

## Neuentwicklungen zur Strahlungskurve von Milankovitch

von *Walter Wundt, Freiburg i. Br.*

### I. Grundlagen der Chronologie im Gelände, in Profilen und in Tiefseebohrkernen

Die Chronologie der Eiszeiten, auch die der jüngeren, wird von vielen als ungelöstes Problem betrachtet, soweit es absolute Zeitangaben betrifft – und doch haben die Messungen auf Grund der radioaktiven Isotopen, vor allem die C<sup>14</sup>-Methode, hierfür schon gute Grundlagen geliefert, die mit den Angaben der Strahlungskurve verglichen werden können. – Im Hinblick auf die Sicherheit der Messungen beschränke ich hier meine Erörterungen im wesentlichen auf die letzten 130 000 Jahre, doch werden im Abschnitt II auch kurze Ausführungen über frühere Jahrhunderttausende gegeben werden, denen sich zu Ende des Abschnitts V ein Ausblick auf vorausgehende Jahrmillionen anschließen wird.

Was man von einer Chronologie in erster Linie verlangt, ist die Übereinstimmung mit den von der Natur gegebenen Tatsachen! Schon vor vielen Jahrzehnten ist aufgefallen, daß in den alten Gletschergebieten, speziell im Vorland der Alpen, zwei Moränengruppen hintereinanderliegen, die eine mit frischen Formen in der Nähe der Gebirge und die andere, weiter davon entfernte, mit verwaschenen Formen. Hieraus schloß man auf eine stärkere Eiszeit, deren Spuren infolge des Alters weithin zerstört sind, und eine jüngere, aber schwächere, deren Formen viel besser erhalten sind; letztere Gruppe zerfällt vermöge der hintereinanderliegenden Moränenwälle in mehrere Phasen, die aber wegen ihrer Formenverwandtschaft zeitlich nahe beieinander gelegen haben müssen. Dazu kommt, daß zwischen den Eiszeiten Interglaziale mit wärmerem Klima und Niederschlagssteigerung lagen; in diesen wurden die flächenhaften Aufschüttungen der Glaziale wieder erodiert und die Gletscherzungen der jüngeren Eiszeiten hinterließen in den neu gebildeten Tälern ihre Spuren an Stellen, die tiefer lagen als die Schotterfelder der älteren Eiszeiten. Dieses Wechselspiel hat zu dem bekannten Bild der vier Penck'schen Eiszeiten geführt, bei dem die Schotter und Terrassen der älteren Vorstöße meist höher liegen als die der jüngeren. Hierbei mag noch mitgewirkt haben, daß auch während der Eiszeiten tektonische Hebungen vor sich gingen. Bei den großen Inlandeisfeldern Norddeutschlands, die ihren Ursprung von Skandinavien annehmen, liegt der Fall etwas anders. Hier haben die großen Eiskuchen der Elster- und Saaleeiszeit ihre Grundmoränen hinterlassen, ohne daß in den Interglazialen – infolge der geringen Bodenneigung! – eine erhebliche Erosion stattfand. Die jüngere Schicht lagerte sich also auf die ältere und auch die jüngste Eiszeit, hier Weichsel-Eiszeit ge-

nannt, hinterließ ihre Grundmoräne auf denen der früheren Eiszeiten. Dagegen ist die horizontale Anordnung der jungen Moränen (Brandenburg-, Frankfurt-, Pommernstadium usw.) ganz ähnlich zu beurteilen wie die der Würm-Moränen im Alpenvorland. – Aber für die Eiszeitchronologie ist die vertikale Gliederung der Bodenschichten ebenso wichtig wie die horizontale im Gelände. Jeder Eisvorstoß ist ferner mit der Ablagerung von Löß in seiner Umgebung verbunden, wobei hier dahingestellt bleiben soll, in welchen Phasen der betr. Eiszeit jene Ablage im einzelnen stattfand. Des weiteren wird jede Lößauflage in der folgenden Warmzeit ganz oder teilweise entkalkt und verlehmt, wobei Schichtdicke und Bodenzustand Anhaltspunkte für die Dauer und Intensität der Warmzeiten ergeben. Aber die Diagnose wird dadurch erschwert, daß der Löß auch vielfach verschwemmt und umgelagert wird, so daß die zeitliche Reihenfolge nur schwer erkennbar ist. Immerhin kann in vielen Fällen ein jüngerer Löß (aus der Würmeiszeit) von einem älteren (aus der Rißeiszeit) auseinandergehalten werden. Bald nach dem älteren Löß trifft man auf die Spuren einer intensiven Warmzeit (Eem, Sangamon), die sich auch – weniger klar – durch ihre Flora und Fauna klar abzeichnet. Zwischen dieser Warmzeit und der letzten Kaltzeit schaltet sich ein großes Schichtenpaket ein, das weder ausgesprochen glaziale noch interglaziale Züge zeigt und im einzelnen ziemlich inhomogen ist, von den örtlichen Abweichungen ganz abgesehen. Immerhin läßt sich in gut erhaltenen Profilen nach dem Eem ein etwas schwächerer Eisvorstoß feststellen, der als erste Phase der letzten Eiszeit (sog. Altwürm) angesehen wird, aber im Gelände nur selten sichtbar ist, weil er eben von dem später folgenden Hauptvorstoß des Würm (dem sog. Hauptwürm) überfahren wurde. – Eine relativ gesicherte Grundlage geben neben den Profilen die eiszeitlich gebildeten Terrassen, soweit sie nicht tektonisch verstellt sind: Hierüber geben die Schriften von Groß Aufschluß; Groß ist auch als Hauptkenner und kritischer Vertreter der  $C^{14}$ -Daten anzusehen, die für die Datierung der jüngeren Eisvorstöße die wichtigsten Unterlagen abgeben (siehe Literatur 9a, b, c).

Schon die Schichten zwischen dem Interglazial und dem Altwürm zeigen starke klimatische Schwankungen an, die sich durch zwei Interstadiale mit gemäßigt-kühler Temperatur (Amersfoort und Brörup) ausweisen. Ein ähnliches Bild wechselnder Temperaturverhältnisse finden wir zwischen Alt- und Hauptwürm in den Bodenprofilen von Hörmating, Fellabrunn, Murg usw.; doch erkennen wir an einzelnen Stellen, z. B. an der menschlichen Begehung der Salzofenhöhle (etwa 2000 m ü. d. M.), daß die Temperaturen zeitweilig an die heutigen nahe herangekommen sein müssen. Auch in den klimatischen Abstieg zum Hauptwürm schaltet sich als Paudorfer Interstadial noch ein leichter Zwischenanstieg ein, der auf beiden Halbkugeln registriert wird (Woldstedt Lit. 18a). Auf Grund der  $C^{14}$ -Daten zusammen mit den Ergebnissen der Gelände- und Profilmforschung hat Woldstedt (Lit. 18b) eine schematische, für den Temperaturgang der letzten Eiszeit geschätzte, Kurve gezeichnet, die auch (umgezeichnet) in unser Bild 1 als Kurve a aufgenommen ist. Auf ganz ähnlichen Grundlagen ist die von mir gezeichnete Kurve b des Bildes 1 aufgebaut. Es zeigen sich natürlich je nach dem Gewicht, das man den einzelnen Profilen und Altersangaben zuerkennt, einige Unterschiede zwischen a und b, aber die Ähnlichkeit ist doch überwiegend. Das Hauptmittel zum Entwurf sind

