

ANNALEN DER METEOROLOGIE

(Neue Folge)

Nr. 12

Die Meteorologen-Tagung  
in Garmisch-Partenkirchen

vom 13. bis 16. April 1977

Offenbach a. M. 1977

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

## DIE ALBEDO VON WOLKEN

Hartmut Graßl

Max-Planck-Institut für Meteorologie  
Hamburg

Das Verhältnis von reflektierter Strahlungsflußdichte  $F_{\text{refl}}$  zur einfallenden Strahlungsflußdichte wird als Albedo bezeichnet. Die Albedo von Wolken ist ein entscheidender Klimafaktor für den Planeten Erde. Denn wegen der Allgegenwärtigkeit von Wolken in fast allen Klimazonen und ihrer überdurchschnittlichen Albedo wird nicht nur das Gesamtenergieangebot für die Erde von den Wolken gesteuert, sondern auch über die Abstrahlung im Langwelligen die Strahlungsbilanz mitbestimmt. Die hier behandelten Wolken bestehen aus Tröpfchen nicht reinen Wassers. Der Verunreinigungsgrad ist eine Funktion der vor der Kondensation vorhandenen Aerosolgrößenverteilung und deren chemischer Zusammensetzung, sowie der bei der Wolkenbildung erreichten Übersättigung.

In einem planparallelen Modell der Strahlungsübertragung mit gemessener Aerosolabsorption soll nun die Schwankungsbreite der Wolkenalbedo und der Einfluß der Größenverteilung, der Kondensationskerne und der resultierenden Tröpfchengrößen auf die Albedo abgeschätzt werden. Der dabei betrachtete Spektralbereich von  $0.3-3.7 \mu\text{m}$  schließt 99% der Strahldichte der Sonne ein. Bei den Albedorechnungen wurden stets auch die Absorption und die Transmission sowie die Divergenzen der Nettostrahlungsflußdichte innerhalb der Wolke bestimmt, so daß am Rande auch über diese Größen Aussagen gemacht werden.

### WICHTIGE MATERIALKONSTANTEN

Die eine Wolke in Richtung  $\hat{s}$  an der Obergrenze  $z$  verlassende Strahldichte  $I(z, \hat{s})$ , aus der bei Integration über den Halbraum eine Strahlungsflußdichte  $F_{\hat{s}}$  wird, hängt außer von der Mächtigkeit der Wolke im wesentlichen ab von folgenden durch die beteiligte Materie bestimmten Größen:

- 1) Streufunktion der mit dem elektromagnetischen Feld wechselwirkenden Materie, hier hauptsächlich der Wolken-tröpfchen,
- 2) Absorption durch Tröpfchen, Aerosolteilchen und Gase,
- 3) Konzentration der Streuer und Absorber.

Die unter 1) genannte Streufunktion ist wiederum Funktion der Größenverteilung des Kondensationskernspektrums, der erreichten Übersättigung (proportional zur Vertikalgeschwindigkeit) und wegen der

Koaleszenz von Tröpfchen des Lebensalters der Wolke. In geringem Maße wird die Streufunktion auch von der chemischen Zusammensetzung der Aerosolteilchen bestimmt. Als Beispiel für die Schwankungsbreite der Absorption eines Aerosolteilchen-Wasser-Gemisches dient Bild 1. Für die Kombination verschiedener Aerosolgrößenverteilungen nach DEIRMENDJIAN (1969) bei bekannten gemessenen spektralen Absorptionskoeffizienten  $k_{\lambda}$  der Aerosolteilchen nach FISCHER (1975) mit der Größenverteilung für Wolken-tröpfchen G1 ebenfalls nach DEIRMENDJIAN (1969) zeigt Bild 1 die Größe  $(1-\omega_0)$  ( $\omega_0$  = 'single scattering albedo'), welche gleich dem Verhältnis zwischen Absorptions- und Extinktionskoeffizient ist. Die zunächst sehr klein erscheinenden Werte fallen jedoch im sichtbaren Spektralbereich mit dem Maximum der solaren Strahldichte zusammen und führen daher trotzdem zu beträchtlicher zusätzlicher Absorption innerhalb der Wolke und damit bei konstanten anderen Materialeigenschaften zu reduzierter Albedo.

