

Meteorologisches Institut
- BIBLIOTHEK -
2000 Hamburg 13 • Bundesstraße 55

ANNALEN DER METEOROLOGIE

(Neue Folge)

Nr. 15

Deutsche Meteorologen-Tagung 1980

Offenbach am Main 1980

Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

DIE BESTIMMUNG VERTIKALER TEMPERATURPROFILE IN DER ATMOSPHERISCHEN GRENZSCHICHT AUS STRAHLDICHTEMESSUNGEN IM MIKROWELLENBEREICH

Bernd Schönwald
Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2000 Hamburg 13, Bundesstr. 55

ZUSAMMENFASSUNG

Messungen der Strahldichte im Bereich der Sauerstoffbande zwischen 50 GHz und 70 GHz bei verschiedenen optischen Dicken erlauben Rückschlüsse auf das vertikale Temperaturprofil der Atmosphäre. Die Anwendung iterativer oder statistischer Inversionsprozeduren auf die diskretisierte Strahlungsübertragungsgleichung, ordnet den Strahldichten die Temperaturen zu. Durch die Verwendung von ausgesuchten Startprofilen und angepassten Temperatur-Covarianz-Matrizen wird mit einer modifizierten statistischen Inversionsmethode eine hinreichende Übereinstimmung der wiedergewonnenen Temperaturprofile mit Radiosondendaten erzielt.

PHYSIKALISCHE UND MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN

Sauerstoff zeigt im Frequenzgebiet zwischen 50 GHz und 70 GHz - Wellenlänge 5 mm - eine ausgeprägte Absorptionsbande, bedingt durch das paramagnetische Verhalten der O₂-Moleküle. Obwohl das magnetische Dipolmoment energetisch um etwa 10⁴ kleiner als ein elektrisches Dipolmoment ist, läßt sich dieser Effekt aufgrund des hohen Sauerstoffanteils in der Atmosphäre meßtechnisch auswerten.

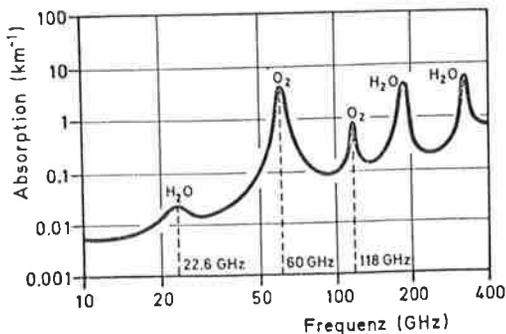


Abb. 1: Atmosphärische Absorption im Mikrowellenbereich

Unter der Annahme, daß die Atmosphäre lokal im thermodynamischen Gleichgewicht ist, erhält man als Lösung der Strahlungsübertragungsgleichung für thermische Emission unter Berücksichtigung der RAYLEIGH-JEANS-Approximation für die Planck-Funktion

$$T_B(\theta, h) = \int_0^{\infty} T(h) \alpha(h) \sec(\theta) \times \exp\left[-\int_0^{h'} \alpha(h') \sec(\theta) dh'\right] dh \quad (1)$$

$\nu = \text{const}$

Dabei ist T_B die äquivalente Strahlungstemperatur, θ der Zenitwinkel, ν die Frequenz, α der Absorptionskoeffizient und T die zu bestimmende thermodynamische Temperatur.

Die Anwendung der monochromatischen Form (Gl. 1) setzt voraus, daß die Bandbreite der Meßsysteme schmal ist.

Der Kern dieser Integralgleichung (1) wird als Gewichtsfunktion bezeichnet. Da nur eine geringe Temperaturabhängigkeit besteht, läßt er sich als Funktion von Höhe und Zenitwinkel darstellen.

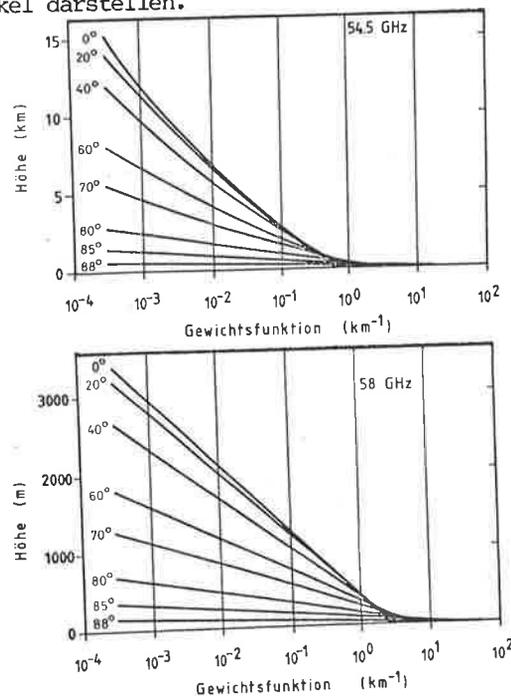


Abb. 2a und 2b: Gewichtsfunktionen in Abhängigkeit des Zenitwinkels für die Frequenzen 54.5 GHz und 58 GHz.