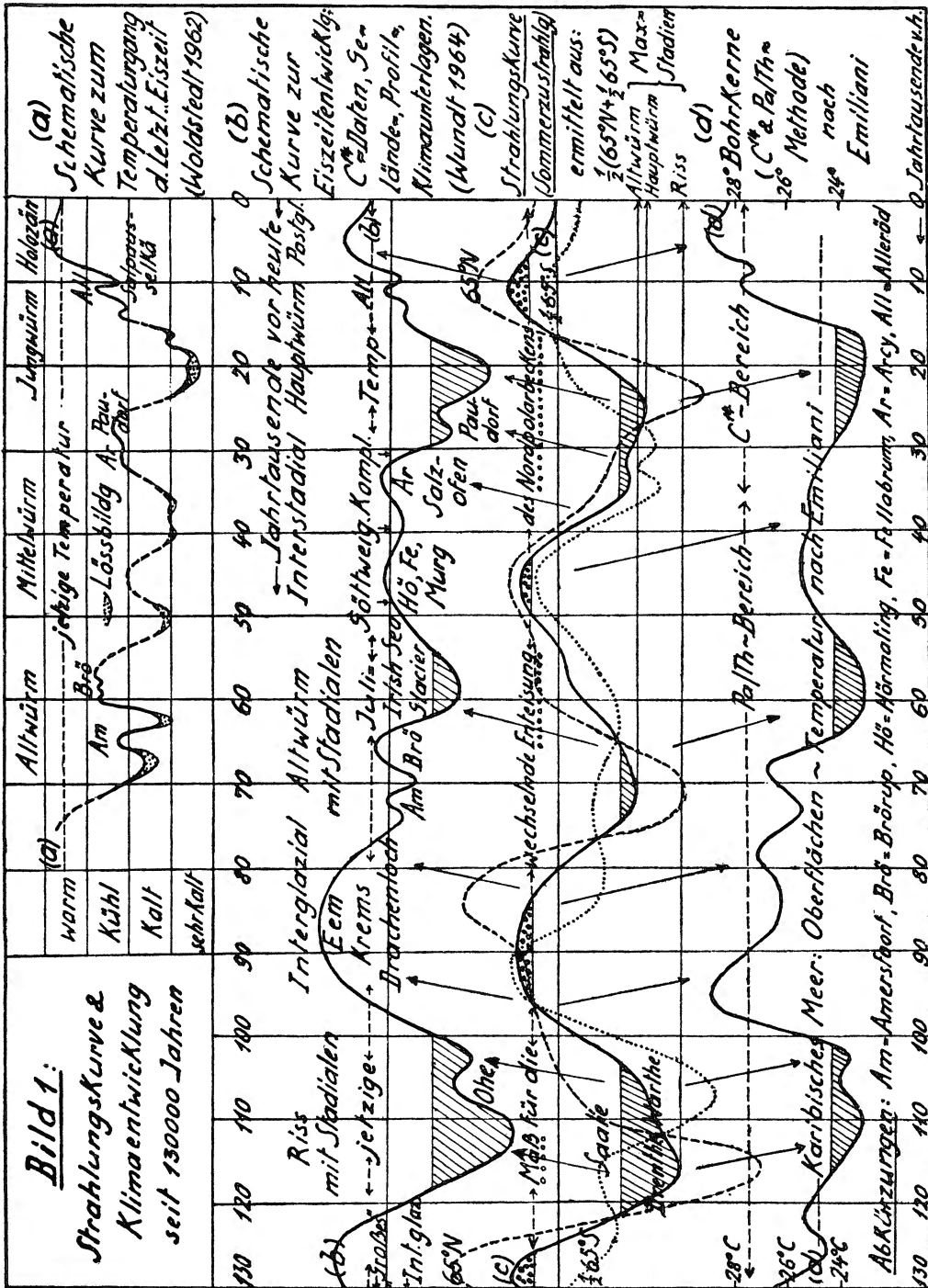


Bild 1. Strahlungskurve und Klimaentwicklung seit 130 000 Jahren.

ja in beiden Fällen die  $C^{14}$ -Daten, die mit einiger Sicherheit bis 50 000 v. h. zurückreichen (gestützt durch die Mittelungen mehrerer Messungen am gleichen Ort), aber auf Grund von Einzelwerten sich bis etwa 70 000 v. h. erstrecken. Die Früherlegung der Interstadiale des Altwürm in Kurve b kann man damit begründen, daß das noch vorhandene  $C^{14}$  aus diesen frühen Zeiträumen vermöge der geringen Mengen einen großen Spielraum für die zeitliche Einstufung gestattet. – Ehe wir auf die Strahlungskurve (Kurve c) zu sprechen kommen, sei auf die Kurve d des Bildes 1 hingewiesen, die eine Wiedergabe der Temperaturkurve vom Emiliani für das Karibische Meer darstellt (Lit. 5a, 5b). Sie ist, wie bekannt, aus der Abfolge „warmer“ und „kalter“ Foraminiferenarten gewonnen, die in den Bohrkernen der Tiefseesedimente sich zeigen. Dabei wurden drei Reihen radioaktiver Isotopen zu Hilfe gezogen: die  $O^{18}/O^{16}$ -Methode, die  $C^{14}$ -Methode und die  $Pa^{231}/Th^{230}$ -Methode. Da die beiden letzteren in dem Zeitraum, wo sie gleichzeitig anwendbar sind, in den Ergebnissen übereinstimmen, kann die Pa/Th-Methode zur Rückwärts-Verlängerung der Zeitskala dienen, die wir aus  $C^{14}$  mit ihren Absolutwerten bekommen. Dabei beschränkt man sich auf die  $C^{14}$ -Werte bis etwa 35 000 v. h., weil die früheren, wie schon erwähnt, nicht sehr zahlreich sind und schon hier weniger sichere Werte ergeben. – Die  $O^{18}/O^{16}$ -Methode dient vor allem dazu, die Warmschichten von den Kühltischen auszugliedern, weil dieses Verhältnis mit der Temperatur des Meerwassers bei der Ausfällung des  $CaCO_3$  zusammenhängt. Allerdings muß bei den Altersbestimmungen angenommen werden, daß die Sedimentationsgeschwindigkeit immer gleich gewesen sei, was kaum zutreffen dürfte. Aber man kann diesen Einwand in gewissem Umfang ausschalten, indem man beim Vergleich mit der  $C^{14}$ -Kurve jeweils Warm- und Kaltzeiten zusammennimmt. Als Grundvoraussetzung muß ferner gelten, daß es sich um Foraminiferen an der Meeresoberfläche handelt, die jeweils nach dem Tode auf den Grund niedersinken. Daß der so gewonnene Temperaturgang dem in Europa und Nordamerika ermittelten einigermaßen parallel geht, ist allerdings zunächst nur eine Annahme. Aber sie rechtfertigt sich dadurch, daß nach allgemeiner Ansicht die Kalt- und Warmzeiten auf der ganzen Erde im wesentlichen gleichzeitig waren. Sie wird von mir in früheren Schriften (Lit. 19a, b, c) und hier (siehe Abschn. III. und IV.) weiter begründet dadurch, daß die allgemeine Zirkulation in der Atmosphäre und im Meer zu allen Zeiten einen Ausgleich zwischen den Kälteherden und den wärmeren Stellen schuf und daß auch zwischen den Hemisphären ein Austausch stattfand, so daß Kaltzeiten der einen Halbkugel in abgeschwächter Form auch auf die andere Halbkugel übergriffen. Auf diese Art bekommen wir auch eine teilweise Erklärung für die Verspätung klimatischer Erscheinungen, die z. B. infolge relativ langsamer Übertragung von Kälte durch Meeresströmungen eintreten kann. Die Richtigkeit der Schlüsse Emilianis wird dadurch gestützt, daß Bohrkern aus verschiedenen Teilen des Atlantik, auch solche aus dem Mitteländischen Meer, doch weithin übereinstimmende Bilder ergeben. – Es sei noch bemerkt, daß die in unserem Bild 1d wiedergegebene Kurve Emilianis in seinen neuesten Veröffentlichungen (5c) bis 150 000 v. h. fortgeführt und durch Extrapolation bis 315 000 v. h. ausgedehnt wird. Man erhält dadurch auch Zuordnungen der älteren Eiszeiten (Günz, Mindel) zur Strahlungskurve, die im

Aufsatz Wundt (Lit. 19a) wiedergegeben sind; in der jetzigen Schrift wird hierauf nicht näher eingegangen, da die Ergebnisse an Sicherheit der Zuordnung bei jenen älteren Perioden hinter denen für die jüngeren Eiszeiten doch wesentlich zurückstehen.