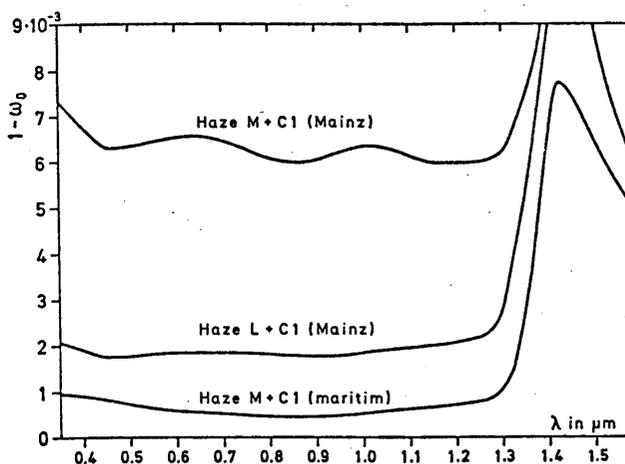
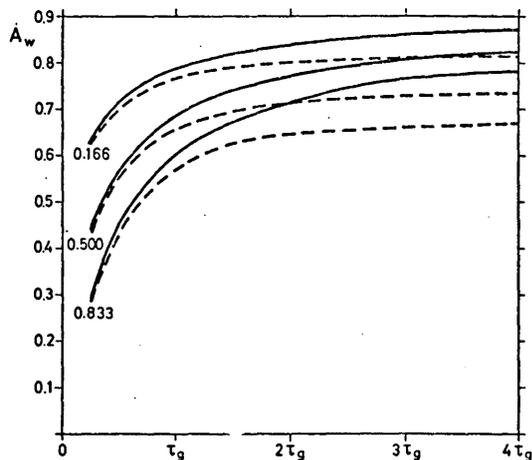


Bild 1:  $(1-\omega_0)$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  für drei verschiedene Kombinationen aus Größenverteilungen für Aerosolteilchen und einer Wolke bei Verwendung gemessener Aerosolteilchen-Absorption in verschiedenen Klimagebieten (Angaben in Klammern).

Die Transmissionsfunktion der atmosphärischen Gase oberhalb, unterhalb und in der Wolke wurde mit auf Messungen basierenden spektralen Daten nach MOSKALENKO (1969) berechnet. Für jedes der maximal 14 Spektralintervalle wurde diese Transmissionsfunktion in einer Exponentialreihe mit sechs Gliedern entwickelt. Diese Prozedur ist äquivalent zu einer Unterteilung des Intervalles in Bereiche verschieden starker Absorption, welche in jedem Teilbereich eines Intervalles dem einfachen Lambertschen Gesetz folgt. Diese Form der Transmissionsfunktion ist für das verwendete Rechenverfahren notwendig (Matrix-Operator-Theorie) welches PLESS u. a. (1973) folgt.

