

Literatur:

- 1a. B. Brockamp und K. Wölcken: Die seismischen Ergebnisse der Hauptexpedition;
- 1b. B. Brockamp: Wiss. Ergebnisse der Deutschen Grönland-Expedition A. Wegener, Bd. I, Leipzig 1933. Ergänzende Untersuchungen.
2. B. Brockamp: Überlegungen zur Temperaturverteilung im Inlandeis auf Grund seismischer Ergebnisse. Wiss. Ergebn. der Deutschen Grönland-Expedition A. Wegener, Bd. III, Leipzig 1935.
3. B. Brockamp: Nachtrag zu den Wiss. Ergebn. der Deutschen Grönland-Expedition A. Wegener. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh. 93, 1951.
4. B. Brockamp: Verfahren zur Feststellung des Temperatur- und Aggregatzustandes in Gefrierzylindern von Gefrierschächten. Dez. 1950. Patentschrift: Nr. 916044, Klasse 5c.
5. W. Lotze: Schallgeschwindigkeitsmessungen von Eis in Abhängigkeit von Druck und Temperatur. Zeitschrift f. Geophysik, Bd. 23, 1957.
6. G. de Q. Robin in: Norwegian-British-Sverige Antarctic Expedition 1949—52. Scientific Results. Vol. 5, Glaziology III, Oslo 1958.
7. J. J. Holtzscherer: Rapports scientifiques des Expéd. Polaires Françaises, N III₂, 1954.
8. O. Förtsch u. H. Vidal: Die seismische Vermessung des großen Gurgler Ferners in den Ötztaler Alpen. Gerlands-Beiträge zur Geophysik, Bd. 67, H. 1, 1958.
9. E. von Eder: Ann. der Physik, Bd. 1, 1947.
10. W. Lotze: Beitrag zur Methodik der Karstuntersuchungen auf geoelektrischer Basis. Dissertation Münster, 1956.
11. Colette Lefèvre et M. H. Fournier: Mesures et enregistrements telluriques sur le Glacier d'Aletsch. Comp. rend. 244, 1957.
12. Colette Lefèvre, P. Albertinoli, A. Bauer, A. Blum, L. Cagnard, A. H. Fournier: Mesures électriques et telluriques sur le grand glacier d' Aletsch. Ann. d. Geophysiques 13, 1957.
13. L. Cagnard: Abaque pour sondage électrique sur glace. Ann. d. Geophys. 15, Nr. 4, 1959.
14. Mme C. Queille-Lefèvre, M. M. Bauer et Girard: Premier essai de mesure électrique d'épaisseur d'un glacier (Glacier Saint-Sorlin) Ann. d. Geophys. T 15, Nr. 4, 1959.
15. B. Brockamp: Erweiterter Nachtrag zu den wiss. Ergebn. der Deutschen Grönland-Expedition A. Wegener. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe B. Angewandte Geodäsie, Heft Nr. 48, München 1959.
16. V. Fritsch: Grundzüge der angewandten Geoelektrik, Wien 1949.

Strahlungskurve, allgemeine Zirkulation und Eiszeiten

Von Walter Wundt, Freiburg i. Br. *)

I. Die **Strahlungskurve** nach Milankovitch — berechnet aus der periodisch schwankenden Stellung der Erdachse, der Lage des Perihels in der Erdbahn und ihrer wechselnden Exzentrizität — hat als Erklärung für die Eiszeiten immer Beachtung, aber auch viele Gegner gefunden (vgl. 8, S. 154 und 10b). Im letzten Jahrzehnt sind nun neue Gesichtspunkte dazugekommen, die dazu auffordern, die frühere Beurteilung und Ausdeutung der Strahlungskurve eingehend nachzuprüfen. Van Woerkom (9) und Brouwer haben die Kurve unter Beibehaltung der

*) Prof. Dr. Walter Wundt, (17b) Freiburg i. Br., Urbanstraße 3.