## II. Die Strahlungskurve nach Milankovitch und Woerkom. Zuordnung der Eiszeiten

Was bisher über die Chronologie der Eiszeiten gesagt wurde, ist in der Hauptsache schon in der Literatur zu lesen, mußte aber hier kurz wiederholt werden, um für das Thema „Strahlungskurve“ die nötige Grundlage zu schaffen. Diese von Milankovitch berechnete Kurve – beruhend auf der periodisch schwankenden Stellung der Erdachse und der Lage des Perihels in der Erdbahn, verbunden mit deren wechselnder Exzentrizität – hat als Erklärung für die Eiszeiten immer Beachtung, aber auch viele Gegner gefunden. Die von Woerkom vorgenommene Neuberechnung auf Grund neuerer Werte für die Planetenmassen hat die zeitliche Lage der Kälte- und Wärmezacken kaum verändert, wohl aber deren Amplituden (Lit. 17, 19a, b, c). Von den Gruppen stärkerer Ausschläge, die sich bei Milankovitch innerhalb der letzten 600 000 Jahre häufen, sind die älteren auf ein bescheidenes Maß zusammengeschrumpft (siehe unser Bild 2); es bleibt bei Woerkom nur ein vereinzelter Vorstoß um 600 000 übrig, welcher der sogenannten Donauzeit zugeschrieben werden kann. Für die Zuordnung der klassischen vier Eiszeiten nach Penck kommen nur mehr die letzten 350 000 Jahre in Betracht. Diese Berechnung hat jüngst durch Untersuchungen von Brunnacker (Lit. 2) eine überraschende Bestätigung bekommen: er schätzt die Gesamtdauer der Penck'schen Eiszeiten auf Grund seiner pedologischen Überlegungen auf 380 000 Jahre. Der davor liegende, um 1 bis 1,2 Millionen Jahre vor heute endigende Zeitraum zählt ebenfalls noch zum Quartär, und war mit stark wechselnden, aber im ganzen wärmeren Temperaturen ausgestattet; er umfaßt in seinem älteren Teil das Villafranchian mit einem gemäßigt mediterranen Klima. – Bild 2 zeigt im einzelnen, wie die von Köppen angeregte und von Milankovitch übernommene Zuordnung zwangsläufig verschoben werden muß. Dies gilt zunächst für die sowohl von Milankovitch als von Woerkom betrachtete Breite 65° Nord. Da aber die von Woerkom berechneten Ausschläge in 65° Süd eine ähnliche Zeitlage haben wie die in 65° Nord, fasse ich die beiden Breitenlagen von vornherein zusammen und betrachte die zeitliche Nachbarschaft der Eiszeiten in Nord und Süd als gemeinsame Auswirkung der beiden Hemisphären, die sich neben der Ähnlichkeit der Ursachen auch durch die Luft- und Wasserzirkulation einander angleichen. Bemerkt sei noch, daß Woerkom die Kurve von Milankovitch zwar zitiert, aber von sich aus keine Neu-Zuordnung der Eiszeiten vornimmt, also sich auf die rechnerische Leistung beschränkt. Diese Leistung darf aber nicht als Verbesserung eines „Fehlers“ aufgefaßt werden, vielmehr nur als Folge der Einführung neuerer Massenwerte, die mit der Berechnungsmethode nichts zu tun hat. Obwohl aber die Schöpfer der alten Zuordnung (Köppen, A. Wegener, Soergel) nicht mehr leben, blieb sie, vor allem in der Dreiteilung der Würmeiszeit, in der Literatur bestehen und ist auch von mir bis zum Aufkommen der

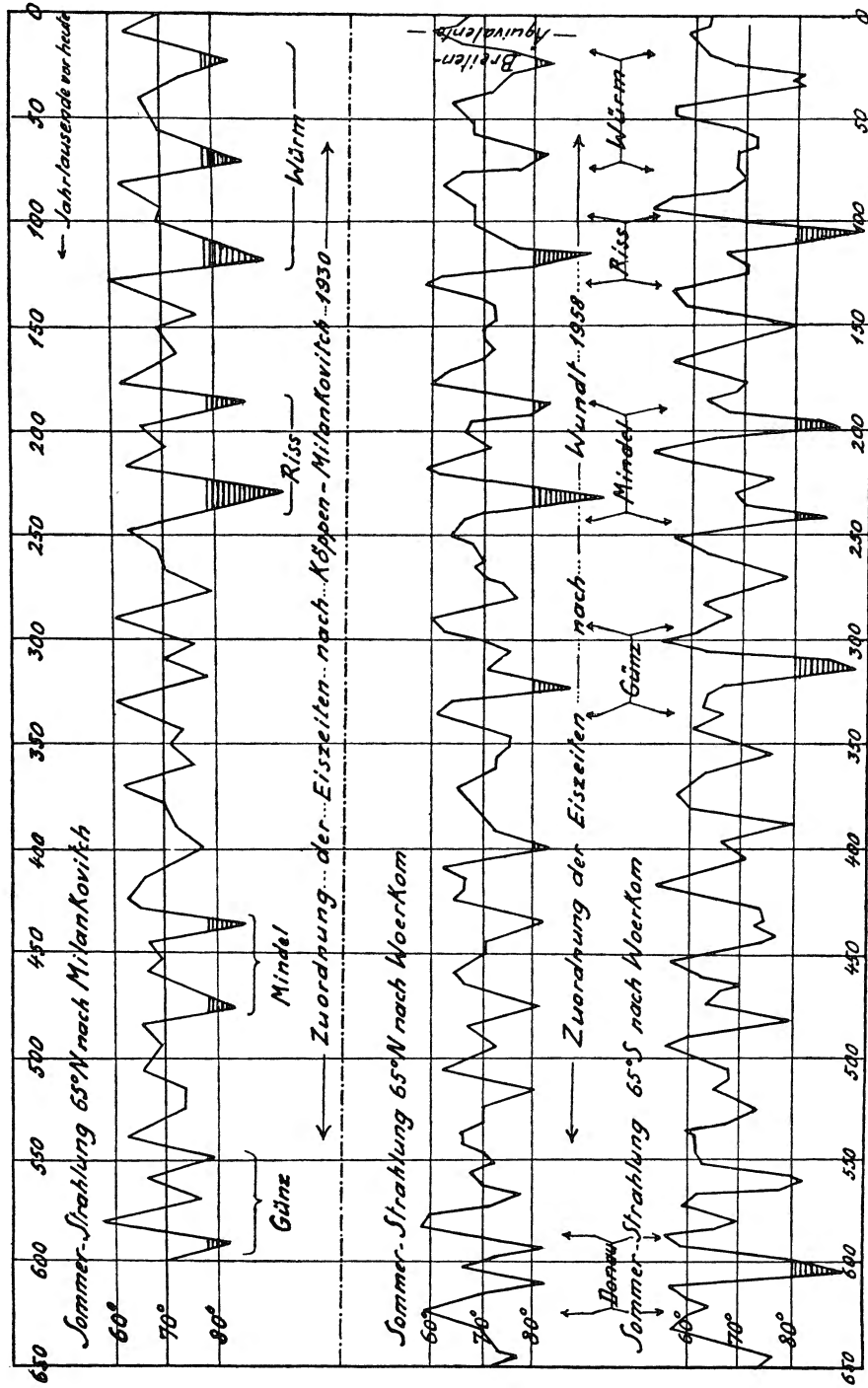


Bild 2. Die Strahlungskurve mit Zuordnung der Eiszeiten in älterer und neuerer Fassung.

Kurve von Woerkom vertreten worden. Aber nun ist die Zeit gekommen, bei der Zuordnung auf die neue Kurve umzudenken – aber nicht etwa wegen dieser Abänderung die Strahlungskurve über Bord werfen zu wollen. Es ist begreiflich, daß man die alte Zuordnung, für die man bis 1953 keine verbesserte Grundlage hatte, zu halten suchte; aber über den Mangel, daß man zwischen dem alten W I und W II eine intensive Warmzeit einschalten und das folgende W III als schwächer annehmen sollte als die beiden vorausgehenden – darüber konnte man, besonders nach den Ergebnissen der C<sup>14</sup>-Methode, auf die Dauer nicht hinwegkommen! Die Folge war ein heilloser Wirrwarr und schließlich die Skepsis gegenüber der Leistungsfähigkeit der Strahlungskurve überhaupt! Und doch ist es nicht allzu schwer, einen Ausweg zu finden: das alte W I, die größte Zacke der angeblichen Würmstadien, wird in der neuen Zuordnung zum Riß, die folgende Warmzeit wird zum letzten Interglazial; die beiden folgenden Kältezacken verbleiben dem Würm, aber mit dem bezeichnenden Unterschied gegen früher, daß nach Woerkom die letzte Zacke die stärkere ist, der zugehörige Gletscher die Spuren des vorausgehenden überfahren hat und damit – in der Landschaft betrachtet! – die von vielen mit gewissem Recht behauptete Einheit der Würmeiszeit hergestellt ist! – Von Emiliani ist diese von mir vorgeschlagene Neu-Zuordnung schon angenommen (Lit. 5a, b), auch von Fairbridge (Lit. 6) wird sie als Alternativlösung mitaufgeführt.

