BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1955

MÜNCHEN 1956

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Messungen des ultraroten Strahlungsstromes in der freien Atmosphäre

Von **Hans Gerhard Müller** und **Wolfgang Pohl**
in München

Vorgelegt von Herrn Rudolf Geiger am 11. November 1955

Es ist seit langem bekannt, daß in der Energiebilanz der freien Atmosphäre neben advektiven und konvektiven Vorgängen auch die Emission und Absorption ultraroter Strahlung eine Rolle spielt. In den unteren Schichten, der Troposphäre und der Stratosphäre bis etwa 20 km Höhe, die nach dem heutigen Stande unserer Kenntnisse im wesentlichen Träger des Wettergeschehens sind, sind an diesen Absorptions- und Emissionsvorgängen vorzugsweise Wasserdampf und Kohlensäure beteiligt. Bislang beruhte unsere Kenntnis dieser Vorgänge auf Meßergebnissen, die im Laboratorium gewonnen wurden (z. B. von Fowle [1], Adel u. Lampland [2], Randall, Dennison, Ginsburg u. Weber [3]) einerseits und auf rechnerischen Überlegungen (Möller [4], Elsasser [5], Bruinenberg [6], Yamamoto [7]) andererseits. Messungen der Ein- und Ausstrahlung im Gebiet der sichtbaren und der Wärmestrahlung in unmittelbarer Bodennähe liegen in größerem Umfange vor. Für das besonders interessierende Gebiet der freien Atmosphäre jedoch existieren bisher nur wenige (nicht unbedingt repräsentative) Messungen der einzelnen Komponenten des Strahlungsstromes (Ausstrahlung minus Gegenstrahlung) in begrenztem Höhenbereich (ältere Messungen von Ångström [8] und neuere von Houghton und Brewer [9]). Gerade das interessierende Gebiet der oberen Troposphäre und der unteren Stratosphäre, wo der Gehalt an Wasserdampf rasch abnimmt und nach heutigen Anschauungen der Antrieb für wichtige Prozesse des Wettergeschehens gesucht werden muß, konnte bisher experimentell noch nicht erfaßt werden. Eine unmittelbar messende Untersuchung der in diesen Höhen herrschenden Verhältnisse erschien von großer Wichtigkeit.

Eine Möglichkeit hierzu ist durch das Verfahren der Radiosonde geboten. Die Radiosonde ist eine Kombination von Meßfühlern zur Erfassung des atmosphärischen Zustandes mit einer Schaltvorrichtung und einem kleinen Funksender. In ihrer üblichen Form gestattet sie die unmittelbare Funkübertragung der gemessenen Zustandswerte vom Ort der Radiosonde zu einer Empfangs- und Auswertungsstation am Erdboden. Im Routinebetrieb des Wetterdienstes steigen Radiosonden zur Bestimmung der Werte von Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Richtung und Geschwindigkeit des Höhenwindes mehrmals am Tage von bestimmten Orten aus auf. Als Träger des Instrumentes dienen Gummiballone von etwa 4 kg Tragfähigkeit.

Die zur Zeit in München in Gebrauch befindliche amerikanische Radiosonde (Trägerfrequenz 403 MHz, frequenzmoduliert) benutzt zur Temperaturmessung die Tatsache, daß der elektrische Widerstand bestimmter keramischer Materialien mit abnehmender Temperatur stark ansteigt (zwischen 2 und 5% pro 1° C Temperaturänderung). Die hohe Empfindlichkeit solcher „Thermistor"-Thermometer ließ sie für Strahlungsmessungen, bei denen relativ kleine Temperaturdifferenzen gemessen werden müssen, besonders geeignet erscheinen. Bei der Bestimmung des Strahlungsstromes in einer bestimmten Schicht der Atmosphäre hat man die Temperaturen zweier schwarzer, frei nach oben und unten gerichteter, Strahlung aussendender und empfangender Flächen miteinander zu vergleichen. Es kam darauf an, ein Prinzip zu benutzen, bei dem die in der freien Atmosphäre ständig in unkontrollierbarer Weise wechselnde Belüftung der Meßflächen ohne ungünstigen Einfluß auf das Ergebnis bleibt. Das von G. Hofmann [10] angegebene, von W. Pohl [11] näher untersuchte Kompensationsverfahren erwies sich für diesen Zweck als besonders gut geeignet. Es gelang, durch Umbau der amerikanischen Radiosonde und Einbau von Thermistoren in eine Anordnung nach Art des Hofmannschen Strahlungsbilanzmessers ein für den Aufstieg am Ballon und die Fernübertragung der Meßwerte geeignetes Gerät herzustellen. Dabei besitzt der Fühlerteil mit seinen 4 Meßorganen nur ein Gewicht von 45 Gramm. Die Trägheit der Meßfühler und die Wärmeübergangsverhältnisse innerhalb des Geräts konnten mit den einzuhaltenden Auf-

