

Der Wärmehaushalt der Atmosphäre

Von F. MÖLLER, Mainz¹

In unserer Atmosphäre herrscht ewige Unruhe. Könnte man sie sich von außen betrachten, so würde man sehen, wie in der Westwindzone unserer Breiten Zyklonen und Antizyklonen in einer brodelnden und wirbelnden Drift entlangziehen, oder wie in den großen tropischen Strömungen der Passate von beiden Halbkugeln her die Luftmassen zum Äquator geführt werden, in den Gewitterstürmen der Tropen herauf- und herabgejagt werden, um schließlich nach den Seiten herausgeschleudert in den Subtropen langsam aber stetig herabzusinken und wieder in den Strudel anderer Vorgänge hereingerissen zu werden.

Was ist die Ursache all dieses pulsierenden Lebens? Wir wissen, daß keine Bewegung ohne Energiezufuhr erfolgen kann, wir wissen auch, daß die Atmosphäre ihre Energie von außen gespendet erhält, und schließlich sehen wir, daß die Luft ständig ihre Temperatur ändert, daß sie sich erwärmt und abkühlt. Deshalb mag es reizvoll sein, dem Kreislauf der Wärmeenergie in der Lufthülle nachzuspüren und damit den Antrieb der Bewegungsvorgänge zu erkennen.

Die Atmosphäre ist die äußerste Haut des Planeten Erde. Sie grenzt daher sowohl an ihre feste oder flüssige Unterlage wie an den leeren Weltraum und steht mit beiden im Austausch. Von beiden Seiten wird Energie aufgenommen und dahin abgegeben, und diese Energie unterliegt in der Lufthülle selbst den mannigfaltigsten Veränderungen, sie wird von einer Stelle zur anderen weitergereicht, sie wird gespeichert und wieder freigegeben, sie wird von einer Form in die andere transformiert und wird zum Schluß in der gleichen oder in verwandelter Form wieder nach außen abgegeben. Alle diese Prozesse machen das aus, was wir Wärme- oder Energiehaushalt nennen, und ihnen soll im folgenden etwas nachgegangen werden.

Anfangs- und Endglied dieser Kette, Einnahme und Ausgabe festzustellen, ist mitunter leichter, als die Umwandlungen in den Zwischengliedern zu erkennen. So wird der gesamte Einnahmeposten schon vollständig erfaßt, wenn wir die Zustrahlung von der Sonne betrachten; und auch von dieser ist allein der kurzwellige Bereich thermisch wirksamer Strahlung zwischen 0,3 und 3μ bedeutsam. Er liefert am Rande der Atmosphäre etwa $2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min.}$ Die Strahlung

des Mondes tritt gegenüber der Strahlung der Sonne vollständig zurück. Sie ist selbst dann, wenn sie von seiner warmen Tagseite, also vom Vollmond kommt, nur $\frac{1}{5000}$ der Sonnenstrahlung und von der Nachtseite sogar nur $\frac{1}{10000000}$; Stern- und Weltraumstrahlung ist noch geringer. Auch kürzere Wellen, bis herab zu Röntgen- und Ultrastrahlen, und lange elektromagnetische Wellen treffen von außen die Erde. Sie vermögen auch sehr beachtenswerte spezifische Wirkungen auszuüben. Aber ihre Energiedichte je Zeiteinheit und je Flächeneinheit der Erdoberfläche, auf die sie treffen, ist zu gering, und ihre Einwirkung auf den Wetterablauf ist zu unbedeutend, als daß sie mit der thermisch wirksamen Strahlung vergleichbar wären.

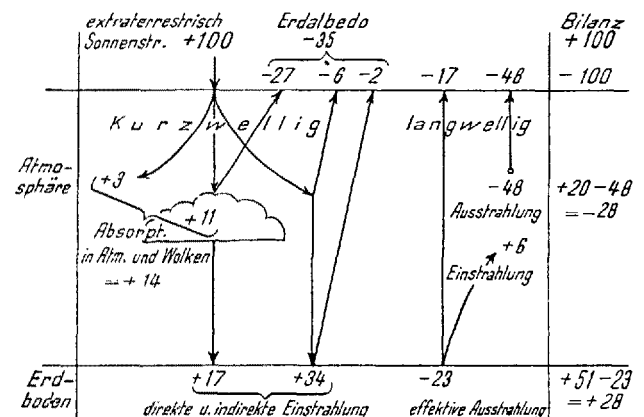


Abb. 1. Schema der Strahlungsbilanz der Atmosphäre im Mittel über alle Breiten und Jahreszeiten. Angaben in % der einfallenden Sonnenstrahlung nach BAUR und PHILIPPS², FRITZ¹ und eigenen neuen Berechnungen.

Von diesen $2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min.}$ werden etwa 35% wirkungslos wieder in den Weltraum reflektiert¹, teils an den weißen Wolkenoberflächen, teils am Dunst der Lufthülle und ein wenig auch am Erdboden (Abb. 1). Nur die restlichen 65% verbleiben in dem System Erde + Atmosphäre; aber die Verteilung auf beide Partner ist sehr ungleichmäßig: die Lufthülle erhält nur 14% oder $\frac{1}{5}$ des Einnahmepostens, die Erdoberfläche 51% oder $\frac{4}{5}$ der Einnahme². Durch Absorption der Sonnenstrahlung an Wasserdampf, in den Wolken und an Staubpartikeln werden also nur $\frac{1}{7}$ der auf-

¹ S. FRITZ, J. Meteorol. 6, 277 (1949).

