$ ist für die neun Interferenzfilter des Sunphotometers in Abhängigkeit von der relativen optischen Masse für Aerosole m_A dargestellt. $S_0(\lambda)$ ist durch den Abschnitt auf der y-Achse bei $m_A = 0$ bestimmt.

Die Eichfaktoren der vier nicht zum Standardset des Sunphotometers gehörigen Interferenzfilter, zeigten starke Veränderungen mit der Zeit, nämlich bis zu 60 % in 2 Jahren. Abb. 2 zeigt die prozentuellen Änderungen der Eichfaktoren der einzelnen Interferenzfilter für die Eich-

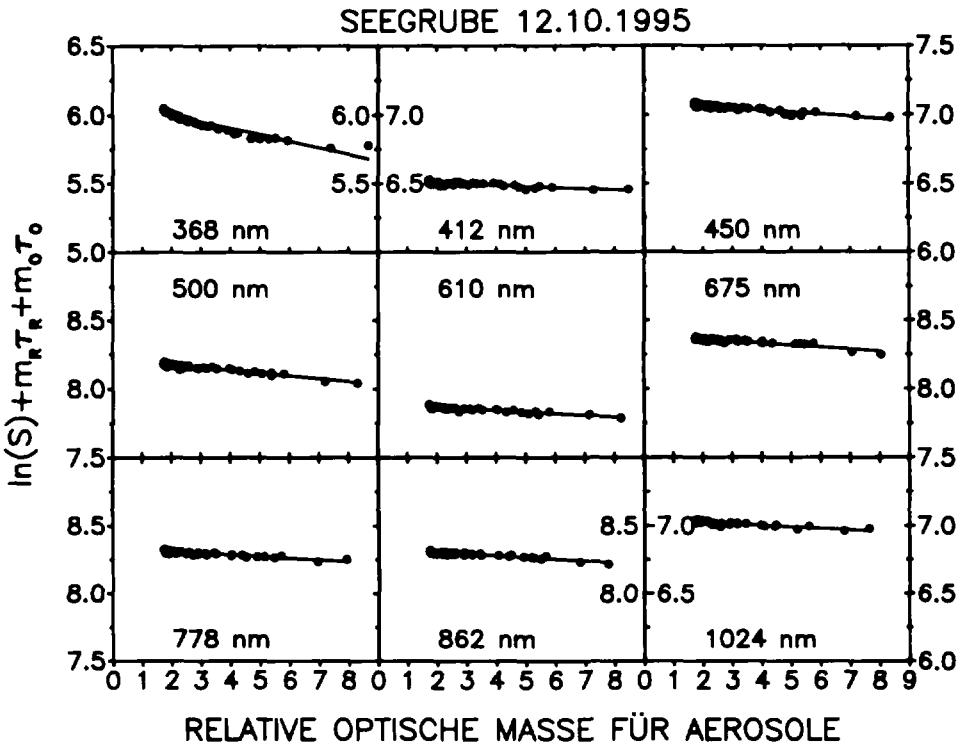


Abb. 1: Logarithmiertes relatives spektrales Signal, korrigiert mit der Abschwächung durch Rayleighstreuung, (λ_{RMR}) und Ozonabsorption ($m_O \tau_O$), für die neun Interferenzfilter des Sunphotometers gegen die relative optische Luftmasse für Aerosole m_A (modifizierte Langley-Plots), für den 12.10.1995 auf der Seegrube bei Innsbruck (1905 m).

tage. Mit den vier nicht zum Standardset gehörigen Interferenzfiltern ergab sich eine verlässliche Bestimmung der optischen Aerosoldicke nur, wenn die Messung zeitlich nahe an einer Eichung lag. Zeitliche Veränderungen von Interferenzfiltern sind möglich, so geben z. B. BRUEGGE et al. (1992) eine Änderung der Eichfaktoren der Interferenzfilter eines Reagan Sunphotometers von 20 % in 2 Jahren an.

Die mit den neun Interferenzfiltern des Sunphotometers bestimmten optischen Aerosoldicken wurden mit den Messungen der optischen Aerosoldicke mit zwei unabhängigen Geräten verglichen (Aktinometer, hochauflösendes Spektrometer).