ERGEBNISSE

Abb. 2a und 2b zeigen, daß die Information über die Temperatur in verschiedenen Höhengschichten von der gewählten Meßfrequenz abhängt. Will man die Grenzschicht bis ca. 1500 m Höhe möglichst gut erfassen, ist der Einsatz von zwei Meßsystemen sinnvoll. Eines, das den Höhenbereich optimal erfaßt in dem die größten Temperaturänderungen stattfinden (0 m bis ca. 600 m) und ein zweites System, das ausreichende Informationen über die darüberliegenden Schichten gibt. Diese Überlegung führte zur Wahl der Frequenzen 54.5 GHz und 58 GHz. Die Gewichtsfunktionen der beiden Frequenzen sind in den Abb. 2a und 2b dargestellt.

Um $T(h)$ in Gl. 1 zu bestimmen, muß diese in eine Form endlicher Differenzen gebracht, d.h. die Atmosphäre in dünne homogene Schichten geteilt werden.

$$T_{Bi} = \sum_{j=1}^n K_{ij} T_j \quad i=1,2,\dots,m \quad (2)$$

K ist die Gewichts-Matrix, T_B der Meßvektor und T der Lösungsvektor.

Eine unmittelbare Bestimmung des Temperaturprofils aus dem Gleichungssystem (2) ist nicht möglich, da die Lösung infolge der schlechten Kondition der Gewichts-Matrix und des fehlerbehafteten Meßvektors zur Instabilität neigen.

Invertierungsverfahren die diese Eigenschaften berücksichtigen, wurden z.B. von TWOMEY (1963), WESTWATER (1968) und RODGERS (1970) entwickelt: Die im nächsten Kapitel beschriebenen Ergebnisse sind mit der folgenden modifizierten Form der statistischen Methode der minimalen Varianz erzielt:

$$T = SK^T (KSK^T + E)^{-1} (T_{BM} - T_{Bo}) + T_o \quad (3)$$

S = Temperatur-Covarianz-Matrix eines statistischen Ensembles von Profilen

E = Fehler-Covarianz-Matrix

K = Gewichts-Matrix

K^T = Transponierte der Gewichts-Matrix

T_o ist das mittlere Profil eines statistischen Ensembles von Profilen,

T_{Bo} die dem mittleren Profil entsprechenden Strahlungstemperatur und

T_{Bm} die gemessene Strahlungstemperatur

Für das Wiedergewinnungsverfahren der minimalen Varianz sind Informationen über die Statistik des Temperaturprofils des Meßorts notwendig. Diese sind aber nur in wenigen Fällen vorhanden.

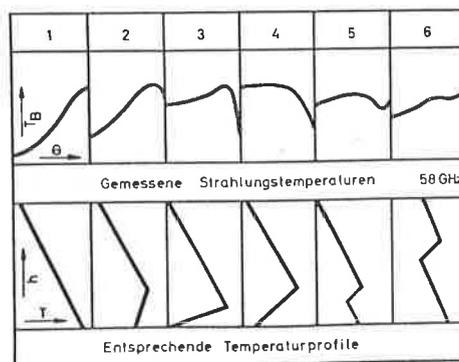


Abb. 3: Darstellung des typischen Verlaufs von gemessenen Strahlungstemperaturen- und den zugehörigen Profiltypen.

Der Verlauf der gemessenen Strahlungstemperatur bei 58 GHz zeigt jedoch bereits so viel Struktur (siehe Abb. 3), daß unmittelbar auf einen aktuellen Profiltyp geschlossen werden kann. Die zu diesem Profiltyp gehörende Temperatur-Covarianz-Matrix kann entweder aus Radiosondenaufstiegen ermittelt oder aber aus simulierten Temperaturprofilen abgeleitet werden; wodurch man vom Meßort unabhängig ist. Ein Vergleich der so gewonnenen Temperaturprofile zeigte keine nennenswerte Differenz. Statt der Covarianz-Matrix wird nur die Varianz-Matrix, d.h. die Elemente der Hauptdiagonalen in der Covarianz-Matrix, verwendet. Diese Vereinfachung schließt eine Korrelation der Temperaturen in den einzelnen Höhengschichten aus und wird aus Gründen der Rechenökonomie benutzt.

Entsprechend des Verlaufs der gemessenen Strahlungstemperatur wird eine Zuordnung innerhalb von drei Profiltypen getroffen (inversionsloses Profil, bodennahe Inversion und abgehobene Inversion) und die zugehörige Temperatur-Varianz-Matrix in Gl. 3 berücksichtigt.

