©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Moderne Anschauungen über großräumige Luftzirkulationen.

Von Univ.-Prof. Dr. Heinz Reuter, Wien.

Vortrag, gehalten am 15. April 1964.

Globale Betrachtungen der Luftzirkulation auf der Erde haben in der Meteorologie immer schon eine besondere Rolle gespielt. Sie sind auch weit über das eigene Fachgebiet hinaus erhöhtem Interesse begegnet, weil der mittlere Strömungszustand auf der Erdoberfläche und in der freien Atmosphäre, die sogenannte Allgemeinzirkulation, wesentlich die weltweiten Klimazonen bestimmt und so zu den biologischen Entwicklungsphasen in enger Beziehung steht. Auch die historische Entwicklung der Menschheit war immer wieder direkt oder indirekt von Großraumzirkulationen beeinflußt. Denken wir beispielsweise nur an die großen Entdeckungsfahrten, die wegen der Abhängigkeit der Segelschiffahrt von der vorherrschenden Windrichtung, nur in bestimmten Klimazonen erfolgreich sein konnten.

Schon Aristoteles, der sich wohl als erster mit gewissen physikalischen Gesetzmäßigkeiten in der Atmosphäre beschäftigte, führte die vorherrschenden

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Windsysteme auf Aktionen der Sonnenstrahlung zurück, wenngleich er sonst noch recht mangelhafte und unklare Vorstellungen über den Mechanismus der atmosphärischen Prozesse hatte. Wenn wir daher heute auch fast alles, was Aristoteles in meteorologischer Hinsicht lehrte, ablehnen müssen, in einem hatte er recht, nämlich, daß der Energiespender der Großraumzirkulation allein die Sonne ist. Und so müssen alle Theorien und Erklärungsversuche für die beobachteten Windsysteme letzlich auf die verfügbare Sonnenstrahlung zurückgeführt werden. Bekanntlich zeigt nun die auf die Erdoberfläche einfallende Sonnenstrahlung wegen der von der Sonnenhöhe abhängenden Querschnittsbreite (Lambertsches Cosinusgesetz) eine deutliche tägliche und jährliche von der geographischen Breite abhängige periodische Variation. Maßgebend für die dem atmosphärischen Geschehen zugeführte Energie ist neben der Sonnenhöhe die Absorptionsfähigkeit der Erdoberfläche und der Luft für die einlangende Strahlung. Tatsächlich kann streng genommen nur ein absolut schwarzer Körper (Kirchhoffsches Gesetz) alle Strahlung absorbieren und den thermo-hydrodynamischen Prozessen als Energiespender zur Verfügung stellen. Die in der Natur vorkommenden Körper verschiedener Konstitution und Farbe absorbieren meist nur einen Bruchteil der angebotenen Strahlung. Der andere Teil wird reflektiert und geht für den weiteren thermodynamischen Prozeß verloren. Aber auch von der

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

tatsächlich absorbierten Strahlung wird ein guter Teil wieder in Form von Strahlung — allerdings in einem gänzlich anderen Wellenlängenbereich — abgegeben und nur ein geringer Teil der tatsächlichen Energiedarbietung manifestiert sich schließlich in Form von Bewegungsenergie, d. h. in den Windsystemen, von denen eingangs die Rede war (Thermodynamischer Wirkungsgrad). Der Ausdruck dieser kinetischen Energie der Luftströmungen ist letzlich ein Zurückfließen der Energie von einem höheren Niveau zu einem niedrigeren, gekennzeichnet durch einen durch die Strömung schließlich bewirkten Ausgleich ursprünglich bestehender Temperaturgegensätze. Studiert man die auf die Erdoberfläche einfallende und daselbst absorbierte Sonnenstrahlung im Jahresmittel in ihrer Abhängigkeit von der geographischen Breite, so zeigt sich — wie zu erwarten ist — ein ziemlich regulärer Verlauf von einer maximalen Energiedarbietung in der Nähe des Äquators zu einer minimalen Zufuhr an Sonnenstrahlungsenergie an den beiden Polen. Natürlich kann im Einzelfall diese ziemlich glatte Beziehung gestört sein, da etwa Bewölkung einerseits und die Konstitution der Erdoberfläche andererseits (Land—Meer-Verteilung) oft stark modifizierend in den Energieverarbeitungsprozeß eingreifen. Betrachten wir demgegenüber die großräumigen atmosphärischen Windsysteme, die ja — wie wir oben betont haben — eine unmittelbare Folge der Energieaufnahme sein sollen,