Erstens wurde mit einem Aktinometer (Kipp & Zonen) (BLUMTHALER et al. 1993), ausgerüstet mit Quarz- und OG1-Filter, breitbandig optische Aerosoldicken vergleichsweise bestimmt. Für diesen breitbandigen Bereich, nämlich vom kurzwelligen Beginn des Sonnenspektrums bis 525 nm, erhält man die optische Aerosoldicke für den optischen Schwerpunkt bei 427 nm. Die Absoluteichung des Aktinometers erfolgte am World Radiation Center in Davos (Schweiz).

Zweitens wurde mit einem hochauflösenden Spektrometer (Bentham) (BLUMTHALER et al. 1993) der spektrale Verlauf der optischen Aerosoldicke vergleichsweise bestimmt. Das hochauflösende Spektrometer erlaubt die Bestimmung der optischen Aerosoldicke durch Messungen der direkten Sonnenstrahlung von 290 nm bis 500 nm in 0.5 nm Schritten mit einer Halbwerts-

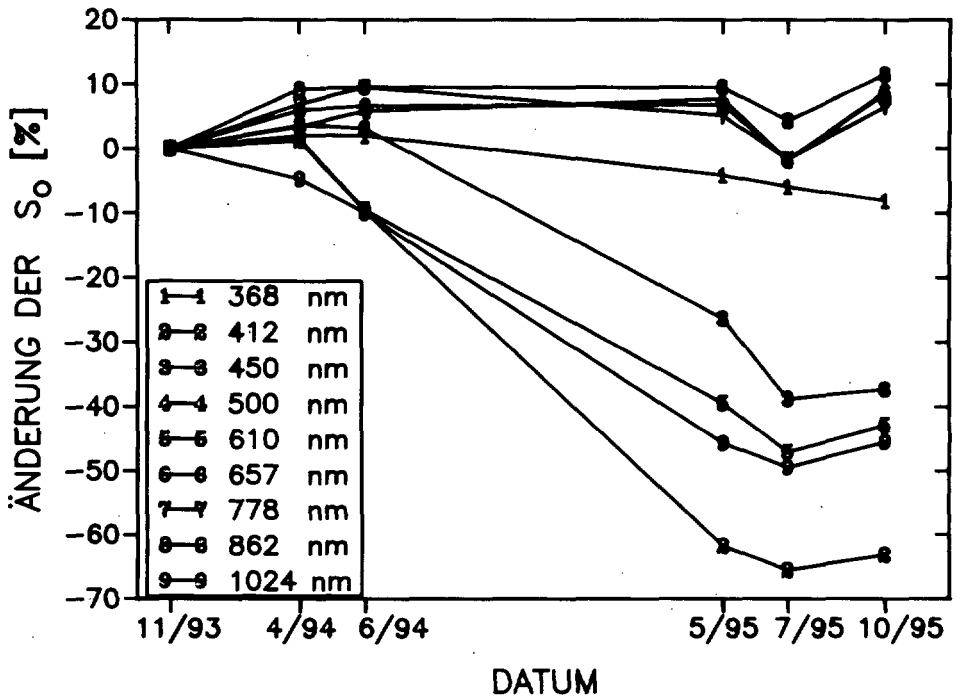


Abb. 2: Zeitliche Änderung der Eichfaktoren (S_0) für die neun Interferenzfilter des Sunphotometers für sechs Eichungen nach der Langley-Methode zwischen November 1993 und Oktober 1995. Die Änderungen wurden in Prozent relativ zur ersten Eichung im November 1993 dargestellt.

breite (FWHM) von 0.6 nm. Im Gegensatz zum Sunphotometer wird das hochauflösende Spektrometer im Labor mittels einer Lampe absolut geeicht. Somit können zur Berechnung der optischen Aerosoldicke die spektralen Intensitäten bei einer beliebigen optischen Luftmasse direkt mit einem absoluten extraterrestrischen Spektrum aus der Literatur verglichen werden (VANHOOSIER et al. 1987; VANHOOSIER et al. 1988).

3. Ergebnisse und Diskussion:

Es wurden in Innsbruck (Österreich, 577 m) zwischen März 1994 und Oktober 1995 an 25 Tagen mit geringer Bewölkung und sonst unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen Messungen der optischen Aerosoldicke durchgeführt. Weiters wurde am 03.05.1995 am Hafelekar bei Innsbruck (2.300 m) und am 12.10.1995 auf der Seegrube bei Innsbruck (1905 m) die optische Aerosoldicke gemessen. Abb. 3 zeigt als Beispiel die am 02.05.1995 in Innsbruck gemessenen optischen Aerosoldicken in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe für die optischen Schwerpunkte der neun Interferenzfilter des Sunphotometers. Zum Vergleich sind die mit dem hochauflösenden Spektrometer bei den Wellenlängen 368, 412, 450 und 500 nm und die mit dem Aktinometer bestimmten optischen Aerosoldicken bei 450 nm eingetragen.