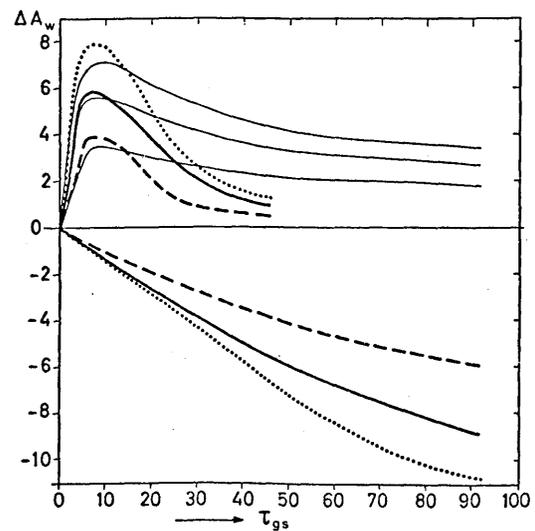
#### ERGEBNISSE

Um mehr Klarheit über die Wirkung einzelner Materialkonstanten wie der Absorptionskoeffizienten von Aerosolteilchen oder des Tröpfchenradius zu bekommen, soll zunächst nur der Einfluß absorbierender Aerosols und dann der veränderter Teilchenzahl und Teilchengröße besprochen werden. Abschließend werden Albedovariationen beim Übergang von Reinluftgebieten in solche mit hoher Teilchenzahl betrachtet. Klar ist in Bild 2 neben der Albedoerhöhung beim Anwachsen der optischen Dicke die albedoerniedrigende Wirkung absorbierender Aerosolteilchen erkennbar. Auch mit der Zenitdistanz der Sonne steigt die Albedo von Wolken an.



**Bild 2:** Albedo  $A_w$  einer Stratuswolke als Funktion der optischen Dicke  $\tau = 22.85$  der Wolke für reines Wasser ( $\frac{e}{e_0}$ ) und ein Aerosol-Wasser-Gemisch (----) in den Tröpfchen bei drei Werten  $|\cos \vartheta|$  mit  $\vartheta$  = Zenitwinkel der Sonne und der Wasserdampfmasse von  $0.3 \text{ g/cm}^2$

Die Meßwerte der Aerosolteilchenabsorption vom 28.11.72 in Mainz nach FISCHER (1975), die Wolkenröpfchenverteilung C1, die Aerosolverteilung HAZE L sind dabei in eine Wolke von 430 m Mächtigkeit und einem mittleren Flüssigwassergehalt von  $0.2 \text{ g m}^{-3}$  nach Messungen von GOYSA u. SHOSHIN (1974) eingesetzt worden. In Bild 3 wird nun der Übergang zu einer Wolke in einem stark luftgetrübten Gebiet ausgehend von einem Reinluftgebiet für einzelne Faktoren beschrieben. Die einzelnen Kurvenscharen gelten für die Zunahme der Absorption um den Faktor 10, wie er beim Übergang von maritimer in kontinentale Umgebung häufig gemessen wurde, für die Verkleinerung des mittleren Tröpfchenradius um den Faktor 1.20 und für die Erhöhung der optischen Dicke um den Faktor 1.447 bei Konstanz des Flüssigwassergehaltes. Die Verkleinerung des Tröpfchenradius und die Erhöhung der optischen Dicke um die angegebenen Faktoren ist eine Folge der Vervielfachung der Teilchenzahl pro Volumeneinheit.



**Bild 3:** Änderung der Albedo einer Wolke  $\Delta A_w$  in Prozent der einfallenden Strahlung beim Übergang zu hohen Partikelzahlen und erhöhter Absorption als Funktion der optischen Dicke der Wolke im Reinluftgebiet  $\tau_{gs}$ . Gezeigt werden: 1) Albedoerniedrigende Wirkung zusätzlicher Absorption, 2) Albedoerhöhung durch Reduzierung des mittleren Tröpfchenradius (dünne Linien) und 3) Albedoerhöhung durch Erhöhung der optischen Dicke bei gleichem Flüssigwassergehalt.

Die Summe aller drei die Albedo von Wolken beeinflussenden Effekte aus Bild 3, wie sie in Bild 4 erscheinen, zeigt ein zunächst erstaunliches Ergebnis: Wolken geringer Mächtigkeit, d.h. geringer optischer Dicke sind in Gebieten hoher Aerosolteilchenzahl stärker reflektierend als Wolken aus Reinluftgebieten, selbst dann, wenn beim Übergang von Reinluft zu stark getrüberter Luft die Teilchenabsorption stark zunimmt. Im Bereich hoher optischer Dicken ( $\tau_{gs} \geq 40$ ) ist dann aber die Albedoerniedrigung durch zusätzliche Absorption dominierend.