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

so ergibt sich keineswegs ein einheitliches einfaches Schema, obwohl gewisse Gesetzmäßigkeiten sofort erkennbar sind. Man erkennt bald, daß zur Erklärung noch andere Ursachen neben der breitenabhängigen Strahlung herangezogen werden müssen. Natürlich spielt die Beschaffenheit der Erdoberfläche (fester Boden, Meer, Vegetation, Orographie) eine große Rolle, aber diese Effekte können bei weitem nicht allein für das Zustandekommen der Windsysteme verantwortlich gemacht werden. Zur Erklärung der windschwachen Gebiete im Bereich der subtropischen Hochdruckgürtel, der mit erstaunlicher Beständigkeit wehenden Passate oder der sich in unseren Breiten immer wieder durchsetzenden Westwindzirkulation müssen sicherlich auch noch andere Überlegungen angestellt werden. Mitunter kann der eine Effekt den anderen überdecken und es ist wahrlich keine leichte Aufgabe hier dem eigentlichen physikalischen Prozeß auf den Grund zu kommen.

Kehren wir also zu dem eigentlichen Problem zurück. Die großräumigen, im Mittel dominierenden Windsysteme wurden auf den Ozeanen bereits frühzeitig von den Segelschiffahrern erforscht und für ihre großen Entdeckungsfahrten genutzt. Im Westwindband der gemäßigten Breiten wäre es einem Columbus wohl unmöglich gewesen den atlantischen Ozean zu überqueren. Er mußte schon bis zu den Gebieten der Nordostpassate vordringen, um zu dem neuen Kontinent zu gelangen. Für die Rückfahrt nach

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Europa konnte er dann eine weiter nördlich gelegene Route einschlagen, die ihn mit dem vorherrschenden Westwind eine rasche Überfahrt brachte. Meteorologisch gesehen stellten sich also der Erforschung der Erde in Richtung von Ost nach West beträchtliche Schwierigkeiten entgegen. Interessanter Weise haben sich die großen Entdecker dadurch nicht abschrecken lassen und der Zug nach Westen (der untergehenden Sonne entgegen) wurde von den Forschern einer entgegengesetzten Fahrtrichtung immer wieder vorgezogen.

Der erste, der sich Vorstellungen über die rein physikalische Natur der beobachteten Windsysteme machte, war wohl George Hadley im Jahre 1735. Er präsentierte bereits eine Theorie der Allgemeinzirkulation, die schon viel Anschauliches aufwies und die auch die Grundlage für die weiteren Überlegungen bildete. Hadley argumentierte folgendermaßen: Wegen der stärksten Einstrahlung wird die Luft nahe dem Äquator offenbar auch am stärksten erwärmt. Da sie gegenüber der weniger warmen Umgebung spezifisch leichter wird, steigt sie hoch und strömt dann in der Höhe polwärts ab. Das Defizit in den unteren Schichten wird dadurch ausgeglichen, daß weniger warme Luft von Nord und Süd gegen den Äquator fließt. Ein wenig später hat dann der berühmte Astronom Halley diese Theorie seines Kollegen ähnlichen Namens etwas modifiziert, indem er noch die ablenkenden Kräfte der Erdrotation (sogenannte Coriolis-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