Die angegebenen Fehlerbalken für die Ergebnisse des Sunphotometers resultieren aus $\pm 4\%$ Unsicherheit der Bestimmung des Quotienten $S_0(\lambda)/S(\lambda)$. Die angegebenen Fehlerbalken für die Ergebnisse des hochauflösenden Spektrometers sind durch $\pm 4\%$ Unsicherheit der spek-

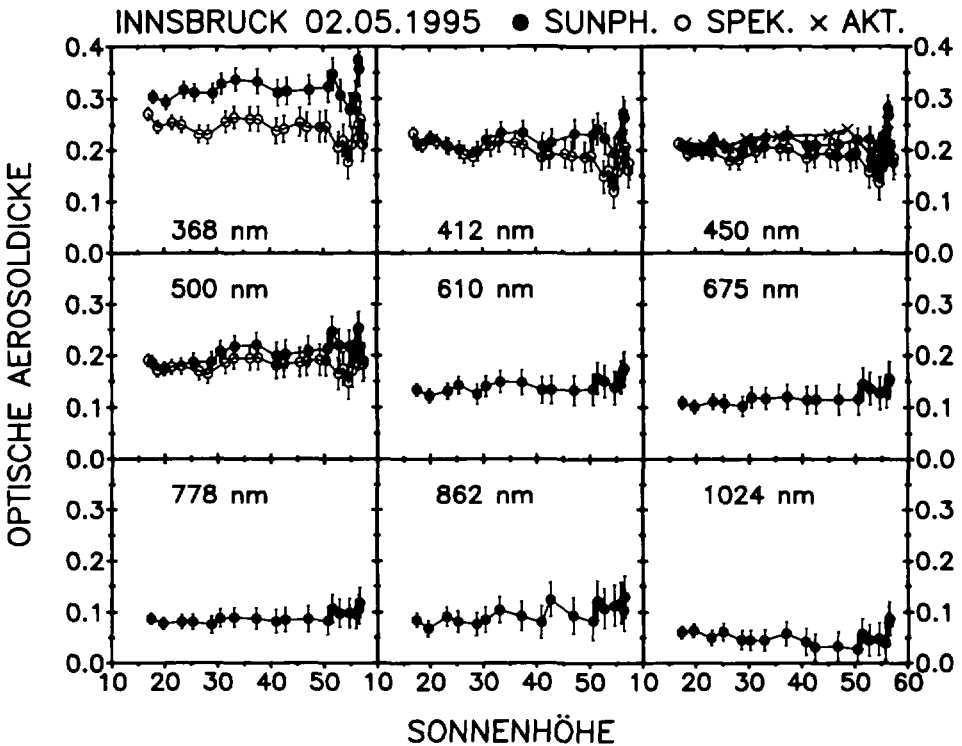


Abb. 3: Optische Aerosoldicken in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe für die optischen Schwerpunkte der neun Interferenzfilter des Sunphotometers im Vergleich zu den mit dem hochauflösenden Spektrometer und dem Aktinometer bestimmten Werten (02.05.1995, Innsbruck, 577 m). Aktinometrisch bestimmte optische Aerosoldicken (optischer Schwerpunkt 427 nm) wurden im Plot für 450 nm eingezeichnet.

tralen Intensitätsbestimmung der Einzelmessung und der Kalibrierung bedingt. Für die Interferenzfilter des Sunphotometers mit den optischen Schwerpunkten 412, 450 und 500 nm überlappen sich die Fehlerbalken für die optischen Aerosoldicken aus Messungen mittels Sunphotometer und hochauflösendem Spektrometer, so daß eine zufriedenstellende Übereinstimmung vorliegt. Nur für den Interferenzfilter mit dem optischen Schwerpunkt 368 nm ergibt sich eine systematisch erhöhte optische Aerosoldicke mittels Sunphotometer gegenüber dem hochauflösenden Spektrometer. Dieser systematisch erhöhte Wert ist durch eine zusätzliche Transmission dieses Interferenzfilters im Spektralbereich zwischen 310 nm und 330 nm verursacht, was durch Labormessungen bestätigt wurde. Die Meßergebnisse bei 368 nm mit dem hochauflösenden Spektrometer werden als zuverlässiger gewertet als jene mit dem Sunphotometer. Für die Interferenzfilter des Sunphotometers mit den optischen Schwerpunkten $\lambda > 500$ nm sind mit dem hochauflösenden Spektrometer keine Vergleichsmessungen möglich.