² F. BAUR und H. PHILIPPS, Gerlands Beitr. Geophysik 47, 218 (1936).

¹ Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Mainz.

fallenden Strahlung zurückgehalten, während über die Hälfte wirkungslos hindurchgeht und erst vom Erdboden geschluckt wird. In der Luft wie am Boden werden diese Beträge in Wärme umgewandelt, also in innere oder thermische Energie. Bedenkt man aber, daß die an sich schon geringere Wärmezufuhr in der Luft, nämlich $\frac{1}{4}$ dessen, was der Boden erhält, sich auf die ganze Höhe der Atmosphäre verteilt, der große Betrag am Boden dagegen nur auf die allerersten Schichten von wenigen Metern Dicke (im Meer immerhin auf ca. 100 m), so erkennt man, daß die Erdoberfläche sehr viel stärker aufgeheizt wird und daher viel wärmer werden muß als die freie Atmosphäre darüber. Der dadurch entstehende strahlungsbedingte Temperaturüberschuß spielt im ganzen weiteren Wärmehaushalt die wichtigste Rolle. Der Mechanismus, oder man muß sagen die Mechanismen, mit deren Hilfe es gelingt, diesen Überschuß wieder wettzumachen, sind, wie wir sehen werden, die hauptsächlichsten Bestandteile des Wettergeschehens, sie sind das Wetter schlechthin.

Auch die *Wärmeabgabe* des ganzen Systems an den Weltraum kann an der ungleichmäßigen Verteilung zunächst nichts ändern. Wie jeder Körper, der Strahlung absorbieren kann, senden auch Erde und Lufthülle langwellige Wärmestrahlung aus. Dies erfolgt in dem Wellenlängenbereich von 4 bis über 100 μ , eine Überschneidung mit den Zustrahlungsvorgängen tritt also nicht ein. Die Wärme wird durch diese Strahlung nach außen abgegeben und dadurch der Gesamthaushalt des Planeten Erde ausgeglichen, von dem wir bisher nur den Einnahmeposten betrachtet hatten. Aus Abb. 1 geht hervor, daß keineswegs der Boden, der mehr Sonnenwärme erhielt, auch im Langwelligen mehr abgibt, sondern die Abgabe ist mit 23 Teilen kleiner als die der Atmosphäre mit $48 - 6 = 42$ Teilen; die ungleiche Bilanz der beiden Partner wird damit nur noch verstärkt. Immerhin – was der eine zuviel ausgibt, nimmt der andere zuviel ein –, so daß der gemeinsame Haushalt ausbalanciert ist! Die laufend größeren Einnahmen des Bodens betragen also 28% in den Einheiten der Abb. 1. Sie müssen irgendwie an die Luft abgegeben werden, um den Haushalt sowohl des Bodens wie der Luft auszugleichen, und man kann deshalb auch bei alleiniger Betrachtung des Wärmehaushaltes der Atmosphäre den Boden nie außer acht lassen. Schon durch die Vorgänge, die in der Strahlungsbilanz der Abb. 1 erfaßt sind, gibt er nahezu die Hälfte dessen, was er von der Sonne erhält, an die Lufthülle weiter, und zwar durch langwellige Strahlung; in dieser tritt der Betrag dann als Wärmezufuhr von unten auf. Aber auch die andere Hälfte, die in der Figur noch am Boden verbleibt, muß irgendwie übertragen werden.

Man erkennt sofort, daß diese Übertragung durch konvektionsartige Vorgänge leicht möglich ist. Wie ein Kochtopf wird die Atmosphäre durch Erhitzung

der Unterfläche geheizt, und genau, wie dieses Verfahren in einem Topf gute Wirksamkeit verbürgt – wer würde wohl, um Wasser zu kochen, eine Heizplatte oben auf den Topf legen! –, so ist auch der Effekt der atmosphärischen Heizung vom Boden her äußerst wirksam. Die am warmen Erdboden angeheizten Luftmassen steigen hoch; wir kennen diese Vorgänge genau, denn der Segelflieger nutzt diesen warmen Aufwind, die Thermik, genau so aus wie die kreisenden Raubvögel, und wir können den Ort der Aufwinde in den sommerlichen Haufenwolken direkt am Himmel abgebildet sehen. Durch diese warmen aufsteigenden Luftströmungen wird die am Erdboden zuviel vereinnehnte Sonnenwärme an die freie Atmosphäre weitergegeben, genau so, wie das am Boden erwärmte Wasser unseres Kochtopfes hochsteigt, sich oben mit dem kalten Wasser vermischt oder dieses herabdrängt, daß es nun seinerseits unten erwärmt wird. Überall wo Wolkenbildungen ein Aufsteigen warmer feuchter Luft anzeigen, also auch in den Aufgleitwolken an der Vorderseite und in den Gewitterwolken an der Rückseite einer Depression, wird dergestalt Wärme vom Boden nach oben transportiert.