Jeder Profilblock ist noch einmal unterteilt in sich unterscheidende Einzelprofile gleichen Typs (z.B. verschiedene Inversionshöhen etc.). Um ein möglichst gutes Startprofil zu erhalten, wird nach Bestimmung des Profiltyps die minimale quadratische Abweichung zwischen dem Verlauf der gemessenen Strahlungstemperatur und der theoretischen Strahlungstemperatur aus den dem Profilblock zugehörigen simulierten Einzelprofilen ermittelt

$$\sum_{i=1}^m \left(T_{Bi} - \sum_{j=1}^n K_{ij} T_{pj} \right)^2 \stackrel{!}{=} \min \quad (4)$$

$p = 1, 2, \dots, z$

T_{Bi} ist hier die gemessene Strahlungstemperatur.

Das aus den Meßdaten von 58 GHz gewonnene Profil wird als Startprofil für 54.5 GHz verwendet. Hier ist der Kurvenverlauf der gemessenen Strahlungstemperatur wesentlich glatter, so daß eine wie oben beschriebene Unterscheidung ausscheidet. Da das Startprofil jedoch schon sehr genau ist, sind die Abweichungen des wiedergewonnenen Profils vom Radiosondenprofil etwa von der Größenordnung wie bei 58 GHz.

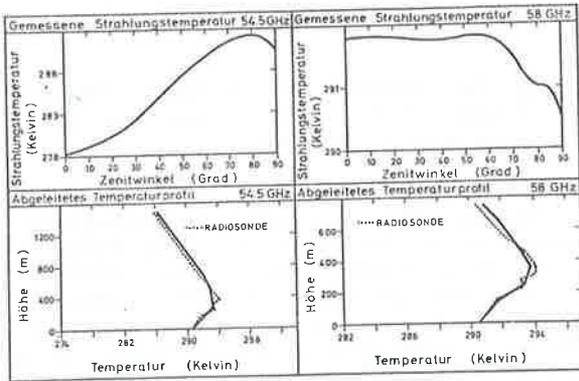


Abb. 4: Vergleich zwischen Radiosondenprofil und wiedergewonnenem Temperaturprofil für den Fall einer bodennahen Inversion.

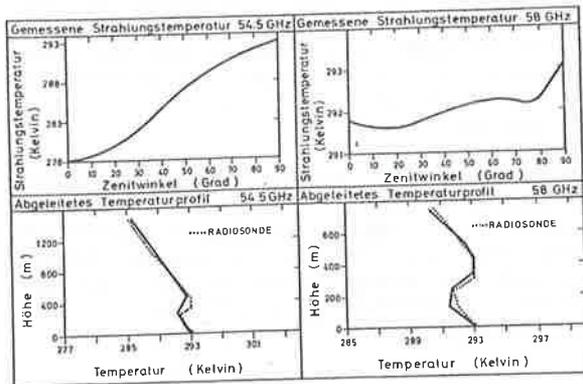


Abb. 5: Vergleich zwischen Radiosondenprofil und wiedergewonnenem Temperaturprofil für den Fall einer abgehobenen Inversion.

Die Abb. 4 und 5 zeigen zwei Beispiele wiedergewonnener Temperaturprofile im Vergleich mit Radiosondenprofilen. Dabei ist zu beachten, daß die Schichtdicke bei 58 GHz 100 m und bei 54.5 GHz 200 m beträgt. Der Grund liegt in der derzeit begrenzten Speicherkapazität des verwendeten Rechners.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die bisher durchgeführten Vergleiche zwischen Radiosondenprofilen und radiometrisch gewonnenen Temperaturprofilen zeigten in etwa 95% der Fälle bis zu einer Höhe von 1000 m Abweichungen im Bereich $\pm 1K$.

Das untersuchte Meßsystem ist mobil, so daß es auch zur Verifizierung von Grenzschichtmodellen (Inversionshöhen) herangezogen werden kann. Die Arbeiten wurden von der DFG unterstützt und die Meßsysteme im Elektronenlabor des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg entwickelt. Der DFG und den Herren Ing. Pucher und Beyer sei noch an dieser Stelle gedankt.

LITERATURHINWEISE

RODGERS, C.D. (1970): Remote sounding of the atmospheric temperature profile in the presence of cloud. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 96, 657-664.

SCHÖNWALD, B.; HINZPETER, H. (1979): Statistical retrieval of temperature profiles for the lower troposphere from ground-based angular microwave radiation measurements. Beitr. Phys. Atmosph. 52, 204-214.

TWOMEY, S. (1963): On the numerical solution of Fredholm integral equations of the first kind by the inversion of the linear system produced by quadrature. J. Assoc. Comp. Mach. 10, 97-101

WESTWATER, E.R.; STRAND, O.N. (1968): Statistical information content of radiation measurements used in indirect sensing. J. Atmos. Sci. 25, 750-758.