Der optische Schwerpunkt der aktinometrisch breitbandig bestimmten optischen Aerosoldicke liegt bei 427 nm und somit zwischen den nominellen optischen Schwerpunkten 412 nm und 450 nm der Interferenzfilter des Sunphotometers. Somit wurde in Abb. 3 die aktinometrisch breitbandig bestimmte optische Aerosoldicke zum Vergleich mit jener mittels Sunphotometer bestimmten im Plot für 450 nm eingetragen. Die aktinometrisch breitbandig bestimmten optischen Aerosoldicken stimmen mit Werten aus Messungen mittels Sunphotometer gut überein.

INNSBRUCK 02.05.1995

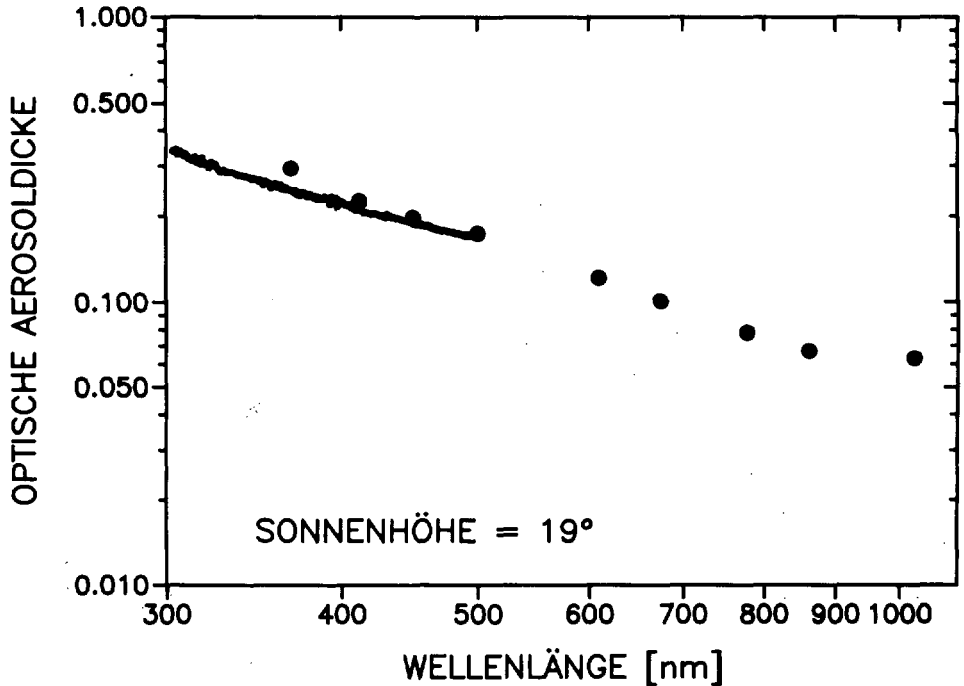


Abb. 4: Doppellogarithmische Darstellung der optischen Aerosoldicke gegen die Wellenlänge für eine Messung mittels Sunphotometer (Punkte) und hochauflösendem Spektrometer (ausgezogene Linie) bei einer Sonnenhöhe von 19° (02.05.1995, Innsbruck, 577 m).

Für denselben Meßtag wie in Abb. 3 ist der spektrale Verlauf der optischen Aerosoldicke aus Messungen mittels Sunphotometer und hochauflösendem Spektrometer beispielsweise in Abb. 4 für die Sonnenhöhe 19° dargestellt. Entsprechend dem Ångströmschen Ansatz der optischen Aerosoldicke