Grundlagen, aber mit jüngeren Daten für die Planetenmassen neu berechnet; Flohn u. a. haben die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre auf neue Grundlagen gestellt; Arrhenius (1), Emiliani (2a, b) und Ewing haben aus den Bohrkernen in der Tiefsee auf rhythmische Klimaänderungen geschlossen; Wundt (10b) hat für die Strahlungskurven den Gesichtspunkt des Ausgleichs zwischen den verschiedenen Breiten und den beiden Halbkugeln in den Vordergrund gestellt. Zahlreiche Befunde aus den verschiedensten Teilen der Erde lassen erkennen, daß die Durchschnittstemperatur in der Nähe der eiszeitlichen Kalotten um rund 10° , in den Tropen nur etwa 4° niedriger war als heutzutage, während man sich vorher mit einer Durchschnittsabkühlung von etwa 5° für die ganze Erde begnügt hatte und geneigt war, für diese vermeintlich gleichmäßige Abkühlung eine exogene, d. h. nicht mit den Erdbahnelementen zusammenhängende Eiszeitursache anzunehmen. Merkwürdigerweise scheuten sich manche sogar davor, die Abkühlung in den Tropen als eine Sekundärwirkung von den höheren Breiten her anzusehen. Dabei sind doch das solare (durch Strahlung allein bedingte) und das advective (durch seitliche Wärmezufuhr beeinflusste) Klima eine altbekannte Tatsache, die sich durch den Wärmeaustausch zwischen hohen und niedrigen Breiten zu allen Zeiten wiederfinden muß. Hat man sich aber hier hineingedacht, dann ist es zur Ausgleichstendenz zwischen den Halbkugeln nur mehr ein Schritt. Der jahreszeitliche Ausgleich über den Äquator hinweg mit seinem Wechselmonsun und entsprechenden Meeresströmungen ist für Südasien bekannt, ebenso der allgemeine Übergriff der kühleren Südzirkulation auf die Nordhalbkugel auf der ganzen Erde. Ging der Minderung der Sommerstrahlung, die in den höheren Breiten auf der Nordhalbkugel um 20 000 v. d. G. eintrat, eine solche um 30 000 auf der Südhalbkugel voraus, dann war das dem Haupt-Würm vorausgehende Interstadial abgekürzt, die Tropenmeere wurden von Süden her abgekühlt und jener letzte Vorstoß verstärkt — im Gegensatz zum Alt-Würm, das von Süden her keine Unterstützung fand und daher gegenüber dem Haupt-Würm als der schwächere Vorstoß erscheint (vgl. die Abbildung). In ähnlicher Weise wurde der Anstieg der Temperaturen nach dem Haupt-Riß der Nordhalbkugel (um 120 000 v. d. G.) durch eine starke Strahlungssenkung im Süden (um 110 000 v. d. G.) gestoppt, wodurch wir eine Erklärung für das auf der Nordhemisphäre auftretende Nach-Riß (die Wartheiszeit) erhalten. Es ist dabei natürlich notwendig, zwischen den für 65° Nord und die Gesamterde gegebenen Kurven (I und III) weiter zu interpolieren. Als Grundtatsache ist aber festzuhalten, daß die Strahlungsänderungen in den hohen Breiten beider Halbkugeln im wesentlichen gleichsinnig verlaufen, wenn auch mit gegenseitigen Zeitverschiebungen bis zu 10 000 Jahren. Nur in den niedrigen Breiten ist der Verlauf gegensinnig; aber dies ist infolge des raschen Ausgleichs (zweimaliger Hoch- und Tiefstand der Sonne im Lauf des Jahres) und wegen des Wegfalls der Albedowirkung (infolge Mangels an Schnee- und Eisflächen) als Klimaeinfluß belanglos. — Der Schwerpunkt der Schnee- und Eisbildung liegt übrigens nicht an den Polen, vielmehr in den hohen Mittelbreiten (etwa 50° bis 70°), wo auf beiden Halbkugeln sowohl Auflagerungsflächen für Gletscher als auch feuchtigkeitsbringende Meeresströmungen vorhanden sind. Fehlt die zweite Voraussetzung — wie jetzt in der inneren Antarktis und in Nordgrönland — dann stockt die Ernährung des Eises, und es bilden sich Kältewüsten, die sogar die Gletscherbildung verhindern können. — Die Rolle, welche die Rückstrahlung von den weißen Flächen (die erhöhte Albedo) in Form von Selbstverstärkung der Vereisung ausübt, kann jetzt wohl als allgemein anerkannt gelten; es wäre aber noch zu klären, inwieweit auch verstärkte Bewölkung in der Eiszeit an diesem Vorgang teilgenommen hat.

Während die großen Klimaänderungen in den periodischen Schwankungen der Erdbahnelemente (zusammen mit sekundären Wirkungen) ihre Erklärung finden, können die kleineren mit kurzfristigen Änderungen der Solarkonstante in Verbindung gebracht werden. Die Eisgrenze im Nordpolarmeer ist in den letzten Jahrzehnten um mehrere 100 km zurückgewichen, und gleichzeitig damit ist das Weltmeer jährlich um etwa 1 mm gestiegen. Auch das Vorstoßen der Gletscher

von 1600—1850 n. Chr., als „Kleine Eiszeit“ bezeichnet, kann nicht aus der Strahlungskurve erklärt werden, so wenig als die Wärmeschwankung des Alleröd und der darauf folgende Vorstoß der Gletscher in der frühen Postglazialzeit. Diese kleineren Schwankungen sind mit den Kälte- und Wärmerückfällen im Jahreslauf zu vergleichen, die sich im wesentlichen aus der verschiedenen Erwärmung des Meeres und Festlandes herleiten. Einen Hinweis für die jetzige Wärmeschwankung geben die Messungen der Smithsonian Institution, die seit 1922 eine Zunahme der Solarkonstante um 0,01 Prozent pro Jahr erkennen lassen. Allerdings werden diese Messungen von den Fachleuten als nicht genau angesehen; dies liegt vor allem daran, daß es schwierig ist, den Ultraviolett-Teil der Strahlung, der in den höheren Schichten der Atmosphäre schon absorbiert wird, einwandfrei zu bestimmen. Übereinstimmung herrscht darüber, daß Sonnenfleckentum stärkere, Sonnenfleckentarmut schwächere Aktivität der Sonne bedeuten. Dabei kann dahingestellt bleiben, ob die Wirkung der Aktivität mehr der Gesamtstrahlung oder — nach der Hypothese von W i l l e t t — der UV-Strahlung zugeschrieben wird.

II. Die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre wird, wie bekannt, durch die verschiedene Bestrahlung der hohen und niedrigen Breiten in Gang gesetzt. Dabei faßt man meist nur die stärkere Erwärmung der Tropen ins Auge und folgert daraus für eine nicht rotierende Erde aufsteigende Luftströme am Äquator, absteigende an den Polen und in der Höhe polwärts fließende, am Erdboden äquatorwärts fließende Winde. Man kann aber dem Motor über den Tropen einen zweiten davon unabhängigen Motor gegenüberstellen, der durch Zusammensacken der kalten Luft in den hohen Breiten und ihr Abströmen am Boden zu den niedrigen Breiten zustandekommt. Die beiden Motoren arbeiten im gleichen Sinne, aber bei manchen Erscheinungen, z. B. beim Auftreten kalter Winde in den Mittelbreiten, tritt der zweite Motor stärker in Erscheinung als der erste.