Aber trotz aller dieser Vorgänge reicht die Konvektion nicht aus, um die fehlenden 38% vom Boden an die Lufthülle zu übertragen; man schätzt, daß nur $\frac{1}{10}$ des Betrages, d. h. ca. 4% so befördert werden; der gesamte Rest wird durch die latente Wärme des Wasserdampfes befördert. Die Einstrahlung am Boden wird insbesondere auf den Meeresflächen der Erde zum größten Teil sofort zur Verdampfung des Wassers verwendet, das nun in Gasform der Luft beigemischt, diese Wärme latent mit sich trägt. Überall, wo dieser Wasserdampf dann zu Wolken kondensiert und der Regen aus den Wolken wieder zur Erde herabfällt, wird diese latente Verdampfungswärme wieder in fühlbare Wärme umgewandelt; die Luft wird innerhalb der Wolken erwärmt und damit in die Lage gesetzt, ihre bisher negative Wärmebilanz auszugleichen.

Bei der konvektiven Wärmeübertragung spielten zum ersten Male in unseren Betrachtungen Bewegungsvorgänge eine Rolle, sowohl im Aufsteigen der Thermikschläuche wie bei der Wasserdampfverfrachtung nach oben. Hier wird also kinetische Energie in den Kreislauf eingeschaltet, wenngleich nur in den sehr geringen Beträgen der vergleichsweise langsamen Vertikalbewegungen.

Es enthüllt sich auch eine der wichtigsten Rollen des Wassers in der Atmosphäre: *ohne* diesen Bestandteil, der ständig zur Änderung seines Aggregatzustandes Wärme umsetzt, müßten Wärmetransporte allein durch Konvektion erfolgen, und diese müßte daher 10mal stärkere Ausmaße haben. Die eingestrahelte Sonnenwärme würde nicht durch Verdampfungsvorgänge neutralisiert, die Temperaturgegensätze zwischen Erde und Lufthülle würden erheblich größer werden, so daß sie die 10fach gesteigerte Konvektion

antreiben könnten. Man kann wohl sagen, daß die Atmosphäre geradezu ins Kochen käme, so wild würde sie durch Staubstürme und Trockengewitter durchwühlt!

Das Zahlenschema der Abb. 1 gilt nur für mittlere Verhältnisse der Nordhalbkugel. Der Ausgleich der Gesamtbilanz des Systems Erde + Atmosphäre, der darin zutage tritt, ist schon in den verschiedenen geographischen Breiten oder bei Betrachtung allein der Sommer- oder Winterverhältnisse nicht mehr vorhanden. In niederen Breiten und im Sommer liegt die Zustrahlung der Sonne beträchtlich über dem Mittel; deshalb ergibt sich ein sehr viel größerer Wärmeüberschuß am Erdboden. In hohen Breiten zur Winterzeit fällt die Einstrahlung ganz oder fast ganz weg und es bleibt eine unausgeglichene Wärmeabgabe an den Weltraum übrig (Abb. 2). Auch die Wetterlage macht sich bemerkbar: z. B. erkennt man die wolkenarme Subtropenzone an der stärkeren Einstrahlung am Boden und der größeren Ausstrahlung der freien Atmosphäre.

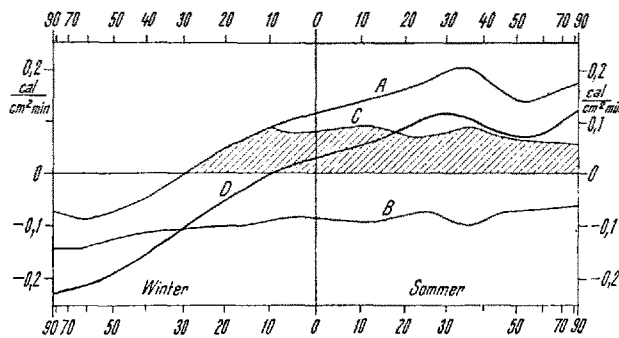


Abb. 2. Veränderung der Strahlungsbilanz mit der geographischen Breite. *A* Strahlungsbilanz der Erdoberfläche. *B* Strahlungsbilanz der freien Atmosphäre. *C* schraffiert: Differenz $\frac{1}{2}(A-B)$ = Wärmemenge, die durch vertikale Umsetzungen (Konvektion, Verdunstung und Niederschlag am gleichen Ort) ausgetauscht werden kann. *D* Summe $A+B$ = Wärmeaufnahme von Erde + Atmosphäre, die durch horizontale Transporte (Luft- und Meeresströmungen) ausgeglichen werden muß. Die Abszissenbezeichnung entspricht den Arealen der Breitenzonen.

Abb. 2 zeigt deutlich, daß der Ausgleich zwischen Boden und Lufthülle gar nicht mehr an Ort und Stelle erfolgen kann, weil keine Ergänzung zu Null möglich ist. Es muß deshalb Wärme in der einen oder anderen Form abtransportiert werden, um in anderen Jahreszeiten, in anderen Breiten oder sogar auf der anderen Halbkugel die Bilanz ausgleichen zu helfen.