$$\tau_A(\lambda) = \beta(\lambda/\lambda_0)^{-\alpha}$$

ergibt sich im doppellogarithmischen Plot mit der Referenzwellenlänge $\lambda_0 = 1000$ nm ein linearer Zusammenhang zwischen optischer Aerosoldicke und Wellenlänge. Aus Abb. 4 resultiert $\beta \approx 0.06$ und $\alpha \approx 1.4$. Aus den mit dem Sunphotometer gemessenen Tagesmittelwerten der optischen Aerosoldicke für die 25 Meßtage in Innsbruck wurde der Mittelwert und die Standardabweichung der optischen Aerosoldicke bestimmt und in Abb. 5 in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Zusätzlich wurden die Tagesmittelwerte der optischen Aerosoldicke aus Messungen mit dem Sunphotometer für den 03.05.1995 am Hafelekar und den 12.10.1995 auf der Seegrube eingezeichnet. Die Meßpunkte für Innsbruck spiegeln die Variabilität der optischen Aerosoldicke in Innsbruck wieder, während die Meßpunkte vom Hafelekar und von der Seegrube die speziellen Aerosolverteilungen an den bestimmten Tagen am jeweiligen Meßort wiedergeben. Daraus erklärt sich auch der am Hafelekar erhöhte Wert der optischen Aerosoldicke gegenüber dem der Seegrube. Für Innsbruck ergibt sich aus Abb. 5 als mittlerer Wert $\beta = 0.06 \pm 0.02$ und $\alpha = 1.3 \pm 0.2$.

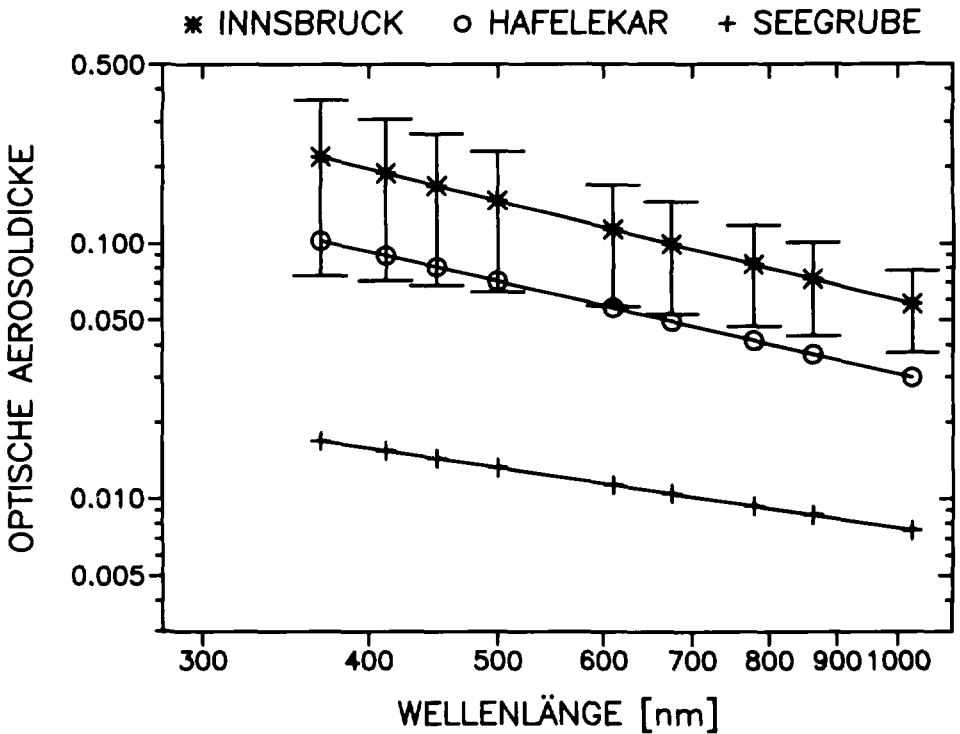


Abb. 5: Doppellogarithmische Darstellung der optischen Aerosoldicken aus Messungen mittels Sunphotometer gegen die Wellenlänge. Dargestellt sind die Tagesmittelwerte der optischen Aerosoldicke für den 03.05.1995 am Hafelekar bei Innsbruck (2300 m) und für den 12.10.1995 auf der Seegrube bei Innsbruck (1905 m) und Mittelwert und Standardabweichung aus 25 Tagesmittelwerten (März 1994 bis Oktober 1995) in Innsbruck (577 m).