Bekanntlich wird dieses einfache System durch die Erddrehung dahin verändert, daß im stationären Zustand (ohne Reibungseinfluß) die Südwinde zu Westwinden, die Nordwinde zu Ostwinden werden. Infolgedessen geht der Meridional- und Wärmeaustausch größtenteils auf dem Umwege über die Breitenkreise, also durch Zonalzirkulation vor sich. Es tritt dabei die Frage auf, welche Größe man überhaupt zur Messung der Meridionalzirkulation verwenden soll. Als solche hat sich für die mittleren Breiten der Zonalindex, d. h. die wechselnde Stärke der Westwinde, eingebürgert; sind diese schwach, dann muß auch die Meridionalzirkulation geschwächt sein; sind sie stark, dann ist sowohl Zonal- als Meridionalzirkulation gesteigert, wobei aber die Änderung der Meridionalzirkulation als das Primäre anzusehen ist. — Ein Hauptgrund für entstehende Unstimmigkeiten liegt darin, daß bei der Zonalzirkulation die Süd- und Nordwinde, bei der Gesamtzirkulation die Boden- und Höhenwinde zusammengenommen und unter sich ausgeglichen werden. Die Verstärkung des „Zonalindex“, der ja in den unteren Schichten gemessen wird, verbindet sich im allgemeinen mit einer Stärkung der Südwinde, geht also mit Abschmelzung einher; umgekehrt bedeutet seine Schwächung eine Steigerung der (umgebogenen) Nordwinde und damit Temperatursenkung. Ist letztere aber zu groß, dann verliert sich die schneebildende Kraft und der Wasser- und Eishaushalt wird steril. In dem Hereinspielen der Bildung von festem Niederschlag kommt zum Ausdruck, daß die Betrachtung von Strömungen allein zur Erklärung der Glaziale nicht hinreicht.

Bei der eiszeitlichen Zirkulation kann man von verschiedenen Punkten ausgehen. Entweder man betrachtet, von der Strahlungskurve kommend, die kühlen Sommer und schneereichen Winter der Kaltzeiten in den höheren Breiten und findet dort schwächere Gradienten in den Sommern, welche die Wärmeverfrachtung verlangsamen, größere in den Wintern, die sich aber an der Nullgradgrenze (örtlichen Schneegrenze) in vermehrtem Schneefall äußern und die Sommerwirkung unterstützen. Oder man geht von den großen Eisflächen mit ihrer selbsttätig (durch erhöhte Reflexion) erniedrigten Temperatur aus, und muß dann stärkere Gradienten mit gesteigerter Meridional- (und Zonal-) Zirkulation als

verwirklicht annehmen. Dieser Widerspruch löst sich dadurch, daß man das Frühglazial und das Hochglazial getrennt betrachtet. Die veränderte Strahlung im Frühglazial läßt die Meereisgrenze auf beiden Halbkugeln äquatorwärts vorrücken und schafft den Kern der großen Eisfelder in den Küstengebieten. Die strahlungsbedingten schwachen Gradienten im Sommer geben in dieser Phase dem zonalen Austausch einen gewissen Vorrang vor dem meridionalen. Aber mit der Ausbreitung der Eisflächen machen sich diese selbständig und bilden durch Selbstverstärkung intensive Kältezentren. Die von hier ausfließenden Kaltströme (mit den „jet-streams“ gleichzusetzen) verstärken also den schon immer vorhandenen zweiten Motor (s. Beginn des Abschnittes II) und steigern die meridionale Zirkulation in der Richtung auf den Äquator, aber eben nur in den unteren Luftschichten, während die Rückwanderung dieser Luftmassen in der Höhe für die Erdoberfläche von geringer Bedeutung ist. Wir erinnern uns in diesem Zusammenhang daran, daß jede Halbkugel durch den 30. Breitenkreis in zwei gleiche Hälften zerteilt wird ($\sin 30^\circ = 0,5$), daß also — rein flächenmäßig betrachtet — die Zone 0° bis 30° die wärmegebende, die Kalotte von 30° bis 90° die nehmende ist. Die Wärmeabgabe an die höheren Breiten ist also durch Schwächung des Gradienten im Frühglazial verringert; bei vorwiegend zonalem Transport bleibt den höheren Breiten ihre strahlungsmäßig bedingte Kälte erhalten. Auch im Hochglazial bleiben diese Einflüsse als Komponenten bestehen; aber daneben tritt der zweite Motor in Funktion und führt den mittleren Breiten unter Verstärkung des äquatorwärts gerichteten Gradienten am Boden weitere Kaltluftmassen zu.

Eine weitere Wandlung tritt erst ein, wenn sich mit dem Eintritt ins Spätglazial die von den Erdbahnelementen bestimmte Strahlung wieder ändert und mit gewisser Verspätung auch die Gletscherflächen aus Mangel an Ernährung wieder zurückgehen. Mit dem Rückgang der Reflexion an den weißen Flächen verliert der zweite Motor seine Kraft, während der erste an Stärke wieder gewinnt, bis der normale Zustand bei einer mittleren Bestrahlung wiederhergestellt ist. — Wenn wir dieses Gefüge in seiner zeitlichen Entwicklung betrachten, dann erscheint der Zonalindex für die Charakterisierung eiszeitlicher Verhältnisse wenig geeignet. Er wird bekanntlich mit den Westwindkomponenten in der Breite 35° bis 55° definiert, und man spricht bei relativ starken Westwindkomponenten von einem high index, bei schwachen von einem low index. Im Frühglazial muß er etwas gemindert, im Hochglazial durch die kalten Bodenströme, die zu Ostwinden umgebogen werden, weiter geschwächt worden sein. Nehmen wir hinzu, daß die nordsüdlich und südnördlich transportierten Luftmassen in letzter Linie gleich sein müssen, daß ferner die Kaltluftmassen vorwiegend die unteren, die Warmluftmassen die höheren Luftschichten einnehmen, daß endlich die bisherigen Messungen nur bestimmte Längen-Sektoren erfaßt haben, so scheint eine erschöpfende Meßgröße für die „verstärkte allgemeine Zirkulation“, um eine Bezeichnung von A. Wagner (8, S. 17) zu gebrauchen, noch nicht gefunden. Aber sie zeigt sich in den meteorologischen Einzelementen Luftdruck, Niederschlag, Temperatur, Windstärken; ferner sehr anschaulich in zahlreichen Zirkumpolar-Wetterkarten, die sich besonders in den Arbeiten von Flohn (3, a bis g) finden.