Als erster Mechanismus, der das bewirken kann, tritt die Wärmespeicherung im Boden auf. Durch Wärmeleitung wird die überschüssige Wärme von der Oberfläche an die tieferen Schichten abgegeben und dient dort zur Erwärmung des Untergrundes; in der kühleren Jahreszeit, wenn der Temperaturunterschied zwischen tieferem Boden und Oberfläche sich umkehrt, wird durch den gleichen Leitungsvorgang der Kalorienstrom wieder nach oben geleitet. Über dem festen Land sind die Beträge, die im Sommer gespeichert, im

Winter wieder an die Luft abgegeben werden, gering, wenn auch die Wirksamkeit gerade im Winter gut erkennbar ist: es schiebt sich dann eine Schneedecke als schlechter Wärmeleiter zwischen Luft und Boden ein, staut den von unten kommenden Wärmestrom und verschafft dadurch den überwinternden Pflanzen eine höhere Temperatur, als wie sie sich bei der überwiegenden Ausstrahlung des nackten Bodens einstellen würde. Im Meere sind die gespeicherten Mengen erheblich größer, aber sie bleiben nicht am Ort! Warme Meeresströmungen wie der Golfstrom oder der Kuroshiu sind die bekanntesten Beispiele hierfür. Sie verfrachten die in den Tropen aufgenommene Sonnenwärme in hohe Breiten und geben sie dort, zum Teil sogar erst im Polargebiet, wieder an die Luft ab¹. Diese »Warmwasserheizung« großer Gebiete der Nordhalbkugel beruht also auf einer Wärmeabgabe vom Untergrund an die Atmosphäre. Aber nicht nur diese warmen Ströme, sondern überhaupt jede Meeresströmung, auch die kalten, stellen in ihren Ursprungs- und Zielgebieten Wärme- und Kältequellen für die Atmosphäre dar.

Aber noch wirksamer sind die Transportvorgänge in der Atmosphäre selbst: die mit hoher Temperatur ausgestattet und mit der latenten Wärme des Wasserdampfes beladenen Warmluftmassen der Subtropen dringen gegen die gemäßigten polaren Zonen vor; hier stellen sie ihren Wärmegehalt zur Verfügung, bringen außerdem ihren Wasserdampf zur Kondensation und zum Ausregnen, so daß auch die dadurch zusätzlich fühlbar gewordene Wärme durch Ausstrahlung abgegeben werden kann; die strömende Luft kühlt sich dabei ab, aber sie liefert durch diesen Prozeß, trotz der anhaltenden Wärmeausstrahlung, lediglich die zur Aufrechterhaltung der hohen Temperatur am festen Orte benötigten Kalorien. Umgekehrt dringt polare und kältere Luft zu den Subtropen und Tropen vor, nimmt dabei Wärme und Wasserdampf auf und schafft durch ihre Aufnahmefähigkeit die Vorbedingung dafür, daß durch die ständige Einstrahlung die Temperatur nicht ins Ungemessene steigt. Der Kreislauf der Luftmassen zwischen hohen und niederen Breiten und der damit verbundene Kreislauf des Wasserdampfes bewirken, daß die Maschine arbeiten kann, d. h., daß nicht der (tropische) Dampfkessel von Wärme überfließt oder der (polare) Kondensator einfriert.

Wieder tritt bei den Übertragungsvorgängen kinetische Energie auf. Die großen meridionalen Strömungen sind an die Existenz von Hoch- und Tiefdruckgebieten geknüpft; daß diese besonders häufig und intensiv in gemäßigten Breiten auftreten, ist bekannt; warum sie da auftreten, ist aus Abb. 2 erkennbar: hier sind im Winter so große Unterschiede in der Wärmezufuhr vorhanden, daß die lebhaften meridionalen Ausgleichsströmungen auftreten müssen.

¹ A. DEFANT, Ann. Hydrogr., 1. Köppen-Heft 1926, S. 12.

Als wichtigsten Aktivposten, der in der «strahlungsgekühlten» Atmosphäre den Ausgleich bringt, haben wir die Kondensationswärme erkannt. Ebensovienig

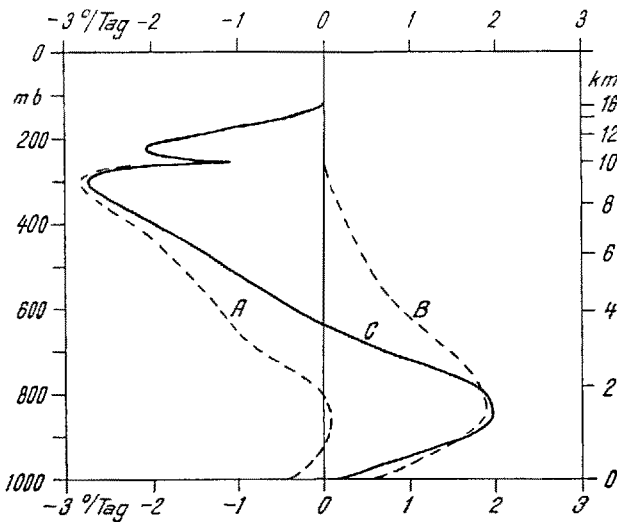


Abb. 3a. Vertikale Verteilung von Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe der Luft in mittleren Breiten bei einem Jahresniederschlag von 1000 mm. *A* Temperaturänderung je Tag, die bewirkt wird durch Absorption von Sonnenstrahlung und Emission langwelliger Strahlung. Bei beiden Vorgängen sind nur die Wirkungen von Wolken und Wasserdampf berücksichtigt, andere Absorber (CO_2 , O_3) sind außer acht gelassen. *B* Mittlere tägliche Erwärmung durch frei werdende Kondensationswärme. *C* Gesamtwirkung $A+B$. Es ist angenommen, daß keine Wärmeaufnahme oder Wärmeabgabe zum Boden stattfindet. Die Ordinatenenteilung ist proportional dem Luftdruck, was eine Integration der Kurven über die Höhe ermöglicht.