stiegsbedingungen in Einklang gebracht und die aus den Schwankungen des Ballongespannes beim Aufstieg und der Abdeckung des Himmels durch den Ballon resultierenden Fehler eliminiert werden. Einzelheiten zu diesen Problemen wird die demnächst vorliegende Dissertation von W. Pohl enthalten.

Bei 6 Aufstiegen gelang es, einwandfreie Meßergebnisse zu erzielen. Über die Daten, die erreichten Höhen und die erhaltenen Werte gibt die folgende Aufstellung Aufschluß. Die Strahlungsstromwerte sind beim Aufstieg zu den angegebenen Zeiten, die Werte der Lufttemperatur durch den planmäßigen Aufstieg der Aerologischen Station München-Riem, jeweils um 03 Uhr MEZ derselben Nacht (unter Berücksichtigung der etwas verschiedenen Steiggeschwindigkeit 3–5 Stunden nach dem Strahlungsaufstieg) gewonnen. In keinem Falle erfolgte zwischen den beiden Aufstiegen eine markante Wetteränderung.

Ultrarot-Strahlungsstrom-Messungen
München-Riem

Datum	Uhrzeit MEZ	Maximalhöhe m üb. NN Temperatur °C	Strahlungsstrom in Gipfelhöhe cal cm^{-2} min^{-1}	Maximum des Strahlungsstroms cal cm^{-2} min^{-1}	Höhenlage des Strahlungsmaximums	Tropopausenhöhe und -Temperatur
28. 8. 54	23.40	5740–18	0,248	(0,248)	(5740)	(11130–59)
21. 1. 55	21.09	12090–58	0,234	0,330	9980	10900–67
8. 3. 55	21.50	18010–58	0,243	0,297	8560	10130–63
24. 5. 55	23.31	8960–45	0,304	(0,304)	(8960)	(11045–62)
15. 6. 55	22.36	12850–66	0,335	0,414	10460	12760–66
11. 8. 55	22.57	3450– 2	0,169	(0,169)	(3450)	(10940–54)

Die dritte Stelle in den Beträgen des Strahlungsstromes ist nicht mehr sicher.

Die am Boden von der Radiosonde gemessenen Werte zeigten vorzügliche Übereinstimmung mit den Angaben eines fest aufgestellten Strahlungsbilanzmessers. Die Meßwerte in der freien Atmosphäre zeigen erwartungsgemäß ein mit der Höhe zunehmendes Übergewicht der aufwärts gerichteten Strahlungskom-

ponente über die erdwärts gerichtete Gegenstrahlung. Einflüsse der Temperatur- und Feuchteschichtung entsprechen im allgemeinen der Erwartung. Die Zunahme des Strahlungsstromes (Ausstrahlung – Gegenstrahlung) mit der Höhe stimmt mit den theoretischen Werten einigermaßen überein, wenn die Stoßverbreiterung gemäß $\delta_S \sim p T^{-1/2}$ berücksichtigt wird.