III. Die historische Entwicklung der Auffassungen über die allgemeine Zirkulation zeigt starke Wandlungen. In Deutschland hat besonders Flohn (3, a bis g) neue Gesichtspunkte aufgestellt, vor allem durch eine dynamische Begründung der Zirkulation, durch die Untersuchungen über die innertropische Westwindzone unter Einbeziehung der Monsune und die Auffassung der Hoch- und Tiefdruckgürtel als Mittelzustand aus zyklonalen und antizyklonalen Zellen. Von Rodewald (6a) sei (im Anschluß an A. Hofmann) ein Satz zitiert, der den Zustand der Troposphäre vom Winter 1950/51 so schildert: Um den Gleichgewichtszustand „ergeben sich mehr oder minder starke Schwankungen, wo eine stark zyklonale Zirkulation in hohen Mittelbreiten mit einer Abkühlung des arktischen Luftkörpers, eine mehr meridionale Zirkulation mit dessen Erwärmung gekoppelt ist. Dies läßt sich zwanglos so deuten, daß der Typus der

meridionalen Zirkulation“ (gegenüber dem der zonalen Zirkulation) „der austausch-wirksamer ist“. Diese Auffassung, hier nur für einen Winter und für die untere Hälfte der Atmosphäre ausgesprochen, stimmt mit der meinigen überein (vgl. aber Rodewald in 6b). In diesem Zusammenhang sei auf ein Kärtchen hingewiesen, aus dem Flohn (3b) die resultierende Windströmung in den Hochalpen (Sonnblick, 3100 m) als Vektor für den Monat Februar im Mittel 1938/47 und 1911/20 ein-ander gegenüberstellt. Der Vektor 1938/47 zeigt eine starke Nordkomponente, der für 1911/20 annähernd West-Ost-Richtung, also zonale Zirkulation an. Nun hat 1911/20 ein besonders von Kinzl betonter Gletschervorstoß kleineren Ausmaßes stattgefunden, der den allgemeinen Rückzug seit Ende des vorigen Jahrhunderts vorübergehend unterbrochen hat. Hier erscheint also tatsächlich die zonale Zirkulation mit einem Vorgehen der Gletscher verknüpft. Das Februar-Temperaturmittel 1911/20 war mit $-10,6^{\circ}$ um $1,5^{\circ}$ höher als das Mittel $-12,1^{\circ}$ im Zeitraum 1938/47. Dies bedeutet aber keinen Widerspruch zum Vorigen: denn die Ausschüttung von Schnee ist im allgemeinen um so ergiebiger, je näher wir an den Nullpunkt herankommen. Noch wesentlicher ist für das Verhalten der Gletscher die Sommer-temperatur und diese war, wie aus anderen Reihen hervorgeht, 1911/20 tatsächlich unter dem langjährigen Mittel. Wenn daher Flohn sowohl im Unterdruck des Kärtchens als im Begleittext den weltweiten Gletschervorstoß zwischen 1600 und 1850 als eine Periode vorwiegend meridionaler Zirkulation auffaßt, die um 1900 von vorwiegend zonal abgelöst wurde, so kann ich dem nicht beistimmen. Nach dem Beispiel 1911/20 dürfte die „kleine Eiszeit“ von 1600—1850 in der Schneegrenzhöhe eher mit zonaler Zirkulation verknüpft gewesen sein, während sich nach 1900 (mit Ausnahme von 1911/20) eine mehr meridionale Zirkulation (mit stärkerer Wärmezufuhr aus dem Süden) durchsetzte.

Man kann allerdings darauf hinweisen, daß die strengen Winter der letzten Jahrzehnte mit vorwiegend meridionaler Zirkulation verbunden waren, z. B. der überaus kalte Winter 1928/29. Aber hier handelt es sich um die Sekundärercheinung, die ich als zweiten Motor bezeichnet habe — eine Nord-Südströmung, die von den Kältezentren am Erdboden ausgelöst wird, keineswegs aber als gletscherbildend angesehen werden kann. Man kann diesen Vorgang auch kurzfristig bei unseren Witterungserscheinungen verfolgen: wir finden Schneefall bei mäßiger Kälte und dadurch Bildung einer Schneedecke; aber diese verhindert selbst durch Strahlungskälte weitere Schneefälle und trägt damit zu ihrem eigenen Verschwinden bei. Es sind nicht die strengen, sondern die schneereichen Winter, die die Gletscherbildung begünstigen. Und zu diesem Zweck ist notwendig, daß die neu sich bildenden Kälte-Antizyklonen immer wieder von schneebringenden Zyklonen verdrängt werden; es bedeutet, auf den Luftdruck übertragen, daß sich vor der Westküste der Kontinente regelmäßig neue Hochdruckgebiete bilden, die feucht-kalte Luft aus den höheren Breiten heranzuführen. So dürfte das Optimum für die Gletschervorstöße in Europa bei nicht zu tiefen Winter-temperaturen liegen, bei denen der Schnee in der Ebene immer wieder weggeräumt wird, während er in hohen Lagen liegen bleibt. Dies sind auch die Voraussetzungen, die wir für die Frühglaziale annehmen müssen.