wie bei Strahlungsvorgängen ist ihre Einwirkung überall gleich; sie wird an den Orten und in den Zonen freigesetzt, wo der stärkste Niederschlag fällt. Das ist der Fall in den Hauptregengürteln der Erde, d. h. in der Innertropenzone und in den subpolaren Westwindzonen beider Halbkugeln, während in den dazwischengelegenen wolkenarmen Subtropengebieten wenig Regenfall, aber dafür, und zwar insbesondere über den Meeren die stärkste Verdunstung vonstatten geht. Der Wärmehaushalt der freien Atmosphäre in diesem letzteren Gebiete muß also stark negativ sein, weil dem Wärmeverlust durch Strahlung kein Wärmegewinn durch Kondensation gegenübersteht. Umgekehrt ist dann die Bilanz in den Regengebieten überwiegend positiv, denn hier wird erheblich mehr Kondensationswärme frei, als zum Ausgleich des Strahlungsverlustes benötigt wird.

Die vertikale Anordnung der Wärmequellen in der Atmosphäre ist nicht die gleiche wie die der Wärmesenken¹. Also auch da, wo wirklich ein Ausgleich zwischen Strahlungsvorgängen einerseits und Kondensationswärme andererseits besteht, ist der Ausgleich nicht in jeder Höhenlage für sich schon gegeben, sondern erst in der Summierung über alle Höhen. Abb. 3a zeigt die Höhenverteilung der Gesamtwirkung aller Strahlungsvorgänge im Normalfall mittlerer Breiten. In

den untersten Kilometerstufen halten sich Erwärmung durch Einstrahlung und Abkühlung durch Ausstrahlung (Kurve A) beinahe die Waage, so daß die Strahlungsbilanz ausgeglichen ist. Dagegen erreicht in größeren Höhen der Troposphäre die Abkühlung den erheblichen Betrag von fast 3°/Tag, weil hier der Ausstrahlung der Wasserdampfschichten und der Wolken keine wesentlich abschirmende Wirkung der noch darüberliegenden Luftschichten mehr hinderlich ist und die Absorption von Sonnenstrahlung geringfügig ist. Dem steht die Erwärmung durch die Kondensation (B) gegenüber, die naturgemäß ihren größten Betrag in den tieferen wasserdampfreicheren Schichten hat und nach oben hin an Wirkung verliert. Die Summe beider Prozesse zeigt dann eine Erwärmung in der unteren Troposphäre und einen Wärmeverlust in der Höhe. Direkte Übertragung fühlbarer Wärme vom Erdboden an die Luft ist in den Abb. 3 nicht in Ansatz gebracht.

Ein wesentlich anderes Verteilungsbild zeigt der Wärmehaushalt in niederschlagsarmen Gebieten, wo keine oder fast keine Kondensationswärme der Strahlung das Gleichgewicht hält. Als Beispiel ist in Abb. 3b die winterliche Atmosphäre Nordost-Sibiriens, also die Situation am Kältepol der Erde dargestellt (Kurve C). Die Ausstrahlung der hohen Atmosphäre ist gegenüber derjenigen der tieferen Schichten ganz zurückgedrängt; unten geben nicht nur die Oberflächen der meist nur niedrigen Wolkendecken viel Strahlung ab, sondern die große stationäre Inversion dieses Gebietes bewirkt ebenfalls eine starke Abkühlung infolge Abstrahlung der warmen Schicht gegen die darüber und darunter liegenden kälteren Luftschichten. Ein Niveau mit Wärmeaufnahme fehlt ganz: Sonnenstrahlung und Kondensationswärme sind beide unwesentlich.

Ein ähnliches Aussehen hat die Verteilungskurve in den subtropischen Trockengebieten, wo neben einem hohen Ausstrahlungsniveau ein tiefes vorhanden ist,

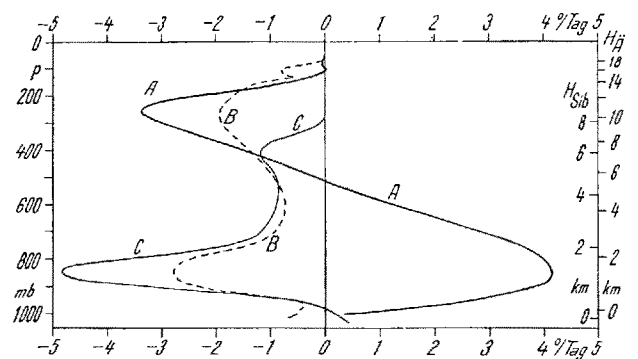


Abb. 3b. Vertikale Verteilung der Gesamtwärmebilanz der Luft unter dem Einfluß von Sonnenstrahlung, langwelliger Ausstrahlung und Kondensationswärme. *A* Innertropen (Annahmen: $\frac{6}{10}$ mittlere Bewölkung, Kondensationswärme durch 2500 mm Jahresniederschlag). *B* Subtropen in 30° Breite (Annahmen: 10 mm Jahresniederschlag, Kondensationswärme außerdem durch ständige Neubildung von $\frac{5}{10}$ Bewölkung zwischen 0,5 und 2 km Höhe im Laufe von 5 Tagen). *C* Nordostsibirien, Winter (Annahmen: kein Niederschlag, 20% aller Tage wolkenlos mit starker Temperaturzunahme von 0 bis 2 km, 80% bedeckt mit Wolken zwischen 0,5 und 2 km in nahezu isothermer Schicht);