Im einzelnen ist natürlich manches zu klären, da neben die allgemeine zeitliche Gliederung auch örtliche Unterschiede und Abstufungen nach der Breitenlage treten. Über den klimatischen Verlauf zwischen dem Altwürm (identisch mit dem früheren W II) und dem Hauptwürm (identisch mit dem früheren W III) ist im Abschnitt I und beim Bild 1 schon einiges gesagt; die beobachteten Interstadiale sind aufgezählt und der Göttsweiger Interstadial-Komplex (ein von Groß eingeführter Ausdruck) faßt die wechselnden Zustände dieser Periode zu einer Einheit zusammen. Nach den Profilen muß hier das Klima im Durchschnitt gemäßigt gewesen sein, ohne die an ein Interglazial zu stellenden Bedingungen ganz zu erfüllen; für diese Beurteilung sind für mich die von Ebers, Groß, Guenther, Kraus u. a. (Lit. 3, 9, 10, 11) untersuchten Profile, für die Höhlenforschung die Untersuchungen von Schmid (Lit. 13) maßgebend gewesen. Für die Salzofenhöhle halte ich die Voraussetzungen an Sommertemperatur, die eine Begehung durch Höhlenbären erst wahrscheinlich machen, für erfüllt (Ehrenberg in Lit. 4). Für die Auseinanderhaltung der „Interglaziale“ von den „Interstadialen“ gewinnen die Untersuchungen der Faunen nach Guenther (Lit. 10) wachsende Bedeutung. – Soweit die Ergebnisse für Mitteleuropa; für England (Profil von Upton Warren) liegen die eingehenden Untersuchungen von Shotton vor, die sich mit dem ausgehenden Altwürm (Irish Sea Glacier) und dem folgenden Interstadial befassen und auch C<sup>14</sup>-Messungen zur Grundlage haben (Lit. 15). Im Zusammenhang damit steht die Einfügung des genannten Gletschers, der dem Verhalten etwas höherer Breiten nach der Strahlungskurve entspricht, in die Kurve b des Bildes 1. – Wenden wir uns nun von den Erörterungen über die Würmeiszeit wieder der Strahlungskurve im allgemeinen zu! Milankovitch hat für eine Reihe von Breiten, auf der Nord- und Südhalbkugel und für die letzten sechs Jahrhunderttausende, den Gang der Sommer- und Winterzustrahlung berechnet; Woerkom

hat sich dabei auf das Breitenpaar  $65^\circ$  N und  $65^\circ$  S beschränkt, so daß uns eine Neuberechnung für andere Breiten fehlt. Aber zu Vergleichen des Gangs in verschiedenen Breiten genügen die älteren Kurven von Milankovitch durchaus: eine teilweise Reproduktion dieser Kurven (nach Lit. 12, S. 608) ist in unserem Bild 3 gegeben, wo wir die beiden Breitenpaare  $\pm 75^\circ$  und  $\pm 45^\circ$  finden. Bei der Betrachtung der Kurven für  $75^\circ$  fällt sofort der gleichartige Gang mit Spitzen im ungefähren Abstand von 40 000 Jahren ins Auge. Wohl treten gegenseitige Verschiebungen der Extreme in Nord und Süd um 5000 bis 10 000 Jahren auf, aber der gleichsinnige Gang ist unverkennbar. Anders liegt es bei den Breiten  $45^\circ$  N und  $45^\circ$  S. Hier zeigen sich Extreme in (roh gesprochen) 20 000-jährigem Abstand, die in entgegengesetztem Sinne ausschlagen. – Der Unterschied im Verhalten der Breiten ist leicht zu erklären. In  $75^\circ$  und auch noch in  $65^\circ$  (vgl. dazu unser Bild 3) überwiegt der Einfluß der Erdachsenstellung, der auf beiden Halbkugeln gleichsinnig sein muß. In den mittleren Breiten dagegen (Beispiel:  $45^\circ$ )

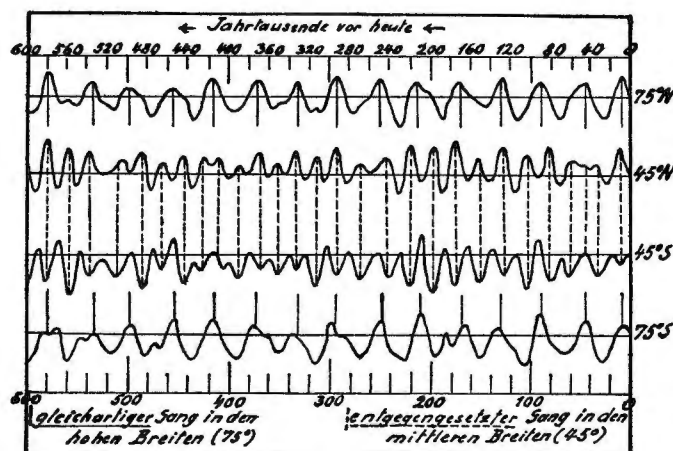


Bild 3. Sommerliche Bestrahlung nach Milankovitch 1941. Beachte auch den Gang von 60 000 bis 30 000 v. h. in  $45^\circ$  Nord.

bekommt die Lage des Perihels im Jahreslauf die Oberhand; in der Gegenwart z. B. bringt die Nordhalbkugel ihren Winter in Sonnennähe zu – das Perihel fällt auf Anfang Januar! – und er wird dadurch etwas gemildert. Aber dieser Winter ist ja zugleich der Sommer der Südhalbkugel; letztere erhält also gleichzeitig eine erhöhte Wärmezufuhr und wird gletscherfeindlich, während der im Aphel zugebrachte Sommer der Nordhalbkugel strahlungsärmer und damit gletscherfreundlich ist (allerdings wird dies wegen der zur Zeit geringen Exzentrizität von anderen Einflüssen überdeckt). Wie weit sich dies wirklich auswirken kann, wird erst im folgenden Abschnitt III zusammen mit den Fragen der allgemeinen Zirkulation, den Änderungen der Albedo und der Strahlung in den Tropen besprochen werden. – Hier ist nur noch auf eine wichtige Einzelheit hinzuweisen, das ist der Strahlungsgang in  $45^\circ$  Nord während der letzten 100 000 Jahre.



Zwischen der Wärmезacke um 90 000, die dem Eem zugewiesen wird, und dem postglazialen Strahlungsmaximum um 10 000 zeigt sich im Bild 3 ein auffallend flacher Kurvenverlauf ohne ausgesprochene Maxima und Minima. Gerade das ist es, was wir nach dem wenig regelmäßigen Verlauf der Profile (mit schwach ausgeprägten Glazialen und Interstadialen) an dieser Stelle erwarten müssen! Dabei ist auch noch das Mitwirken der Südhemisphäre (vgl. die Kurve für 45° S) auf Grund des allgemeinen Ausgleichs in Rücksicht zu ziehen. Näheres hierüber in Abschnitt III.

### III. Der Strahlungsgang in den Tropen. Die Eiszeiten als Einheitserscheinung über die ganze Erde.

Über den Gang der Bestrahlung in den Tropen, d. h. zwischen den Wendekreisen, ist ein besonderes Wort zu reden, da hier Milankovitch rein mathematisch gedacht hat

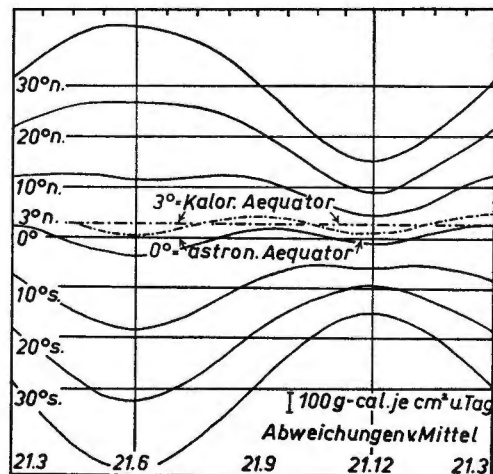


Bild 4. Die Doppelwelle der jährlichen Bestrahlung beiderseits des Äquators. Astronomischer und kalorischer Äquator.