kräfte) in die Theorie einbaute. Aus Hadley's Nord- und Südströmung zum Äquator sollte nach Halley eine Nordost- bzw. Südostströmung werden, wie sie tatsächlich den beobachteten Windsystemen der Passate entspricht. Sicherlich haben diese Anschauungen schon einiges für sich und gehen von einem bestechend einfachen Zirkulationsschema aus. Sie haben nur den einen Fehler, daß sie zu einfach sind und daher nicht stimmen können. Dies wurde bald durch Auswertung des Beobachtungsmaterials festgestellt. Die Beobachtungen lieferten folgendes Ergebnis: Es müssen auf jeder Halbkugel mindestens drei Zirkulationszellen existieren, nämlich die tropische zwischen dem Äquator und dem subtropischen Hochdruckgürtel (0 bis etwa 35 Grad Breite), die Zirkulationszelle der gemäßigten Breiten (daran anschließend bis etwa 65 Grad Breite) zwischen dem subtropischen Hoch und der polaren Tiefdruckrinne und schließlich die polare Zelle von rund 65 Grad Breite bis zu den Polen. Dieses Schema der dreizelligen Struktur blieb lange Zeit anerkannt und fand Eingang in alle Lehrbücher der Meteorologie und Klimatologie, obwohl es einige recht bedenkliche Schönheitsfehler aufweist, die den Theoretikern arges Kopfzerbrechen verursachten. Wir wollen einmal festhalten, was in diesem Schema, das durch direkte Beobachtungen nahegelegt wird, behauptet wird. Die Energiezufuhr von der Sonne zeigt eine markante Breitenabhängigkeit und soll sich in Ausbildung von

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Zirkulationszellen bemerkbar machen, also in Strömungen, die wesentlich meridional orientiert sind. Daß wir tatsächlich vielfach zonale Strömungen beobachten, beruht auf der Ablenkung der ursprünglich induzierten Meridionalkomponenten durch die Erdrotation. Durch Mitteilung über genügend langjähriges Material erhalten wir wieder die meridionalen Zellen, die eigentlich das Anfangsstadium angeben sollten. Stimmt diese Überlegung aber wirklich mit den physikalischen Prinzipien überein? Diese Frage ist nicht ohne weiteres zu bejahen. Die stärksten Einwände gegen das oben angeführte Dreizellenschema kommen von der mittleren Zirkulationszelle in den gemäßigten Breiten. Schon frühzeitig erkannten die Theoretiker, daß diese Zelle nicht im Sinne einer Wärmekraftmaschine verläuft (Sandströmscher Satz) mithin nicht aus dem Vorrat an potentieller Energie in diesen Breiten gespeist werden kann. Die Strömung muß nämlich an der Erdoberfläche, d. h. bei hohem Druck, von der niedrigeren Temperatur zur höheren gerichtet sein, also etwa auf der Nordhalbkugel von Nord nach Süd. Dies ist für die mittlere Zirkulationszelle eben nicht erfüllt. Überhaupt machte das markante Westwindband in den gemäßigten Breiten, das wir ja immer wieder (auch im Einzelfall) beobachten können, bei der Anwendung der Hadleyschen Vorstellungen große Schwierigkeiten. Als nämlich durch die modernen Radiosondenaufstiege genügend viel Material über Windbeobachtungen in größerer

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Höhe gesammelt werden konnte, zeigte sich, daß auch die „obere" Luftströmung in den mittleren Breiten west-östliche Richtung bevorzugt. Das war aber für unser Schema ein schwerer Schlag. Nach Hadleys Ansicht müßte sich doch die Luftströmung in der Höhe umkehren, wie sie dies bis zu einem gewissen Grad auch in der tropischen Zirkulationszelle tut (dem Passat in Bodennähe steht ein entgegengesetzt orientierter Antipassat in der Höhe gegenüber). Also die mittlere Zelle wurde das Sorgenkind der Theoretiker. Der große österreichische Meteorologe F. Exner versuchte einen Ausweg aus der Situation zu finden. Er vertrat die Ansicht, daß in der mittleren Zirkulationszelle die vielen dort auftretenden Tief- und Hochdruckgebiete die eigentlichen Träger des Energieumwandlungsprozesses seien. In ihrem Bereich kommt es zu allen möglichen Luftströmungen aber, wie man zeigen kann, im Jugendstadium tatsächlich zu einem Energiefluß vom höheren Niveau zum tieferen, also zu einer Zirkulation, die dem Sandströmschen Satz entsprechen würde, die „direkt" im Sinne einer Wärmekraftmaschine verläuft. Daß dem wirklich so ist, hat schon vor Exner ebenfalls ein Österreicher, nämlich der große Theoretiker M. Margules, bewiesen. Wenn allerdings die Tiefdruckgebiete, die ja in den mittleren Breiten Träger der markanten Wettererscheinungen sind, altern, dann erreichen sie rasch ein Stadium, wo die Zirkulation wieder indirekt wird. Trotzdem sind diese