¹ F. MÖLLER, Meteorol. Z. 52, 409 (1936) und Handb. d. Geophysik VIII, S. 700 (Berlin 1943).

das durch die cu-Decken der Passatregion hervorgerufen ist. Beide sind nur durch eine Zone verringerter Wärmeabgabe voneinander getrennt. – In absolut wolken- und niederschlagslosen Gebieten fehlt die Abkühlungsschicht der unteren Troposphäre, so daß dann nur eine Wärmeabgabe in der Höhe verbleibt.

Hingegen ist die Anordnung von Wärme- und Kältequellen im Beispiel der Innertropenzone die gleiche wie in mittleren Breiten. Die Temperaturschichtung und Wolkenverteilung ist auch im wesentlichen derjenigen der gemäßigten Zone gleich, nur der Temperaturunterschied zwischen Boden und Tropopause ist größer, die Wolken erreichen größere Höhen. Der Niederschlagsreichtum dieses Gebietes bewirkt einen Überschuß der Erwärmung in den untersten 5 km über die Abkühlung der oberen Schichten, so daß die gesamte Atmosphäre etwa $0,3^\circ$ Wärme je Tag speichern könnte. – Auch in besonders niederschlagsreichen Gebieten der gemäßigten Zone hat die Kurve ein ganz ähnliches Aussehen mit einer größeren Wärmeaufnahme-schicht unten, einer kleineren Wärmeabgabeschicht oben.

Auch diese unterschiedliche Bilanz muß wieder durch irgendwelche Umlagerungen oder Transporte ausgeglichen werden. Hierfür ist es zunächst günstig, daß die Wärmeaufnahme unten, die Wärmeabgabe oben erfolgt, denn auf diese Weise kann eine Zirkulation wie in dem oben gewählten Beispiel eines Kochtopfes eingeleitet werden. – Die Temperatur nimmt in der Atmosphäre von unten nach oben hin ab. Man könnte deshalb glauben, daß vertikale Umlagerungen der Luft in der Lage wären, den Ausgleich herbeizuführen, indem sie warme Luft von unten nach oben bringen, die dann oben ihre Wärme für die Ausstrahlung spendet, während von oben kalte Luftmassen heruntersinken und unten in den kondensierenden Wolken erwärmt werden.

Leider ist der Vorgang weniger einfach, denn eine jede Luftmasse, die eine Vertikalbewegung in der Atmosphäre durchmacht, ändert dabei ihre Temperatur um 10° je 1000 m Höhenunterschied. Durch die Änderung des Luftdruckes bei der Verlagerung wird sie entweder komprimiert und dabei adiabatisch (also ohne Wärmeaufnahme) erwärmt oder erfährt bei Aufwärtsbewegung eine Ausdehnung mit adiabatischer Abkühlung von $10^\circ/\text{km}$. Die im Mittel vorhandene Temperaturabnahme in der Atmosphäre beträgt aber nur $6^\circ/\text{km}$. Das bedeutet, daß eine von oben nach unten verlagerte Luftmasse unten wärmer ankommt, als ihre Umgebung ist, und eine gehobene Luftmasse kälter wird als ihre Umgebung. Folglich kann durch einfache Umlagerungen keine unten produzierte Wärme nach oben geschafft werden und den Ausgleich herstellen.

Es kommt hinzu, daß wir auch an den Stellen in der Lufthülle, wo uns die Existenz großräumiger Vertikalbewegungen bekannt ist, nicht die erwünschten Temperaturen beobachten. In unserem Klima müssen

wir die Tiefdruckgebiete mit ihren ausgedehnten Niederschlagsfeldern als diejenigen Orte ansehen, wo weitverbreitete Aufwärtsbewegungen vorhanden sind. Sie sind aber im Vergleich mit der normalen Temperaturverteilung zu kalt. Umgekehrt herrschen in den Hochdruckgebieten verbreitete Absinkbewegungen vor und die damit verknüpfte adiabatische Erwärmung der Luft bewirkt Wolkenauflösung und Abtrocknung. Wiederum treffen wir also die Abwärtsbewegungen warm und die Aufwärtsbewegungen kalt an als Folge verschiedener Wetterlagen¹.

Es scheint, als ob uns in diesem Fall die Atmosphäre ein wenig zum besten gehalten und in die Irre geführt hat, denn die Tiefdruckgebiete, die in Mitteleuropa auftreten, sind alte zum Absterben verurteilte Gebilde. Eine wirkliche Neubildung von Tiefdruckwirbeln kommt bei uns kaum einmal vor und deshalb sind alle statistischen Zusammenstellungen über die Temperatur der Tiefs falsch oder wenigstens gefärbt. In den Gegenden, wo Neubildungen auftreten, z. B. in den Zyklonenbrutstätten von Neufundland, sind die jungen Zyklonenwellen mit ihren aufsteigenden Bewegungen wärmer als das Mittel. In diesen Gebilden arbeitet die atmosphärische Wärmekraftmaschine wirklich mit Wärmezufuhr, dort entwickeln sich die Zyklonen aus kleinen Wellenstörungen zu großen mächtigen Sturmwirbeln, in deren Bereich die potentielle und kinetische Energie Höchstwerte erreicht.