Bei genauerer Betrachtung zeigen sich jedoch in einigen Punkten charakteristische Unterschiede zwischen Messung und Theorie. In geringen Höhen über dem Boden ist der ausgehende Strahlungsstrom kleiner als theoretisch erwartet. Da gerade in geringen Höhen nachts scharf ausgeprägte Feuchte- und Temperaturschichtungen mit großen Gradienten herrschen, kann wohl ein Teil der Diskrepanz auf ungenügende Auflösung durch die nicht trägheitslosen Meßfühler zurückgeführt werden. Daneben erscheint es aber wahrscheinlich, daß die in Schichten geringen Vertikalaustausches angereicherten Staubteilchen und Dunstpartikel im Vorkondensationszustand sich durch verstärkte Gegenstrahlung bemerkbar machen. Diese Effekte sind aber durch die Theorie, die sich nur mit den Strahlungseigenschaften der Gase und Dämpfe beschäftigt, nicht zu erfassen.

Im Vergleich zu dem verhältnismäßig glatten Verlauf, den der nach dem Möller-Diagramm gerechnete Strahlungsstrom in Abhängigkeit von der Höhe aufweist, zeigen die Messungen auffällig hervortretende Einzelheiten der Schichtung, deren Realität durch ihre enge Beziehung zu Besonderheiten der unabhängig gemessenen Temperatur- und Feuchtestruktur bewiesen wird. Dies Verhalten legt den Schluß nahe, daß die wirklichen Emissions- und Absorptionsgebiete im Wasserdampfspektrum unter atmosphärischen Verhältnissen stärker selektive Eigenschaften aufweisen, als die Theorie zur Zeit darstellen kann. Hierdurch wird die „Reichweite" wesentlicher Anteile des Strahlungsstromes eng begrenzt und die Schichtung in starkem Maße betont. Beeinträchtigt wird diese Schlußweise allerdings durch die Tatsache, daß die in der Praxis bisher verfügbaren Feuchtemeßmethoden insbesondere bei tiefer Temperatur weder hinreichend empfindlich noch hinreichend trägheitslos sind, sondern die Ergebnisse stark glätten. Das bedingt, daß oberhalb 7000 m Höhe offenbar reelle Einzelheiten der Schichtung des Strahlungsstro-

mes nicht mehr den entsprechenden Einzelheiten der gemessenen Wasserdampfverteilung zugeordnet werden können.

Unterhalb der Stratosphärengrenze, im Gebiet der stärksten Temperaturabnahme mit der Höhe, findet sich in jedem Falle ein Maximum des ausgehenden Strahlungsstromes. An der Stratosphärengrenze selbst und darüber macht sich die höhere Temperatur der oberhalb liegenden Luftschichten in einem scharfen Zurückgehen des Strahlungsstromes bemerkbar. Daraus geht hervor, daß die in der Stratosphäre noch vorhandenen, bisher häufig als unerheblich betrachteten Wasserdampf- und Kohlensäuremengen auf dem Wege über den Strahlungsstrom noch wesentliche thermische Wirkungen ausüben.

Literaturverzeichnis

[1] F. E. Fowle, Smiths. Misc. Coll. Bd. 68, Nr. 8, 1917.
[2] A. Adel u. C. O. Lampland: Astrophys. Journ. 91, 1 u. 481, 1940.
[3] H. M. Randall, D. M. Dennison, N. Ginsburg, und L. R. Weber: Phys. Rev., 52, 160, 1937
[4] R. Mügge u. F. Möller: Zs. f. Geophys. VIII, 53, 1932.
F. Möller: Das Strahlungsdiagramm, Reichsamt f. Wetterdienst, Berlin 1943.
[5] W. M. Elsasser: Harvard Meteor. Studies Nr. 6, 1942.
[6] A. Bruinenberg: Medded. Ned. Met. Inst. (B) I, Nr. 1, 1946.
[7] G. Yamamoto: Sci. Rep. Tôhoku Univ. (5) 4, 98, 1952.
[8] A. Ångström: Beitr. z. Phys. d. fr. Atm. 14, 8, 1928.
[9] J. T. Houghton u. A. W. Brewer: Vortrag UGGI Rom, 1954.
[10] G. Hofmann: Forstwiss. Centralbl. 71, 330, 1952.
[11] W. Pohl: Wiss. Mitt. d. Met. Inst. Univ. München Nr. 2, 1954.