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

stationär gewordenen Druckgebilde recht langlebig. Man war daher gezwungen, trotz Exners Versuch das Schema zu retten, anzunehmen, daß ein Gutteil der Energie, die in den gemäßigten Breiten verbraucht wird von „auswärts" stammt, also von denjenigen Zellen, die sich physikalisch richtig benehmen, d. h. in erster Linie von dem Überschuß der tropischen Zelle. Man kam lange Zeit nicht auf die Idee, daß der Überschuß dort vielleicht gar nicht so groß sein könnte. Die kräftige Erwärmung in den Gebieten nahe dem Äquator ist für jeden Beobachter so eindrucksvoll, daß es nur zu verständlich erscheint, wenn ein Teil davon den nördlicheren Breiten zu Gute kommen soll. Das tut es wohl auch. Aber die weiteren Forschungen, die gerade in den allerletzten Jahren angestellt wurden, brachten wieder eine Überraschung. Man kann die Stärke einer Zirkulationszelle nach verschiedenen Gesichtspunkten feststellen. Eine Methode, die angewendet wurde, beruht auf Bestimmung des Transportes von sogenanntem Rotationsmoment. Bei meridional orientierten Strömungen muß immer ein Transport von solchem Rotationsmoment stattfinden. Wir können hier allerdings nicht auf die Einzelheiten dieser Rechnungen eingehen. Wichtig ist aber ein Ergebnis dieser Untersuchungen: Ziemlich übereinstimmend ergab sich, daß gerade die mittlere Zirkulationszelle die aktivste, die stärkste ist, sodaß im Gesamteffekt über die ganze Halbkugel die Wärmekraftmaschine wieder falsch läuft. Es kann

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

ja nicht so sein, daß diejenige Zelle, die zumindestens zu einem Teil ihre Energie aus den anderen bezieht, am stärksten entwickelt ist. Das ist physikalisch unmöglich. Damit war aber dem obigen Dreizellenschema der Todesstoß versetzt. Ein Zirkulationsschema, das im Gesamteffekt nicht mehr im Sinne einer Wärmekraftmaschine verläuft, kann nicht zur „Erklärung" der Beobachtungsergebnisse verwendet werden. Man kehrte daher konsequenter Weise die ganze Betrachtungsweise vollständig um. Nicht die meridionalen Zirkulationen sind das primäre der Allgemeinzirkulation auf der Erdoberfläche und die zonalen Komponenten sind eine Folge derselben, sondern gerade das Umgekehrte ist der Fall. Die breitenabhängige differenzielle Erwärmung durch die Sonnenstrahlung führt zur Entwicklung von Wellenstörungen, die sich zu Tiefdruckgebieten oder Hochdruckgebieten ausweiten. Diese an sich eng begrenzten „Störungen" greifen sehr aktiv in den meridionalen Austauschprozeß von Rotationsmoment und Energie ein. Die Folge ist eine an Stärke zunehmende zonale Strömung. In gewissen Breiten manifestiert sich das geradezu in dem Auftreten von Strahlströmen „Jet-Streams", die zonale Windgeschwindigkeiten von einigen 100 km/h aufweisen. Jetzt setzen die ablenkenden Kräfte der Erdrotation ein, die umso größer sind je größer die Windgeschwindigkeit ist, und das Endresultat sind dann meridionale Komponenten, also gerade die Strömungen, die im ur-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

sprünglichen Schema an erster Stelle standen. Ob nun diese modernste Anschauung ganz ins Schwarze trifft, ist noch nicht erwiesen. Die radikale Umkehrung unserer Vorstellungen führte natürlich auch zu Einwänden, so daß gewisse Einzelheiten des neuen Schemas noch zu klären wären. Aber eines ist sicher. Das alte Schema ist endgültig zu Fall gebracht.