In Abb. 6 sind für die drei Meßorte die Momentanwerte α und β gegenübergestellt. Die unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen an den 25 Meßtagen in Innsbruck spiegeln sich in der Streuung der Meßpunkte von Innsbruck wieder. In Innsbruck wurden Werte für β von 0,025 bis 0,15 und Werte für α von 0,8 bis 1,7 gemessen. Die große Variabilität von β um den Faktor 10 hängt von der Wetterlage, Windrichtung und anderen Faktoren wie Verkehr und Hausbrand ab. Am 12.10.1995 wurden auf der Seegrube sehr kleine Werte für α und β gemessen, während die Werte für den 03.05.1995 am Hafelekar noch in der Bandbreite der Messungen von Innsbruck liegen.

4. Schlußbemerkungen:

Das Sunphotometer und insbesondere die nicht zum Standardset gehörenden Interferenzfilter erscheinen technisch nicht optimal ausgereift. Liegen Eichung und Messung der optischen Aerosoldicke zeitlich nahe beisammen, dann ist der spektrale Verlauf der optischen Aerosoldicke aus Messungen mittels Sunphotometer in guter Übereinstimmung mit Werten, die gleichzeitig mittels eines hochauflösenden Spektrometers ermittelt wurden. Die Beschreibung der optischen Aerosoldicke durch den Ångströmschen Ansatz und die Charakterisierung der Aerosole durch die Parameter α und β haben sich bei der Analyse der vorliegenden Meßdaten bewährt. Wegen

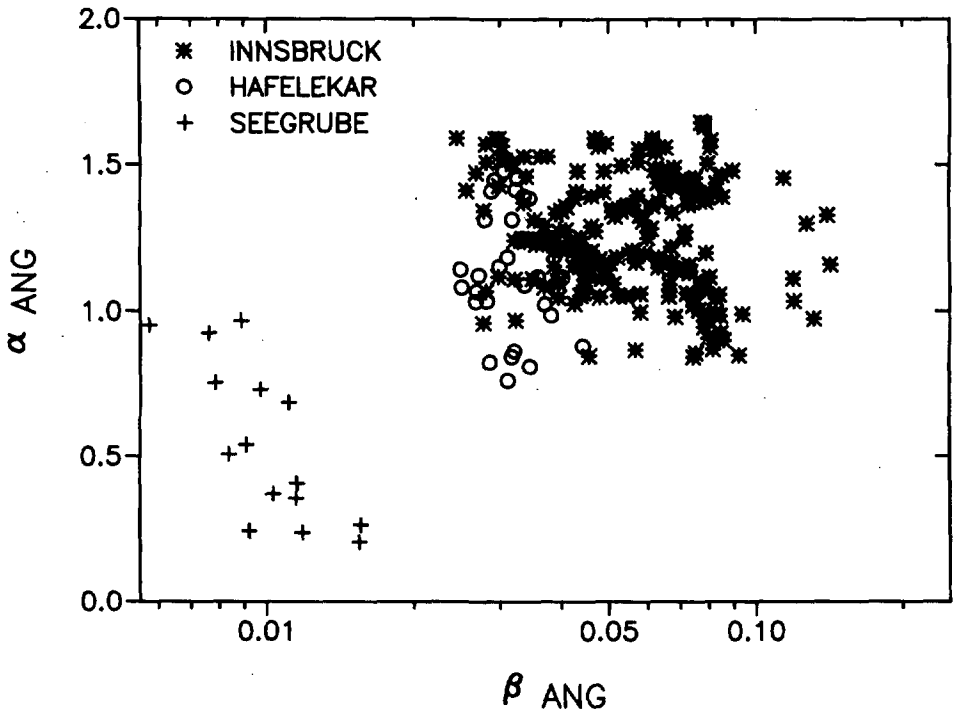


Abb. 6: Angströmsche Parameter α gegen β aus Messungen mittels Sunphotometer an 25 Tagen (März 1994 bis Oktober 1995) in Innsbruck (577 m), am 03.05.1995 am Hafelekar bei Innsbruck (2300 m) und am 12.10.1995 auf der Seegrube bei Innsbruck (1905 m).

der großen tageszeitlichen Variabilität der optischen Aerosoldicke in Tallagen sind dort Eichungen mit der Langley-Methode nicht sinnvoll. Für Messungen in Tallagen müssen Eichfaktoren herangezogen werden, die auf einer früheren Meßkampagne im Hochgebirge bestimmt worden sind. Daher sind so bestimmte optische Aerosoldicken relativ unsicher.

Dank: Für die finanzielle Unterstützung wird dem Nationalkomitee für das International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und dem Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung gedankt.