und daraus Mißdeutungen entstanden sind. Er rechnet durchweg mit kalorischen Halbjahren, d. h. zum Sommer zählen die 182 $\frac{1}{2}$  Tage, bei denen die Zustrahlung über dem Mittel liegt, zum Winter die anderen 182 $\frac{1}{2}$  Tage, bei denen sie darunter liegt. Diese Definition verliert aber zwischen den Wendekreisen ihren klimatischen Sinn; denn der Junigipfel des Nordsummers flacht sich gegen den Äquator hin immer mehr ab, dafür wachsen zwei andere Gipfel im März und September (um die Tag- und Nachtgleichen) empor, zwischen denen der Junigipfel zu einem leichten Minimum wird, das dem Dezemberminimum gleich kommt. Ebenso schrumpft von Süden her der Dezembergipfel mit der Annäherung an den Äquator immer mehr zusammen und die Strahlung im März und September nimmt zu, bis diese Gipfel mit den von Norden kommenden identisch werden. Diese beiden (schwachen) Maxima bilden zusammen am Äquator ein mißverständenes

kalorisches „Halbjahr“ oder den kalorischen Sommer, die beiden gleichstarken Minima des Juni und des Dezembers umfassen dort zusammen den kalorischen Winter. Diese Sachlage ist in unserem Bild 4 (von mir aus Lit. 19d entnommen und hier reproduziert) wiedergegeben. Daß der Begegnungspunkt der Doppelwellen von Nord und Süd nicht am astronomischen Äquator, sondern (gegenwärtig) unter 3° Nord (sog. Kalorischer Äquator) erfolgt, ist von mir und Milankovitch (Lit. 9, S. 361) eingehend begründet, aber die genannte leichte Verschiebung spielt für die Betrachtung an dieser Stelle keine Rolle. – Klimatisch betrachtet zerfällt also der kalorische Sommer zwischen den Wendekreisen in zwei Teile, einen großen und einen kleinen, die sich aber gegen den Äquator in Länge und Stärke angleichen. Mit diesem Zerfall geht aber auch der klimatische Effekt, der sich ja auf zwei gegensätzliche Jahreszeiten aufbaut, größtenteils verloren; an Stelle der Halbjahrswirkungen treten Vierteljahrseffekte, die sich entsprechend rascher ausgleichen. Was die Eiszeiten anlangt, so tritt als wichtiges Moment hinzu, daß sich Schnee- und Eisflächen in den Tropen überhaupt nur in sehr beschränktem Maße bilden können. Dazu ist das allgemeine Temperaturniveau viel zu hoch, die Fläche der Erhebungen über dem Meere, wo sich niedrigere Temperaturen einstellen können, zu gering. Im allgemeinen ist die Temperatur an der Schneegrenze nicht allzu weit von 0° entfernt; bei den Temperaturen über Null geht der Niederschlag in Regen über und bei sehr tiefen Temperaturen (vgl. Nordgrönland) ist der Umsatz so gering, daß sich nur Kältewüsten, keine Gletscher mehr bilden. Das Optimum für Vereisungen liegt bei 0° Mitteltemperatur und geringen Schwankungen um dieses Mittel. Ein solches Klima konnte sich bei küstennahen Gebieten, wo auch der Niederschlag nicht fehlt, in den mittelhohen Breiten während der Kaltzeiten bilden und dort bis in die Ebenen (Nordamerika, Nordeuropa) vordringen. Die in den Tropen hierfür geeignete Fläche (in den Anden, einigen Gipfeln Afrikas und in Insulinde) ist im Verhältnis zum Gesamtareal kaum nennenswert. Die in den Tropen beobachtete Schneegrenzsenkung kann nur als Folge einer sekundären Abkühlung von den höheren Breiten her, anders ausgedrückt als ein teilweiser Ausgleich der Temperaturen über der ganzen Erde betrachtet werden. Die gleiche Überlegung gilt, wenn auch in abgeschwächtem Maß, für die mittleren Breiten. Auch sie hätten für sich allein nicht die genügende Kraft zur Selbstvereisung, aber sie werden in dieser Tendenz gestützt durch die zum Äquator vorstoßenden kalten Luftmassen, die den großen Eisfeldern der polnahen Gebiete entspringen und deren Gletscher bis in mittlere Breiten vordringen lassen. Aber auch dieses Vordringen wäre nicht möglich gewesen ohne einen weiteren Effekt: das ist die Selbstverstärkung und Ausbreitung der weißen Flächen durch gesteigerte Reflexion der Sonnenstrahlung, durch ihre erhöhte Albedo. Dieser allgemein anerkannte Sekundäreffekt bringt den großen weißen Flächen um die Pole ein klimatisches Übergewicht, das sich vermöge der Luft- und Meeresströmungen der ganzen Erde mitteilt. Es ist ein Irrtum, die glazialen Verhältnisse der einzelnen Breiten allein auf deren eigene Bestrahlung zurückführen zu wollen! Dies trifft nicht einmal für die Jetztzeit oder die Interglaziale zu. Es kann kein Zweifel sein, daß die viel tiefere Temperatur um den Südpol gegenüber dem Nordpol (bei gleicher Zustrahlung!) eine Folge der stärkeren Albedo der Antarktis ist und daß sich der me-

terologische Äquator infolge des Übergreifens der kalten Süd-zirkulation um mehrere Grade gegenüber dem astronomischen Äquator nach Norden verschiebt. Aber diese Nordverschiebung ist nicht ohne Ausnahme: im Nordwinter dringt südlich der großen asiatischen Landmasse die Nordzirkulation bis über den Äquator vor und überträgt – zeitlich und örtlich beschränkt – ihre Abkühlung auf die Südhemisphäre. Mit diesen Überlegungen kommen wir darauf, daß sich nicht bloß die Zustände innerhalb einer Halbkugel ausgleichen, daß auch die beiden Hemisphären sich ständig gegenseitig beeinflussen. Die kalten Jet-Streams dringen aus der nördlichen Polarzone bis über den Äquator vor; andererseits zeigt das sogenannte sudanesische Klima und das indische Klima Vorstöße von Kaltluft aus der Südhemisphäre an. Die Tropen können zu diesen Einbrüchen kaum etwas beitragen, da ihre Eisarmut und der vierteljährliche Wechsel der Bestrahlung dazu keine Möglichkeit bieten. Wohl aber kann die Tropenzone – heute wie einst – trotz ihrer Eigenwärme als Sammler, gegebenenfalls auch als Übermittler von außen kommender Kälte dienen, die ihr aus höheren Breiten zugeführt wird. Besonders wirksam sind dabei vermöge ihrer Speicherfähigkeit die Meeresströmungen, bei denen wir nicht nur an die bekannten Oberflächenströme, sondern auch an die Rückkehrströme in den Tiefen der Weltmeere denken müssen. Von diesem Gesichtspunkt aus ist es auch verständlich, daß Emiliani beim vorzeitlichen Temperaturgang neben dem Karibischen Meer den Nordatlantik und das Mittelländische Meer ins Auge faßt. Eine Einheit des Temperaturgangs über die Erde während des Pleistozäns anzunehmen, wäre freilich eine Übertreibung; es müssen starke Abstufungen, u. U. auch Abweichungen für die Stellen eingetreten sein, die weit voneinander entfernt sind. Für die Ränder des Inlandeises der mittleren und mittelhohen Breiten werden mindestens  $10^{\circ}$ , für die Tropen nur  $4^{\circ}$  Temperaturniedrigung während der Eiszeiten angenommen. Bei der Erörterung möglicher Temperatursenkungen auf der Nord- und Südhemisphäre ist auch folgender Gesichtspunkt zu berücksichtigen: Wegen der geringen Ausdehnbarkeit des antarktischen Eisschildes infolge des Abfalls in die Tiefsee müßten die Schwankungen dort geringer gewesen sein als auf der Nordhalbkugel mit ihren großen Inlandeisflächen, die dort entstanden, aber auch wieder vergingen. Diese Frage ist noch wenig geklärt. Bei der Beurteilung der Albedo in der Eiszeit ist auch an Änderungen der Bewölkung zu denken. Es wäre möglich, daß der Wolken-gürtel, der die Antarktis umgibt, in Zeiten strahlungsarmer Sommer durch die Zunahme tiefliegender Wolken, die dem Nebel nahestehen, sich weiter verstärkt und damit auch die Albedo dieser Randzonen steigert. Ob dies zutrifft, könnte nur durch eine besondere Untersuchung geklärt werden, wobei die Grundlagen wohl schwierig zu beschaffen wären.