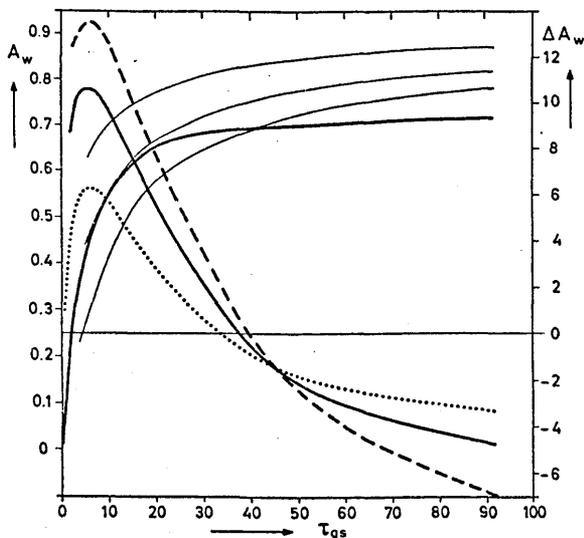


Bild 4: Kombination aller drei Effekte des Bildes 3 zu einem resultierenden  $\Delta A_w$ . Zusätzlich ist die Albedo der Wolke im Reinluftgebiet angegeben

Die gezeigten Albedoänderungen sind so groß, daß sie keineswegs unbeachtet bleiben können. Denn aus ersten groben Abschätzungen der Folgen veränderter Wolkenalbedo für die Zirkulation der Atmosphäre kann für eine einprozentige Änderung der globalen Albedo eine gleichgroße Wirkung wie für die Verdoppelung des Kohlendioxidgehaltes erwartet werden. Die vorgestellten Albedoänderungen können bei Rechnungen in dreidimensionalen Modellen noch etwas verändert werden, wesentliche Änderungen sind aber nicht zu erwarten.

Abschließend sei für eine Stratuswolke nicht nur die Albedo  $A_w$  als Funktion des Zenitwinkels der Sonne, sondern auch die zugehörige relative Absorption  $A$  der ganzen Wolke und die Transmission  $T$  mit und ohne Berücksichtigung der Aerosolabsorption in Tabellenform angegeben. Die Werte in Tabelle 1 gelten für die Wolke aus Bild 2.

Tabelle 1: Albedo  $A_w$ , Absorption  $A$  und Transmission  $T$  einer Wolke wie in Bild 2; bei 3 verschiedenen Zenitwinkeln  $\mu$  der Sonne

$\cos \mu$	$A_w$	$A$	$T$	$A_w$	$A$	$T$
.833	.602	.064	.334	.568	.142	.290
.500	.686	.051	.263	.656	.118	.226
.167	.785	.033	.182	.763	.079	.158
			ohne Aerosol	mit Aerosol		

Wegen der in einer Industriezone gemessenen Aerosolteilchenabsorption wird der aus Tabelle 1 folgende sehr starke Aerosolanteil an der Absorption in Wolken wahrscheinlich eine obere Grenze darstellen. Jedoch auch um den Faktor 3 reduzierte Aerosolbeiträge bleiben im Größenbereich der Absorption durch atmosphärische Gase. Dieses Ergebnis könnte zumindest teilweise die bisher stets höheren gemessenen als berechneten Absorptionswerte in Wolken erklären.

#### LITERATURVERZEICHNIS

Deirmendjian, D.: Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. New York: American Elsevier Publishing Company 1969.

Fischer, K.: Mass absorption coefficient of natural aerosol particles in the 0.4-2.4  $\mu\text{m}$  wavelength interval. Beitr. z. Phys. d. Atm. 46 (1973), S.89-100

Goysa, N.I.; Shoshin, V.M.: Experimental investigations of fluxes of solar radiation in the lower troposphere in St and Sc clouds. NASA TT F-790, Juli 1974, S.78-89

Moskalenko, N.I.: The spectral transmission function in the bands of the water vapour,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , and  $\text{N}_2$  atmospheric components. Izv. Atmosf. a. Ocean. Phys. 5, S. 1179-1190. (1969)

Plass, G.W.; Kattawar, G.E.; Catchings, G.E.: Matrix-operator-theory of radiative transfer. Appl. Opt. 12 (1973), S. 314-329.