Eine wesentliche Stütze für die neue Anschauung über die großräumigen Luftzirkulationen fand sich in Modellexperimenten. Man hat lange Zeit immer den Stoßseufzer der Meteorologen vernommen, daß in ihrer Wissenschaft, der Physik der Atmosphäre, Experimente unmöglich sind und sie daher vor sicherlich ungleich schwierigeren Problemen stehen als etwa die Experimentalphysiker, die sich die notwendigen Rand- und Anfangsbedingungen durch sinnreiche Experimente einrichten können. Aber das stimmt nicht ganz. In den letzten Jahren hat man vor allem in Amerika sehr erfolgreich versucht, die Allgemeinzirkulation auf der Erdkugel im Experiment als „Ähnlichkeitsversuch" dazustellen. Nach anfänglichen Rückschlägen stellten sich erstaunliche Erfolge ein, die unser Wissen über die Ausbildung von Zirkulationszellen beträchtlich vermehrten. Man verwendet bei diesen Versuchen ein zylindrisches Gefäß, das mit Flüssigkeit gefüllt ist. Dieses Gefäß wird nun in Rotation versetzt, wobei der äußere Rand erwärmt, die Rotationsachse dagegen abgekühlt wird. Natürlich muß der Grad der Erwärmung und die Rotations-

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

geschwindigkeit richtig dimensioniert werden, will man die Ergebnisse auf die Verhältnisse auf der Erdkugel beziehen. Die Bewegung der Flüssigkeit wird durch Beimengung von Spurenelementen sichtbar gemacht. Man konnte sich bei diesen Experimenten einige Erfahrungen zu Nutze machen, die durch die jahrelangen Untersuchungen von Strömungen im Windkanal gewonnen wurden. Auch dort und bei ähnlichen Experimenten im Modellschiffsbau hat man das Problem zu lösen, inwieweit die Modellversuche mit den tatsächlichen (ungleich größeren) Bewegungsvorgängen übereinstimmen. — Die Experimente mit der rotierenden Wasserschale brachten sehr aufschlußreiche Resultate. Zum Beispiel konnte man die Wellenformation, die zur Ausbildung der Tief- und Hochdruckgebiete führt, in der Flüssigkeitsbewegung erkennen. Bei bestimmten Rotations- und Erwärmungsverhältnissen kam es auch zur Ausbildung von Strahlströmen und dergleichen mehr. Der besondere Wert dieser Experimente liegt darin, daß man durch verschiedene Rotationsgeschwindigkeit und verschiedene Erwärmung sehr unterschiedliche Zirkulationen erzeugen kann. Die Verhältnisse auf der Erde werden dann am besten wiedergegeben, wenn die Erwärmung schwach, die Rotation aber verhältnismäßig groß ist. Das Experiment zeigte aber auch, daß eine Hadley-Zirkulation durchaus möglich ist, jedoch nur dann, wenn das Temperaturgefälle zwischen Äquator und Pol groß und die Rotation klein ist. Also eine einzige

©Ver. zur Verbr.naturwiss. Kenntnisse, download unter www.biologiezentrum.at

Zirkulationszelle zwischen Äquator und Pol wäre denkbar. Daß diese Zirkulation auf der Erde nicht auftritt, verdanken wir der relativ großen Rotationsgeschwindigkeit unseres Planeten. Ein anderer Planet, der eine andere Eigenrotation besitzt und anderen Einstrahlungsverhältnissen unterliegt, muß auch eine andere Allgemeinzirkulation aufweisen. Hier handelt es sich zwar noch um Spekulationen, die aber vielleicht in nicht zu ferner Zeit Bedeutung erlangen, wenn es einem Raumkörper gelingt, die Strömungen in der Atmosphäre anderer Planeten zu studieren.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Schriften des Vereins zur Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse Wien

Jahr/Year: 1964

Band/Volume: 104

Autor(en)/Author(s): Reuter Heinz

Artikel/Article: Moderne Anschauungen über großräumige Luftzirkulationen. 83-95