#### IV. Gemittelte Strahlungskurven. Vergleiche mit sonstigen Ergebnissen. Verspätungserscheinungen.

Wie in Abschnitt III auseinandergesetzt, kann die Erklärung der Klimaschwankungen nicht auf der Bestrahlung der Breitenkreise allein aufgebaut werden, muß vielmehr

vermöge der allgemeinen Zirkulation die ganze Erde in Rücksicht ziehen. Dabei sind allerdings, soweit es die glaziale Entwicklung betrifft, die mittelhohen Breiten von vorwiegender Bedeutung. Es liegt daher nahe, aus den von Woerkom berechneten Kurven für  $65^\circ$  N und  $65^\circ$  S eine Mittelkurve für die Gesamterde zu bilden, die aus  $\frac{1}{2}$  ( $65^\circ$  N +  $65^\circ$  S) gewonnen wird. Dies ist in meiner früheren Veröffentlichung (Lit. 19c) geschehen und es sind dort auch Zuordnungen der Eiszeiten und der Interglaziale in ähnlicher Weise wie hier in Bild 1 vorgenommen. Will man nun aber den Vergleich mit den sonstigen Ergebnissen, die zum größten Teil von der Nordhalbkugel kommen, genauer durchführen, so empfiehlt es sich, der Kurve  $65^\circ$  N bei der Mittelung ein größeres Gewicht zu geben. Ich habe dies mit verschiedenen Gewichten durchgeführt und es zeigte sich, daß die größte Ähnlichkeit mit den statistischen Ergebnissen zu finden war, wenn man der Nordkurve das doppelte Gewicht gegenüber der Südkurve gab. Dies ist in Bild 1 durchgeführt in der Form  $\frac{1}{2}$  ( $65^\circ$  N +  $\frac{1}{2}$   $65^\circ$  S); dabei sind aber die beiden Ausgangskurven  $65^\circ$  N und  $\frac{1}{2}$   $65^\circ$  S, um die Entstehung erkennen zu lassen, miteingezeichnet (siehe Kurve c des Bildes 1). Wir erhalten dadurch eine Reihe von Einzelheiten zur Deutung des tatsächlichen Klimaverlaufs. Wie längst bekannt, geht das Süd-Extrem des Haupt-Würm dem Nordextrem in der Strahlungskurve etwa 10 000 Jahre voraus, aber die Komplexe als Ganzes decken sich trotzdem weithin. Im Alt-Würm zeigt sich eine gewisse Gegenläufigkeit, bei der wir noch Verspätungseffekte (siehe nachher) berücksichtigen müssen; das Minimum des Nordens wird durch ein sekundäres Maximum des Südens teilweise kompensiert. Aber gerade diese Gegenläufigkeit der Komponenten kann uns verständlich machen, daß in dieser Epoche Stadiale und Interstadiale unregelmäßig aufeinander folgen! – Bei der Rißeiszeit kombiniert sich wieder ein Vorstoß im Norden (Riß I = Drenthe) mit einem späteren im Süden (Riß II = Warthe) und zwischen beiden ist eine leichte Hebung eingebettet, die als Ohe-Interstadial gedeutet werden kann. Kehren wir noch einmal zum Haupt-Würm zurück! Die Südkomponente vor 30 000 ist bei Woerkom selbst in zwei kleinere Vorstöße gespalten; dies eine Erklärung für das zwischenliegende Paudorf-Interstadial, das sich primär im Süden einstellt, aber seine Wirksamkeit auch auf den Norden ausdehnt. Allerdings wäre es auch möglich, dieses Interstadial der Stelle zuzuordnen, an welcher der Südvorstoß des Haupt-Würm durch den Nordvorstoß abgelöst wird; man darf auch in solche Schwankungen, die nur wenige Jahrtausende umfassen, nicht zu viel hineinlesen! – Andere tatsächlich eingetretene Interstadiale und Stadiale wie Bölling, Alleröd, Salpausselkä werden ja durch die Strahlungskurve nicht erklärt. Ihre Ursachen liegen auf einem anderen Gebiet! Dies zeigt ein Vergleich mit dem Klimagang des Jahres: Mit Recht wurde niemals versucht, die Maifröste, die Junikälte, den Altweibersommer, den Wärmerückfall um Weihnachten aus dem Sonnenstande allein zu erklären. Dies sind, wie manche Stadiale der Eiszeit, Erscheinungen, die mit der Verteilung von Land und Meer zusammenhängen. Das Land wird im Frühjahr rascher erwärmt; es entsteht in den Küstenregionen ein Temperaturgegensatz zwischen Land und Meer, der periodische Vorstöße kalter Meeresluft in das Landinnere, den sogenannten Monsun (im weitesten Sinne) zur Folge hat. Verspätungserscheinungen ähnlicher Art zeigen sich beim Ab-

schmelzen des Inlandeises – nach den Untersuchungen von Graul hinkt das Verschwinden des kanadischen Inlandeises hinter dem skandinavischen etwa 3000 Jahre hinterdrein! Rein rechnerisch ist es auch möglich, daß Intervalle von wenigen tausend Jahren bei der astronomischen Berechnung z. T. gar nicht erfaßt wurden, da die Stichproben außerhalb der Extreme nur im Abstand von 5000 Jahren vorgenommen wurden. Aber die Hauptursache für die Abweichungen der Strahlungskurve von den  $C^{14}$ -Werten und den statistischen Ergebnissen (in Bild 1: Kurve c gegenüber den Kurven a, b, d) dürfte doch in den natürlichen Verspätungen beim Klimagang liegen. Sie beträgt beim Jahresgang gegenüber dem Sonnenstand mindestens einen Monat, also ein Zwölftel der Vollperiode; bei der Eisschmelze, die bei den Alpengletschern erst im Mai beginnt, beträgt sie 4 Monate, also ein Drittel der Vollperiode. Bei den Stationen im Polargebiet tritt die höchste Temperatur – offenbar im Zusammenhang mit der Eisschmelze – erst im August ein, die Verspätung beträgt also ein Sechstel der Vollperiode. Da die astronomische Hauptperiode (wechselnde Stellung der Erdachse) etwa 40 000 und die Nebenperiode des Perihels rund 20 000 Jahre umfaßt, sind Verspätungen bis zu 10 000 Jahren nicht bloß erklärlich, sondern als klimatischer Effekt sogar zu fordern! Die Frage, wie groß die Verspätung im Einzelfall sein muß, ist allerdings schwer zu beantworten; es wäre verfrüht, hierüber Genaueres aussagen zu wollen. Räumliche Einflüsse der Zirkulation und zeitliche Änderungen der Bestrahlung können hier kaum auseinandergelassen werden. Da die  $C^{14}$ -Methode mit Hilfe organischer Reste den klimatischen Höchststand, nicht den vorausgehenden der höchsten Bestrahlung registriert und weil das gleiche bei den Gletscherenden für den klimatischen Tiefstand im Verhältnis zur schwächsten Bestrahlung eintritt, ist überall, soweit es sich nicht um historische Einzeldaten handelt, mit mehrtausendjährigen Verspätungen gegenüber der Strahlungskurve zu rechnen. Beim postglazialen Klimaoptimum und beim Hauptwürmmaximum sind schon bisher Verzögerungen von einigen tausend Jahren angenommen worden (Lit. 5a, 6). Wie die Pfeile in Bild 1 zeigen, sind Verspätungen in dieser Größenordnung auch an anderen Stellen der Kurve b gegenüber c vorhanden. Besonders groß sind sie bei den älteren Würmphasen. Man kann dies so erklären, daß im vorausgehenden Eem-Interglazial die Eisdecke des Nordpolarbeckens besonders weit zurückschmolz, die Albedo sich entsprechend minderte und dadurch die Wiedervereisung in den Würmphasen hintangehalten wurde (in der oberen Hälfte der Kurve c durch Punkte angedeutet). – Unstimmigkeiten, die in dieser Hinsicht zwischen den Kurven c und d auftreten, erklären sich in erster Linie dadurch, daß das Karibische Meer in der Bestrahlung von den europäischen Gegebenheiten etwas abweicht. Seine Temperatur wird außerdem durch Zustrom südäquatorialer Wassermassen, die auf den Norden übertreten, mitbestimmt. Ferner zeigen die in Bild 3 wiedergegebenen Kurven, daß zur Zeit des Altwürm (um 70 000 v. h.) in den Südbreiten eine sekundäre Erwärmung vor sich ging, welche die gleichzeitige Abkühlung der Nordhalbkugel erst in den höheren Breiten wirksam werden ließ; man vergleiche dazu die isotopischen Temperaturen der Bohrkerne 240 und 179 im Karibischen Meer mit dem Bohrkerne 280 im Nordatlantik (Lit. 5b, S. 528). – Auch die Frage der gleichmäßigen Sedimentierungsgeschwindigkeit und die Übertragung der  $C^{14}$ -Werte

auf die Pa/Th-Methode dürfte für die älteren Zeiten noch Ungenauigkeiten in sich bergen, die erst durch weitere Messungen berichtigt werden können.