Was die Sommer anlangt, so ist deren — in den Senkungen der Strahlungskurve eintretender — kühler Charakter ebenso wichtig wie der Schneereichtum der Winter. Umgekehrt muß erhöhte Sommer-Zustrahlung Interstadiale und schließlich Interglaziale hervorbringen. Eine solche Tendenz war in den letzten Jahrzehnten eindeutig zu beobachten (vgl. den Absatz vorher), aber es handelte sich nur um kleinere Schwankungen, die mit der Strahlungskurve nicht zusammenhängen. Hat sich, wie beobachtet wurde, die Solarkonstante in dieser Zeitspanne etwas erhöht, dann muß der allgemeine Gradient Äquator — Pol (der erste Motor) sich verstärkt haben und erhöhte Wärmezufuhr zum Pol muß eingetreten sein — hieraus das Zurückweichen der Eisgrenze, ev. ein Anstieg des Meeres. Aber noch eine weitere Folge macht sich schon in den beginnenden Warmzeiten bemerklich: ein Vorrücken der subtropischen Hochdruckgürtel gegen die Pole. In den langen Wärme-

perioden des Mesozoikums herrschte in Europa weitgehende Trockenheit und noch im Postglazial schob sich das mediterrane Klima mit seiner Sommertrockenheit über die Alpen nach Norden — dort die Dürreperioden der Pfahlbauten mit verursachend. Umgekehrt ist aus dem Vorrücken der Gletscher von 1600—1850 auf eine Absperrung des Wärmezufusses von den Tropen und Subtropen her bei relativ starker zonaler Zirkulation zu schließen. Dagegen zeigen die heißen Einzelsommer der letzten Jahrzehnte deutlich eine übernormale Nordwärtsverlagerung des mediterranen Hochdruckgürtels.

IV. Die Höhenträge in Zusammenhang mit den Ausbrüchen von Kaltluft aus hohen Breiten und als Teil der Meridionalzirkulation sind durch die Arbeiten von Flohn (3, a bis g) ein wichtiges Thema der Diskussion geworden. Die Bezeichnung Höhentrog deutet an, daß über Stellen, wo an der Erdoberfläche nur geringe Luftdruckunterschiede bestehen, unterhalb der Tropopause und schon im 500 mb-Niveau starke Druckeinkenkungen bestehen können, auf deren Rückseite Kaltluft mit stürmischen Winden in niedrige Breiten, u. U. bis zum Äquator herangeführt wird. Sie erklären sich zusammen mit der bodennahen Abkühlung in den hohen Breiten aus der Feuchtlabilität der Luftmassen. In feuchter Luft nimmt die Temperatur wegen des Freiwerdens von Kondensationswärme langsamer ab als in den trockenen Luftmassen der Umgebung; die feuchtwarmen Massen fließen oben seitwärts, lagern sich auf die trockenen und hinterlassen durch ihr Abströmen ein Defizit an Masse, das in der oberen Atmosphäre am stärksten bemerkbar wird (daher „Höhentrog“). Dazu tritt die Gesamtabkühlung der Luftmasse in den hohen Breiten (unter Mitwirkung der Wolkenoberflächen), die ein Zusammensacken des dortigen Luftkörpers und sein Vordringen gegen den Äquator verursacht (der „zweite Motor“ meines Abschnittes II, hier in etwas weiterem Sinne als dort gebraucht). Wegen des gesteigerten Temperaturunterschiedes Äquator — Pol im Winter tritt diese Erscheinung in der kalten Jahreszeit natürlich besonders stark auf. Die Kaltluftvorstöße endigen meist, aber nicht immer, am subtropischen Hoch; weiter nach Süden reichende Vorstöße erklären sich aus dem Zellencharakter dieses Hochs (vgl. Abschnitt III). Soweit die rohe Darstellung für die Jetztzeit, die klimatisch bekanntlich zwischen Glazial und Interglazial steht; in den Eiszeiten müssen die Vorstöße im allgemeinen weiter gegen den Äquator, in den Warmzeiten weniger weit gereicht haben.

Was die Lage der Höhenträge zu den Längengraden in der Jetztzeit anlangt, so sind sie nach den Forschungen Flohns (3, a bis g) in der Hauptsache stationär. Der bestausgebildete Trog befindet sich an der Ostseite Nordamerikas (Baffinbai, Labrador), ein schwach ausgeprägter liegt über Osteuropa etwa bei 40° östl. Länge, ein dritter, wieder stärkerer findet sich an der Nordostseite von Asien. Flohn vertritt den Standpunkt, daß die Tröge in den diluvialen Kaltzeiten weiter westlich lagen, um auf ihrer Rückseite die Schneemassen heranzuführen zu können, die zur Bildung des europäischen und des nordamerikanischen Inlandeises führten. Dies ist eine für das Frühglazial sehr plausible Annahme. Man kann auch — unter gewisser Vertauschung von Ursache und Wirkung (vgl. dazu 3g, H. 4) — annehmen, daß die damalige Lage der Eiszentren selbst eine Verschiebung der Ausstoßrichtung bei den Kaltluftmassen mit sich brachte. Nach letzterer Annahme lägen also die Tröge im Frühglazial wie heute und die Gletscherbildung wäre nur durch die geänderte Strahlung (im Winter erhöht, im Sommer erniedrigt) auf Grund der Erdbahnelemente erfolgt. Die Verschiebung der Tröge nach Westen wäre dann eine Folge der Inlandeisbildung, welche die Kaltluftausstöße in ihren Bereich verschob (die heutige Troglage verläuft östlich des ehemaligen Inlandeises). In diesem Zusammenhang sind auch Reliefeinflüsse im allgemeinen und die sogenannten blockierenden Antizyklen zu nennen, die sich gerade über dem Inlandeise bilden mußten. — Neben den thermischen Verhältnissen sind immer die Formen der Kontinente und die Gebirgszüge von Einfluß auf die Luftzirkulation. Die Stauung der Westströmungen durch die Anden, der wenig gehinderte Abfluß der Kaltluft im Osten Amerikas; das komplizierte Relief Europas mit dem Querwall der Alpen; die Küstengebirge Ostasiens und die Behinderung des Luftabflusses in