Wenn wir den Vergleich der Atmosphäre mit dem kochenden Wasser etwas weiter ausspinnen, so könnten wir sagen, daß die Zyklonengeburtstätten am Boden des Topfes zu suchen sind, wo die zugeführte Wärme zur Verdampfung des Wassers und zur Anregung der Zirkulationen und des Brodelns verwendet wird, während Mitteleuropa etwa an der Oberfläche der Flüssigkeit zu denken ist, wo nur die sich allmählich mehr und mehr ausdehnenden Dampfblasen herankommen, aber an Ort und Stelle nicht zu bemerken ist, wodurch sie entstanden sind.

Die Suche, wo die richtigen Wärmetransporte und Bewegungen zu finden sind, die den Ausgleich der in der Lufthülle vertikal übereinander angetroffenen Erwärmungs- und Abkühlungsgebiete bewirken, führt also zu der Feststellung, daß dies nicht an allen Orten in gleicher Weise erfolgt; die Stellen sind auch nicht einfach nach der geographischen Breite geordnet, sondern auf gleicher Breite gibt es Stellen häufigeren Entstehens und solche häufigeren Verschwindens von Tiefdruckgebieten, Stellen der Erzeugung von kinetischer Energie und solche des Aufbrauchens, solche wo die Bewegungen in laienhafter Ausdrucksweise »von selbst« erfolgen und solche, wo sie erzwungen werden müssen. Auch der Wärmehaushalt dieser Orte ist verschieden, wie aus den Darstellungen der Abb. 3 zu erkennen ist.

¹ R. MÜGGE, *Lehrbuch der Meteorologie* (5. Aufl., Hann-Süning, Leipzig 1943), S. 687.

Man kann den unterschiedlichen Wärmehaushalt der verschiedenen Gegenden durch Bestimmung der Strahlungsvorgänge, der Kondensationsprozesse und eventuell der Wärmeübergänge vom und zum Untergrund ermitteln, wie es neuerdings durch F. ALBRECHT¹ und W.C. JACOBS² getan worden ist. Es gibt aber auch eine Möglichkeit, diese Unterschiede im Wärmehaushalt auf ganz andere Weise zu ermitteln. Wo Wärme

extrem tiefen Temperaturen, mit denen sie ihren Ursprungsort verlassen hat, sondern sie hat sich unterwegs erwärmt. Obwohl sie am festen Ort Abkühlung bringt, nimmt sie doch auf ihrem ganzen Wege Wärme auf und gibt damit ein Anzeichen für eine positive Wärmebilanz. Umgekehrt ist die von Süden zu uns vordringende Warmluft eine Luft, die sich unterwegs abkühlt; in ihr wirkt eine negative Wärmebilanz. Die



Abb. 4. Mittlere Wärmeaufnahme und -abgabe der Luft zwischen 0 und 3 km im Januar, Zahlenwerte in $\text{cal/cm}^2\text{min}^{-1}$ (3 km^{-1}), entsprechend $10^\circ/\text{Tag}$. Berechnet aus den Temperaturänderungen bei Advektion. Gebiete mit Erwärmung schraffiert, nach MÖLLER.

produziert wird, muß sich die Luft erwärmen, wo Wärme entzogen wird, sinkt die Temperatur. Deshalb kann man aus der Temperaturänderung eines Teilchens sofort seinen Wärmehaushalt erkennen.

Das klingt sehr einfach, erfordert aber doch etwas Überlegung. Man darf nämlich nicht danach schauen, an welchem Ort die Temperatur von einem zum anderen Zeitpunkt gestiegen oder gefallen ist, denn das gibt ein falsches Bild. Bei einem Einbruch kalter Luftmassen von Norden z. B. sinkt am festen Orte die Temperatur; die Luft, die dabei aus dem Polargebiete herausströmt, erreicht uns aber nicht mit den gleichen

Summe aller dieser Erwärmungs- und Abkühlungsprozesse, die sich in den verschiedenen Luftmassen, aber am gleichen Ort nur zu verschiedenen Zeiten abspielen, liefert eine Erkennungsmöglichkeit für den Wärmehaushalt dieses Ortes. Ob es dabei am Orte selbst insgesamt wärmer oder kälter geworden ist, spielt nur eine untergeordnete Rolle. Die Temperaturänderung der Luftindividuen ist maßgebend.

Diese mittlere individuelle Temperaturänderung der Luft läßt sich durch spezielle Untersuchungsmethoden ermitteln, auch ohne daß man jedes einzelne Luftindividuum verfolgt und seine Erwärmung oder Abkühlung feststellt. Ein solcher Versuch¹, die mittlere

¹ F. ALBRECHT, Ann. Meteorol. 2, 129 (1949).

² W.C. JACOBS, J. Meteorol. 6, 266 (1949).

¹ F. MÖLLER, Meteorol. Rundschau 3, im Druck (1950).

Wärmebilanz der Luft in einem Monat kartenmäßig darzustellen, ist in Abb. 4 wiedergegeben; sie stellt den Wärmehaushalt der untersten 3 km der Atmosphäre im Januar über der Nordpolarkalotte bis 30° n. Br. dar.