#### V. Einwände. Eiszeiten in früheren Erdperioden. Zusammenfassung.

Zum Schluß dieses Aufsatzes, der die Grundlagen der Strahlungskurve darstellen und sich mit ihrer Bestätigung an den Tatsachen befassen soll, muß ich mit Bedauern feststellen, daß jene Grundlagen auch heute noch von Fachleuten nicht verstanden werden. Wir lesen bei Woldstedt (Lit. 18a, S. 18, in der Zusammenfassung seines Aufsatzes über die Vergletscherung Neuseelands usw.): „Der Ablauf der letzten Vereisung und der Postglazialzeit in Neuseeland war nach den vorliegenden C<sup>14</sup>-Bestimmungen genau gleichzeitig mit dem der Nordhalbkugel. War aber die letzte Eiszeit auf beiden Halbkugeln gleichzeitig, dann müssen es auch die früheren gewesen sein. Das stimmt mit der Milankovitch-Kurve nicht überein. Diese kann in der vorliegenden Form nicht als Ursache der Eiszeiten herangezogen werden.“ Ferner ebenda auf S. 24: „Nach der Strahlungskurve soll die letzte Eiszeit auf der Südhalbkugel vor rund 30 000 Jahren gewesen sein. Tatsächlich endete sie, wie auf der Nordhalbkugel, vor rund 10 000 Jahren. – Unter den von Milankovitch herangezogenen Erdbahnelementen betrifft eines die beiden Halbkugeln gleichzeitig, nämlich die Neigung der Erdachse zur Umlaufbahn. Bei steilerer Lage der Erdachse müßten die polnäheren Breiten beider Halbkugeln gleichzeitig weniger Wärme empfangen haben. Dem würde aber eine stärkere Erwärmung der eingegengten tropischen Zone gegenüberstehen. Nach allem, was wir wissen, war aber eine stärkere Erwärmung der Tropen während der Eiszeiten nicht vorhanden, sondern wahrscheinlich ebenfalls ein Absinken der Mitteltemperatur, das auf etwa 4° C geschätzt worden ist. So werden wir nach anderen Ursachen für die Eiszeiten auf der Erde zu suchen haben.“ – Hiezu sei bemerkt: Milankovitch hat aus seiner Theorie niemals ein allgemeines Alternieren der Eiszeiten abgeleitet, das ist ihm bloß von anderer Seite unterlegt worden. Er hat immer zwischen den einzelnen Breiten differenziert, wie die hier wiedergegebenen Bilder 2 und 3 und der zugehörige Text auseinandersetzen. Darüber hinaus hat er sich klar für das Vorwiegen des gleichartigen Gangs auf Grund des Verhaltens der Polarbeiten entschieden; das zeigen seine Tabellen, in denen er auch die erhöhte Albedo der hohen Breiten in die Rechnung einbezieht und graphisch darstellt (Lit. 12, S. 586 ff. und S. 612). Über den Gang der Bestrahlung in den Tropen hat er nur mathematisch gedacht, ohne die Aufgliederung der kalorischen Halbjahre in Vierteljahre zu berücksichtigen (vgl. Abschn. III.). Auch der Ausgleich der Klimate zwischen den hohen und niedrigen Breiten durch Luft- und Meeresströmungen hat Milankovitch als Nicht-Klimatologen wenig beschäftigt. An diese Betrachtungen schließt sich dann bei mir der Ausgleich der Klimate zwischen den beiden Hemisphären an, der auch eiszeitliche Verhältnisse in Rücksicht zieht. Diese Erörterungen finden sich erstmals in meinen eigenen Veröffentlichungen (Lit. 19a, b, c) und sind in diesem Aufsatz weitergeführt; sie stehen also jetzt zur Diskussion. – Was die von Woldstedt erwähnten verschiedenen

Zeitlagen des Hauptwürms auf beiden Hemisphären anlangt, so bilden sie, wie die Strahlungskurve in Bild 1c anlangt, trotz der Interstadiale einen gleichliegenden Komplex, der sich rückwärts im Abstand von etwa 40 000 Jahren zweimal wiederholt. Man kann also den Anfang um 30 000 im Süden und das Ende im Norden um 10 000 nicht als getrennte Phasen einander gegenüberstellen. – Zum letzten Einwand Woldstedt's betr. den Einfluß der Erdachsenlage ist zu sagen: Er übersieht völlig, daß bei der Deutung der Strahlungskurve nach Köppen-Milankovitch nur die kühlen Sommer (wegen der geringen Schneeschmelze) als Ursache der Eiszeiten betrachtet werden. Die Tabellen Milankovitchs sind aber auch für die Winter aufgestellt und zeigen, daß jeweils kühle Sommer mit milden Wintern zeitlich gekoppelt sind, daß also der Jahresbetrag der Strahlung sowohl bei den einzelnen Breitenkreisen als bei der ganzen Erde zeitlich annähernd gleich bleibt. Man kann daher von einem vermeintlichen Strahlungsmangel in hohen Breiten nicht auf eine erhöhte Zufuhr in den Tropen schließen. Der ganze Vorgang läßt sich etwa so beschreiben: bei annähernd gleicher Jahreszufuhr an Strahlung sind kleine Gegensätze zwischen Sommer und Winter vereisungsfreundlich, große sind ihr feindlich. Ferner ist von Wundt in früheren Veröffentlichungen (z. B. Geolog. Rundschau 34 [1944], S. 713) begründet worden, daß neben den kühlen Sommern auch die mit ihnen gekoppelten milden Winter gletscherfreundlich sind, da Temperaturen in der Nähe von  $0^{\circ}$  mehr Schnee bringen als strenge Kälte; man denke dabei an die Kälte-wüsten Nordgrönlands; vgl. Abschn. III 1. Hälfte.

Eiszeiten in früheren Erdperioden. Eine kritische Betrachtung erwartet von der Strahlungskurve mit Recht, daß sie auch zu dem Ausbleiben von Eisvorstößen vor den Penck'schen Eiszeiten Stellung nimmt. Warum sind solche Kaltzeiten rückwärtsgehend erst wieder im Permokarbon und noch viel früher im Eokambrium anzutreffen? Ist es doch unwahrscheinlich, ja unmöglich, daß die jetzt auftretenden Perioden der Erdbahnelemente in früheren Erdepochen gefehlt haben sollen! – Eine schon von anderen Forschern gegebene Antwort lautet: Die Anstöße der Erdbahnelemente waren immer da, aber ihre Stärke mußte in verschiedener Hinsicht einen gewissen Schwellenwert erreichen, um Vereisungen hervorzubringen; bei der Erdachse besteht dieser Schwellenwert in der hinreichenden Steillage. Diese Voraussetzungen traten nach einer von Bacsák (Lit. 1) aufgestellten These nur in Ausnahmeszeiten ein, die einschließlich der Interglaziale rund 20 Millionen Jahre umfassen; diesen Zeiten stehen (ganz roh) 400 Millionen normale Zeiten mit schwachen Schwankungen der Erdbahnelemente gegenüber. Die alten Eiszeitperioden, jedenfalls die des Permokarbons, dürften an die 20 Millionen herangekommen sein. Die jetzige hat nach Milankovitch erst vor 600 000 (nach Woerkom erst vor 350 000) Jahren begonnen, dürfte sich also noch eine Reihe von Jahrmillionen fortsetzen, in die natürlich, wie in der Gegenwart, lange Interglaziale eingeschaltet sind. Daß Bacsák die Zahlenwerte von Milankovitch verwendet, dürfte sich auf diese Überlegungen nur wenig auswirken; es handelt sich nur um Größenordnungen, wie auch aus der Zeitlage des Permokarbons hervorgeht, das nach Schätzungen anderer Art höchstens 300 Millionen Jahre zurückliegt. Bacsák stützt seine These auf die Tatsache, daß die Knoten der Planetenbahnen (deren Schnittpunkte mit der Erdbahn) sich