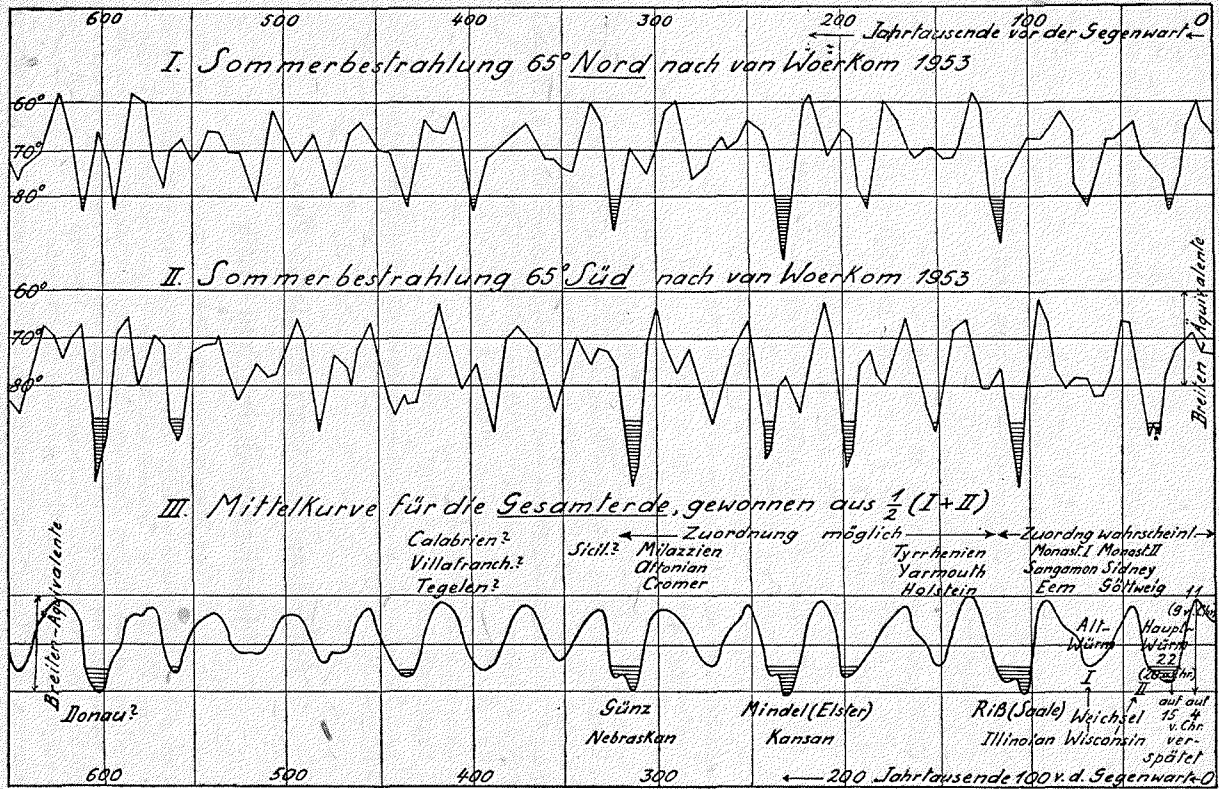
Zentralasien sind heute und erst recht in den Kaltzeiten beachtenswerte Faktoren für die Gestaltung der Luftströmungen und der Inlandeisfelder. Hierher gehören auch Land- und Meerengen, die den Verlauf der Meeresströmungen regeln. Noch heute ist der Golfstrom und damit der Atlantik der einzige Lieferant von Feuchtigkeit zum Nordpolarbecken, gegen den die Beringstraße vom Pazifik her überhaupt nicht ins Gewicht fällt. — An neuen Erkenntnissen zu diesen Fragen ist der L o m o n o s o w - R ü c k e n zu nennen, der das Nordpolarbecken, wenn auch erst in gewisser Tiefe, in zwei Teile zerschneidet. Können auch die Oberflächenströmungen den Rücken überschreiten, so ist doch der Rückfluß weithin gehemmt. Die im abgeschnittenen Teil des Polarmeeres kreisenden Eisinseln und die hart am Nordpol vorbeiziehende Drift von Ostsibirien gegen Nordgrönland zeigen, daß sich die Strömungen unter dem Einfluß der großen Kälte-Antizyklone tatsächlich nach der untermeerischen Schwelle einstellen. Dies hat zur Folge, daß das Rumpfpolarmeer klimatisch seinen Anschluß an Alaska-Nordkanada gewinnt und eine — gegen Amerika hin ausholende — Asymmetrie des Kältereservoirs um den Nordpol zustandekommt. Herr L a h n e r (Linz a. D.) hat mich zuerst auf diese Möglichkeiten die weiter untersucht werden sollten, brieflich aufmerksam gemacht.