Man erkennt hier sofort die Wärmeproduktionsgebiete in der Golfstromregion und über dem Nordpazifik, denen die großräumigen Abkühlungsgebiete über den winterlichen Kontinenten gegenüberstehen. Die Wärmeaufnahme der Luft in den Niederschlagszonen der jugendlichen Zyklonen bringt für die unterste Atmosphäre eine Erwärmung von etwa 2°/Tag. Dieses Erwärmungsband zieht sich von der nordamerikanischen Ostküste über den Atlantik, Irland, Schottland und Spitzbergen hinweg bis ins Polargebiet. Letzteres setzt in Erstaunen: aber einesteils ist die Niederschlagsmenge über dem Polargebiet noch wesentlich größer als über Sibirien und Kanada, andernteils wird vom warmen Golfstromwasser noch durch die Packeisdecke des Polarmeeres hindurch Wärme durch einfache Wärmeleitung an die darüberlagernden Luftmassen abgegeben¹. Dies ist allerdings nur im Nordpolargebiet der Fall. Während in der Antarktis die Eistafel des Roßmeeres eine Dicke von 30 bis 60 m hat, läßt der Golfstrom in der Arktis das Eis nicht dicker als 3 bis 4 m werden; nur in Pressungsgebieten kann es höher aufgetürmt werden.

Über dem gesamten Kontinent, schon in Europa, unterliegt die Luft nach Abb. 4 einer ständigen Abkühlung, die bis 3°/Tag betragen kann. Eine im Winter vom Ozean hereinkommende Warmluftmasse wird also auf ihrem Weg, der sie vielleicht bis nach Zentralasien führt, ständig abgekühlt, bis sie schließlich im Gebiet des Kältepolars zur Ruhe kommt oder weiter ihren Weg auf den Pazifik hinaus nimmt bzw. die Monsunströmungen Südasiens speist und sich dabei wieder erwärmt.

Der ständige Kreislauf, die ständige Erwärmung und Wiederabkühlung der Luft auf ihrem Wege wird dabei offenbar. Man erkennt aber auch, wie gefährlich die in der Synoptik gern gehegte Vorstellung ist, daß es Luftmassen ständig gleichbleibender Temperatur gäbe, polare und tropische Luftmassen, die voneinander nur durch eine frontale Grenze getrennt sind, und deren Hin- und Herpendeln, Wellenschlagen, Auf- und Abgleiten allein schon das Wesen des Wettergeschehens ausmache. Eine solche Anschauung kann sich dem Beschauer von Wetterkarten manchmal aufdrängen, aber sie ist falsch, denn sie verschleiert nur

die ständige Transformation der Wärme, ohne die keine Arbeitsleistungen vollbracht, keine Bewegungsenergien erzeugt werden können.

Der Mechanismus der Umwandlung von Wärme in kinetische Energie soll hier nicht im einzelnen erörtert werden. Doch stellen auch die Bewegungsvorgänge nur eine Zwischenphase im Lebensweg dar, den die Energie in unserer Atmosphäre zurücklegt. Als «Nutzeffekt» bezeichnet man diejenige Größe, die angibt, welcher Bruchteil der dem System zugeführten Wärme als mechanische Arbeitsleistung an ein anderes System, z. B. die feste oder flüssige Erde abgegeben wird. Er beträgt etwa 1%¹, d. h. nur dieser minimale Bruchteil der aufgenommenen Sonnenstrahlung verläßt den Weltkörper Erde erst nach mancherlei Umformungen und Umwegen durch den festen oder flüssigen Erdkörper wieder als langwellige Wärmestrahlung. Diese Differenz von 1% müßte eigentlich in Abb. 1 zwischen den hereinkommenden 100% und der Summe der nach außen abgegebenen Beträge bestehen. Die Genauigkeit dieser Berechnungen ist zu gering, solche Effekte zu zeigen.

Noch geringfügiger in der Gesamtbilanz sind die Beträge der elektrischen, chemischen oder anderer Energieformen, die ebenfalls irgendwo vom allgemeinen Kreislauf der Energie abgezweigt werden. Der Vorrat an Sonnenenergie, der von der Atmosphäre «ungenutzt» bleibt, der aber unter Umständen vom Menschen ausgenutzt werden könnte, ist ungeheuer groß.

Summary

The mean caloric balance of the atmosphere is represented by diagram No. 1, which shows the usual lay-out, but is filled in with new figures according to own calculations based upon S. FRITZ's new value of the earth's albedo. Possibilities of exchange between the heat surplus of the earth's surface and the heat deficiency of the atmosphere and between differing spots of the same layer are discussed. Regarding the vertical pattern of heat sources and cold sources, it may be seen that in the humid climates (tropics and temperate zone) the lower troposphere receives considerable amounts of heat and the upper troposphere and lower stratosphere lose heat, while in arid regions (subtropics and the cold pole of the earth), the lower layer does not receive heat or even radiates it. For finding geographic differences in heat economy, the individual changes of temperature of the air may be used. A map of the heat balance of the northern hemisphere in January shows zones of warmth over the warm ocean currents and zones of cooling over the continents.

¹ F. MODEL, *Berechnungsmethoden für den Übertrag von Wärme der Wassermassen (Strömungen)* (Hainburg 1949).

¹ A. DEFANT und H. ERTEL, *Ann. Hydrogr.* 70, 161 (1942).