5. Zusammenfassung:

Mit einem Sunphotometer, ausgerüstet mit neun schmalbandigen Interferenzfiltern von 368 nm bis 1024 nm, wurde im Raum Innsbruck die optische Aerosoldicke bei verschiedenen atmosphärischen Bedingungen bestimmt. Vier Interferenzfilter, die nicht zum Standardset des Sunphotometers gehören, sondern als Option verfügbar sind, zeigten zeitliche Instabilitäten des Eichfaktors, so daß damit Messungen der optischen Aerosoldicke nur in kurzem Zeitabstand zur Eichung sinnvoll sind. Die Eichung wurde mit der Langley-Methode durchgeführt. Für Wellenlängen kleiner 500 nm wurden die gemessenen optischen Aerosoldicken mit jenen verglichen, die mit einem hochauflösenden Spektrometer bestimmt wurden, ebenso wurden zum Vergleich aktinometrisch breitbandig bestimmte optische Aerosoldicken im optischen Schwerpunkt 427 nm herangezogen. Es ergab sich im allgemeinen eine gute Übereinstimmung der so bestimmten opti-

schen Aerosoldicken. Die Charakterisierung der optischen Aerosoldicken erfolgte mit den Ångströmschen Parametern α und β . In Innsbruck wurden Werte für α von 0.8 bis 1.7 und für β von 0.025 bis 0.15 gemessen.

6. Literatur:

- ÅNGSTRÖM, A. (1929): On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. — *Geografis. Annal.* **2**: 156 - 166.
- BASHER, R.E. & A. MATTHEWS (1977): Problems in the Use of Interference Filters for Spectrophotometric Determination of Total Ozone. — *J. Appl. Meteor* **16**: 795 - 802.
- BLUMTHALER, M., M. HUBER & W. AMBACH (1993): Measurements of direct and global UV spectra under varying turbidity. — *Atmospheric Radiation, Europto Series, Volume 2049*, 195 - 198.
- BLUMTHALER, W. AMBACH & M. SALZGEBER (1994): Effects of Cloudiness on Global and Diffuse UV Irradiance in a High-Mountain Area. — *Theor. Appl. Climatol.* **50**: 23 - 30.
- BRUEGGE, C.J., R.N. HALTHORE, B. MARKKHAM, M. SPANNER & M. WRIGLEY (1992): Aerosol optical depth Retrievals over the Konza Prairie. — *J. of Geophysical Research* **97** (D17): 18743 - 18758.
- CRUTZEN, P.J. (1992): Ultraviolet on the increase. — *Nature* **356**: 104 - 105.
- HUBER, M., M. BLUMTHALER & W. AMBACH (1995): Total atmospheric ozone determined from spectral measurements of direct solar irradiance. — *Geophys. Res. Lett.* **22**: 53 - 56.
- KUHN, M. (1972): Die spektrale Transparenz der antarktischen Atmosphäre Teil 1: Meßinstrumente und Rechenmethoden. — *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B*, **20**: 207 - 248.
- SCHMID B. & C. WEHRLI (1995): Comparison of Sun Photometer Calibration by the Langley Technique and the Standard Lamp. — *Applied Optics.*, Vol **34/21**: 4500 - 4512.
- STOLARSKI R., R. BOJKOV, L. BISHOP, C. ZEREFOS, J. STAEHELIN & J. ZAWODNY (1992): Measured trends in stratospheric ozone. — *Science* **256**: 342 - 349.
- VANHOOSIER M.E., J.D.F. BARTOE, G.E. BRUECKNER & D.K. PRINZ (1987): Solare irradiance measurements 120 nm - 400 nm from Spacelab-2 (Results from the SUSIM Experiment). — Präsentiert bei der IUGG XIX General Assembly, Vancouver.
- VANHOOSIER M.E., J.D.F. BARTOE, G.E. BRUECKNER & D.K. PRINZ (1987): Absolute Spectral Irradiance 120 nm - 400 nm (Results from the Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor — SUSIM-Experiment on Board Spacelab 2). — *Astro. Lett. and Communications* **27**: 163 - 168.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte des naturwissenschaftlichen-medizinischen Verein Innsbruck](#)

Jahr/Year: 1996

Band/Volume: [83](#)

Autor(en)/Author(s): Ambach Walter, Blumthaler Mario, Blasbichler Alois

Artikel/Article: [Messungen der spektralen optischen Aerosoldicke mit einem Sunphotometer im Raum Innsbruck. 15-23](#)