V. Die Entwicklung und das Wiederverschwinden eines Glazials können wir uns in Nordeuropa etwa so vorstellen. Die Polareisdecke des Meeres, die heute etwa bei Spitzbergen liegt, breitete sich infolge der kühlen Sommer allmählich nach Süden aus; gleichzeitig bildete sich über Nordskandinavien eine Inlandeisdecke, die durch Selbstverstärkung infolge Albedowirkung weiterwuchs. Ein gewisser Abschnitt in der allgemeinen Vereisung wurde mit der teilweisen Erreichung der nordatlantischen Schwelle bei Island abgeschlossen; doch mag eine über den Wyville-Thomson-Rücken nach Norden reichende Warmwasserzunge noch lange den Nordraum mit Feuchtigkeit versorgt haben. Aber die Windverhältnisse wurden um diese Zeit einer grundlegenden Änderung unterworfen; man vergleiche dazu die Ausführungen von W u n d t (10a), die im Anschluß an die von M e i n a r d u s (5) für die Antarktis vertretene Auffassung gegeben wurden. Über der vereisten Fläche um den Nordpol bildete sich eine Dauer-Kälteantizyklone (von größerer Intensität als jetzt), aus der Kaltluft in Form von Nordostwinden abströmte. Wir brauchen uns diese Strömung nur einige hundert Meter stark zu denken, aber für den klimatischen Zustand der subpolaren Gebiete wurde sie ausschlaggebend und sie war imstande, auch die Meeresströmungen umzulenken. Der abgelenkte Golfstrom (Irmingerstrom südlich von Island) führte starke und relativ warme Wassermassen um Grönland herum in die Davisstraße und die Baffinbai. Von dort aus wurde Labrador und Nordkanada mit den großen Schneemassen überschüttet, aus denen sich das Inlandeis Nordamerikas bildete. In ähnlicher Weise wurde im Pazifik ein Teil des Kuro-Schio umgelenkt und die ostasiatische Küste mit Schnee überschüttet. Doch waren hier die Bedingungen — durch das Fehlen einspringender Meeresteile und infolge von Hemmungen durch querlaufende Gebirge — der Gletscherbildung weniger günstig. — Über Ost- und Mitteleuropa konnten sich die Ostwinde nach Süden hin bis in die Mittelmeergegend ausbuchten; die dortigen Vergletscherungen bezogen ihre Feuchtigkeit teils aus dem Atlantik, teils aus dem Mittelmeer, von wo Süd- und Westwinde auf den kontinentalen Kaltluftkörper aufglitten; man vergleiche dazu die im März 1931 bestehende Wetterlage, bei der in der Ebene Schneelagen von über 50 cm entstanden und dies bei Ostwinden, während die Alpengipfel Südwestwind meldeten.

Nach der Entwicklung der Eisdecken im Frühglazial betrachten wir die Verhältnisse im Hochglazial. Die Vereisung im Frühglazial wurde in den Küstengebieten gebildet und lehnte sich an das maritime Klima an, das uns auch heute tief liegende Schneegrenzen bei ausgeglichenen Temperaturen zeigt. Im Hochglazial rückte der Schwerpunkt der Eismassen allmählich ins Innere des Landes und kam dadurch mehr und mehr von seinem Ernährungsherd ab. Über den kontinentalen Inlandeisdecken bildeten sich ganzjährige Antizyklonen, die zwar Kälte, aber keinen Nachschub an Schnee brachten; kontinentale Zustände lösten allmählich die maritimen ab. Es ist derselbe Zustand, den wir jeden Winter (s. Absch. III) beobachten

können; zunächst stärkere Schneefälle bei mäßiger Kälte, dann Nachlassen der Niederschläge bei steigendem Barometerstand und Einsetzen scharfen Frostes, wobei die Luftdrucksteigerung mindestens teilweise eine Folge der durch den Schneefall eintretenden Strahlungskälte ist. Die Schneedecke erhält also schon in ihrer Bildung den Keim zu ihrer Zerstörung, indem sie antizyklonale Zustände heraufführt. Diese wären — zeitlich ausgedehnt — dem Hochglazial zu vergleichen und bringen in Bodennähe meridionale Strömungen hervor, die den (nach der Strahlungskurve) geschwächten Temperaturgradienten örtlich wieder verstärken. Ins Spätglazial treten wir ein, wenn die wieder wärmer werdenden Sommer eine überwiegende Abschmelzung, zunächst an den Rändern der Gletscher, dann von oben her in die Wege leiten. Dieser Zeitpunkt liegt gegenüber dem Strahlungsgang stark verspätet. Wir erinnern uns, daß sich der mittlere Temperaturgang im Jahre gegenüber dem Sonnenstand um einen vollen Monat verzögert. Noch viel größer sind die Verspätungen bei den Schnee- und Eisdecken. Die größte Schneehöhe finden wir auf dem Feldberg (Schwarzwald, 1500 m) Anfang März und nach den Beobachtungen am Rhonegletscher tritt dort die Schmelzperiode erst Mitte Mai, also rund einen Monat vor dem höchsten Sonnenstand, in Wirkung. Es darf daher nicht wundernehmen, daß sich sowohl die Maximalausdehnung der Gletscher als deren Abschmelzung um mehrere Tausend Jahre gegenüber dem Strahlungsgang verspätet; denn die Verzögerung muß doch größenordnungsmäßig zu den astronomischen Perioden (rund 20 000 und 40 000 Jahre) in ähnlichem Verhältnis stehen wie die jahreszeitlichen Verspätungen zur Jahreslänge.

VI. Zusammenfassung. Es liegt kein Anlaß vor, die Strahlungskurve als Grundlage für die Datierung der Eiszeiten zu verlassen. Die Neuberechnung durch van Woerkom (9) auf Grund veränderter Planetenmassen fordert aber eine andere zeitliche Zuordnung der Penckschen Eiszeiten, die sie auf 350 000 Jahre zusammendrängt (s. die Abbildung, vgl. auch Wundt in 10b und 10c). Die neue Zuordnung hat den Vorzug, daß die zahlreichen Strahlungsanstiege der älteren Kurve auf eine kleinere Zahl reduziert und mit den wirklich beobachteten Interglazialen bzw. Interstadialen in Einklang gebracht werden können. Gesichert erscheint der Zeitpunkt des postglazialen Strahlungsoptimums und des Haupt-Würm (strahlungsmäßig um 11 000 bzw. 22 000 vor der Gegenwart oder 9000 bzw. 20 000 v. Chr., aber klimatisch verspätet auf 4000 bzw. 15 000 v. Chr.), ferner das vorausgehende Götterweiser (Fellabrunner) Interstadial (40 000 bis 30 000 v. Chr.), auch noch das Alt-Würm (70 000 bis 60 000 v. Chr.), alles nach der C¹⁴-Methode in Übereinstimmung mit der Strahlungskurve; vgl. dazu die Arbeiten von De Vries (7) und Groß 4a, b, c). Nach diesen Übereinstimmungen kann auch die Lage des Interglazials Eem-Sangamon mit großer Wahrscheinlichkeit auf etwa 80 000 v. Chr. als Schwerpunkt angegeben werden und die große Riß-Saale-Eiszeit muß in mehreren Vorstößen, an denen die Südhalbkugel mitbeteiligt war, auf 110 000—90 000 v. Chr. gelegt werden. Die weitere Zuordnung des Großen (Holstein-)Interglazials, der Mindel (Elster-)Eiszeit, der Günz-Eiszeit und älterer Eiszeiten (z. B. Donau-Eiszeit) wird in wachsendem Maße unsicher. — Bei der Gegenüberstellung von Meridional- und Zonalzirkulation wird hier begründet, daß die Zonalzirkulation in den Frühglazialen stärker ausgebildet war als jetzt, weil sie die Advektion von Wärme aus den niedrigen Breiten herabsetzt und den höheren Breiten die durch Strahlung allein bedingten niedrigeren Temperaturen erhält. Die mit den Höhenträgen zusammenhängenden Kaltluftausstöße in strengen Wintern, die eine Stärkung der Meridionalzirkulation in den Eiszeiten begründen sollen, sind nur eine Eigenschaft der tieferen Luftschichten, sind keine Schneebringer und werden durch die in der Höhe polwärts strömende Warmluft kompensiert. Sie entstehen im Hochglazial durch selbsttätige Intensivierung der Kältezentren unter dem Einfluß der verstärkten Albedo. Die Entwicklung der Zirkulation im Früh-, Hoch- und Spätglazial, die durch Gegenüberstellung von Zonal- und Meridionalzirkulation nur teilweise erfaßt wird, erhält eine genetische und regionale Darstellung.



Die Strahlungskurve nach Neuberechnung durch van Woerkom und in anderer Zuordnung zu den Penck'schen Eiszeiten

Die Abbildung gibt die Änderungen der Strahlung in Breitenäquivalenten wieder; d. h. beispielsweise erhält 70° Nord im postglazialen Strahlungsoptimum die Strahlung von 60° Nord. — Ferner wird auf Grund des Klimaausgleichs die für 65° Nord und 65° Süd gültige Kurve (I und II) zu einer Gesamtkurve für die Erde (III) zusammengefaßt. Diese, vorzugsweise für die niedrigen Breiten gültig, wäre für die mittleren Breiten den Kurven I und II schrittweise anzunähern.

Literatur:

1. Arrhenius, G.: Tellus 2 (1950), S. 83, S. 236.
- 2a. Emiliani, C.: Journ. Geology 63, Nr. 6, Nov. 1955.
- 2b. Ders.: Geolog. Rdschau 46, H. 2, 1957, S. 576.
- 3a. Flohn H.: Polarforschung 3 (1951), H. 1, S. 58.
- 3b. Ders.: Geolog. Rdschau 40 (1952), H. 1, S. 153.
- 3c. Ders.: Ber. d. Dtsch. Wetterdst. i. d. US-Zone 35 (1952), S. 12.
- 3d. Ders.: Erdkunde 7 (1953), S. 266.
- 3e. Ders.: Taggsber. u. Wiss. Abhdlgen Geogr. tg. Würzburg 1957 (ersch. 1959).
- 3f. Ders.: Arch. f. Meteorologie, Geophys. u. Bioklimatol. 9 (1958), S.1.
- 3g. Ders.: Geograph. Rdschau 12 (1960), H. 4 u. 5.
- 4a. Groß, H.: Eiszeitalter u. Gegenwart 8 (1957), S. 141.
- 4b. Ders.: Eiszeitalter und Gegenwart 9 (1958), S. 155.
- 4c. Ders.: Festschrift Lothar Zotz 1960, S. 179.
5. Meinardus, W.: Hdbch. d. Klimatologie v. Köppen-Geiger IV, U, 1938.
- 6a. Rodewald, M.: Polarforschung 3 (1951), H. 1, S. 75.
- 6b. Ders.: Taggsber. u. Wiss. Abhdlgen Geogr. tag Würzburg 1957 (ersch. 1959).
7. Tauber u. De Vries: Eiszeitalter u. Gegenwart 9 (1958), S. 10.
8. Wagner, A.: Klimaänderungen und Klimaschwankungen, 1940, S. 17 u. S.154.
9. Van Woerkom: In H. Shapley, Climatic Changes, Cambridge 1953, S. 147.
- 10a. Wundt, W.: Meteorol. Zeitschr. 1942, H. 4, S. 138.
- 10b. Ders.: Quartär 10/11 (1958/59), S. 15.
- 10c. Ders.: Festschrift Lothar Zotz 1960, S. 559.
11. Müller-Annem: Über die Schwankungen der Zonalzirkulation. Meteorolog. Rdschau 1960, S. 169.

Amundsen und Scott im Lichte der historisch-medizinischen Kritik

Von Massimo Cirone, Rom *

Das Ziel dieser historisch-medizinischen Untersuchung soll sein, zuverlässig und kritisch jene Faktoren zu rekonstruieren, die den verblüffenden Erfolg der Norweger und den dramatischen Zusammenbruch der Engländer verursachten. Ich stütze mich dabei auf die umfangreichen Urkunden. Ganz besonders wurden dabei die Tagebücher von Amundsen, Scott und Cherry-Garrard sowie die kritischen Aufzeichnungen von Priestley, J. G. Hayes und Law benutzt.

Organisation und Planung der Expeditionen sowie Aufwand und Energieersatz, ferner die psychologische Einstellung sollen von mir systematisch untersucht werden.

*) Major Dr. Massimo Cirone, Rom, Poggio Molano 1