zur Zeit alle in e i n e m Quadranten befinden, daß also die Planeten die Erde in dem gleichen – störenden! – Sinne beeinflussen. Liegen, wie in anderen Erdperioden, die Knotenlinien orthogonal zueinander (besonders die der großen Planeten Jupiter und Saturn), so heben sich die Störeinflüsse größtenteils auf und es treten Zeiten ein, in denen das Paar Sonne-Erde im wesentlichen auf sich selbst gestellt ist. Zu diesen Überlegungen, die sich an die Strahlungskurve sinngemäß anschließen, treten Theorien, die das Ausbleiben von Eisvorstößen aus terrestrischen Ursachen erklären und auf diesem Gebiet Schwellenwerte annehmen. Erst wenn warme Meeresströmungen den Polen in vollem Maße zugänglich sind, können Vereisungen der höheren Breiten verhindert werden; dies ist die Theorie der eisfreien (akryogenen) Polklimate von Kerner-Mariaun. Die Zufuhr warmen Wassers kann das Nordpolarbecken gegenwärtig nur teilweise von Eis freihalten; aber im Tertiär konnte sie dort Floren und Faunen hervorbringen, die jetzt nur in mittleren Breiten zu finden sind. Wenn aber größere Eiskerne einmal gebildet sind und sich mit den Erdbahnelementen verbünden, dann tritt noch die Albedowirkung hinzu und läßt die weißen Flächen durch Selbstverstärkung äquatorwärts immer mehr sich ausbreiten. Auch am Südpol dürfte die Eisansammlung im Tertiär viel kleiner gewesen sein; man nimmt sogar an, daß der antarktische Eisdom sich erst zu Ende des Tertiärs und im Quartär gebildet habe. Die überall sichtbaren älteren Strandlinien zeigen nach dieser These die alten Meeresstände an, die vor der Entnahme der großen Eismasse auf der Erde herrschten. – In diesem Zusammenhang ist auch eine Verschiebung der Pollagen zu nennen, die durch eine Bewegung der Erdkruste über dem Erdkern entstanden sein kann (nicht etwa durch Verschiebung der Drehachse innerhalb des Erdkerns). Des weiteren kann eine teilweise Wanderung der Erdkruste in Form von Kontinentalverschiebungen stattgefunden haben; sie wird durch die Existenz eines vereisten Gondwanalandes mit Südpollage in Südafrika während des Permokarbons nahegelegt. Dagegen war der damalige Nordpol, im Nordpazifik liegend, eben wegen dieser Lage eisfrei. Diese Theorie wird neuerdings durch Beobachtungen über Paläomagnetismus gestützt, der für die damaligen magnetischen und astronomischen Pole benachbarte Lagen vermuten läßt. Von häufig vertretenen Eiszeit-Theorien möchte ich die These einer geänderten Zustrahlung von der Sonne (Schwankungen der Solarkonstanten) hinter andere Theorien zurückstellen. Die Messungen der letzten Jahrzehnte ergaben für die Sonnenstrahlung Werte, die sich nur in engen Grenzen bewegen. Wenn gesagt wird, daß große Teile der UV-Strahlung in der hohen Atmosphäre sich der Messung entziehen und Schwankungen dieses Strahlungsteiles Klimaänderungen hervorrufen konnten, so ist dagegen einzuwenden, daß das zugehörige UV nur etwa den hunderttausendsten Teil der Gesamtstrahlung ausmacht und daher keine nennenswerte Änderung des Klimas bewirken kann. Die Annahme einer Änderung der Sonnenstrahlung ist dem „deus ex machina“ zu vergleichen, der dann herangezogen wird, wenn andere Erklärungen versagen. – Auf zahlreiche andere Eiszeittheorien kann hier aus Raummangel nicht eingegangen werden.



## Z u s a m m e n f a s s u n g

Bei den Neuentwicklungen zur Strahlungskurve von Milankovitch handelte es sich für mich darum, die Grundgedanken der Kurve herauszustellen, die im Mittelpunkt vieler Diskussionen gestanden hat. Die Strahlungskurve erhebt nicht den Anspruch, eine Allein-Erklärung für den Ablauf der Eiszeiten zu geben; aber sie ist die einzige Theorie, die imstande ist, die rhythmische Wiederkehr der Eiszeiten zu begründen. Daß die Kaltzeiten nicht ins Tertiär zurückreichen, ist in erster Linie auf die andere Land- und Meerverteilung zurückzuführen (eisfreie Polklimate). Da nach der Neuberechnung von Woerkom die Ausschläge der Strahlungskurve erst nach 350 000 vor heute ein beträchtliches Maß erreichen, beschränken sich die „klassischen“ Eiszeiten Penck's auf diesen Zeitraum! – Für den Eintritt von Eiszeiten sind einzig die hohen und die mittelhohen Breiten von Bedeutung, weil sich nur hier Schnee- und Eisflächen von größerem Umfang bilden und durch die Albedowirkung weiter wachsen können. Aus dem gleichen Grunde verlangt die Theorie von Milankovitch das gleichzeitige Auftreten von Eisvorstößen auf beiden Halbkugeln (dies mindestens annäherungsweise). – Die heraus sich ergebende absolute Chronologie wird gestützt durch die Ergebnisse der Radiokarbonmethode und ähnlicher Verfahren, insbesondere durch die Untersuchungen der Tiefseebohrkerne (Emiliani und andere Autoren). Zur Angleichung der Verhältnisse auf den beiden Hemisphären trägt auch die allgemeine Zirkulation in der Atmosphäre und in den Ozeanen bei, die überall klimatische Verspätungen und Kompensationen mit sich bringt. – Beim Vergleich der Forschungen auf allen Gebieten finden wir im allgemeinen eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Im einzelnen ist zu bemerken: Was die Würmeiszeit anbelangt, so bleibt von den bei Köppen und Milankovitch auftretenden Phasen (W I, W II, W III) das W III als Hauptwürm übrig, das die schwächere Phase W II im Gelände zerstört oder verdeckt hat (Hauptwürm 25 000 vor heute, Altwürm um 55 000 vor heute). Das letzte Interglazial (Eem, Sangamon) lag um 80 000 vor heute und der Schwerpunkt des Riß (identisch mit dem früheren W I) um 110 000 vor heute. – In diese Hauptklassifikation sind eine Reihe von kleineren Klimaschwankungen und Interstadialen eingebettet, die man – in Analogie mit dem Witterungsverlauf eines Einzeljahres – der Land- und Meerverteilung und der gegenseitigen Beeinflussung der Halbkugeln zuschreiben kann. Aber hier bleiben im einzelnen noch viele Probleme zu lösen.

## S u m m a r y

Recent developments concerning the „Solar Radiation Curve“ have been the subject of many discussions. In this paper I intended to explain the fundamental ideas of that theory: Milankovitch's curve does not claim to give an explanation for all features of the glacial ages, but it is the single theory to interpret their periodical return. Their non-existence during the Tertiary will be understood by a changed repartition of land and sea accounting for ice-free climates around the poles and preventing glaciations. The revision of the „Radiation Curve“ by Woerkom has pointed out that its

greater amplitudes do not begin until 350 000 years before present (b. p.). Penck's classical glacial ages (Guenz, Mindel, Riß, Würm) contain only a half of the duration computed by Koeppen and Milankovitch. – It may be emphasized that the high and middle-high latitudes are exclusively responsible for glacial periods; those only are capable to produce considerable areas of snow and ice and to grow broad by the effect of their albedo. Therefore Milankovitch's theory postulates contemporaneous appearance of ice ages on both hemispheres (at least approximatively). This conclusion is reinforced by the general circulation in the atmosphere and the oceans which causes everywhere climatic retardations and compensations. – The absolute chronology is further supported by radiocarbonic investigations and similar methods, especially in the sea by examining the fluctuations of temperature in deep-sea cores (Emiliani and other authors). – Comparing all results we find a good agreement between the features of glacial morphology and geology with the claims of the radiation curve and climatological considerations. Concerning the Würm Glaciation which was divided in 3 phases by Köppen and Milankovitch, it remains only a Main Würm (about 25 000 b. p.) which has generally covered or destroyed the traces of an older and weaker Würm (about 55 000). The last interglacial (Eem, Sangamon) dates about 80 000 and the center of Riss (identical with Würm I of the old coordination) may be placed about 110 000 b. p. Into the main classification series of interstadials and climatic fluctuations are inserted which account – in analogy to the weather of a year – for the contrasts between land and sea and for the mutual influences of the two hemispheres. But there are still many problems to be solved.

## Literatur (kleine Auswahl)

1. Bacsák, G.: Überblick über das Klima der Äquatorialzone. Acta Technica Acad. Scient. Hungar., Budapest 1961, Bd. 37, H. 3/4, S. 399.
2. Brunnacker, K.: Vortrag Paläoklimatagung, Geol. Vereinig. Köln 1964.
3. Ebers, E.: In Eiszeitalter u. Gegenwart 11 (1960), S. 64–76.
4. Ehrenberg, K.: In Verhandl. Zool. Botan. Ges. Wien 101/ 102 (1962), S. 18.
- 5a. Emiliani, C. u. Geiss, E.: In Geol. Rundschau 46 (1959), S. 576.
- b. Emiliani, C.: In Ann. New York Acad. Scienc. 95 (1961), S. 521.
- c. Emiliani, C.: In Geol. Soc. America Bull. 75, 1964, S. 129.
6. Fairbridge, R.: In Ann. New York Acad. Scienc. 95 (1961), S. 542.
7. Flohn, H.: In Bonner Meteor. Abhandl. H. 2 (1963), S. 17.
- 8a. German, K.: In Actes 4. Congrès Int. nat., Rom 1953.
- b. German, K.: In Ver. Vaterländ. Nat. Kunde Württ. (Jahreshefte 116, 1961).
- 9a. Gross, H.: In Quartär 10/11 (1958/59), S. 27 u. 14 (1962/63), S. 49.
- b. Gross, H.: In Festschrift für L. Zotz. 1960, S. 179.
- c. Gross, H.: In Eiszeitalter u. Gegenwart 12 (1960), S. 99.
10. Guenther, E.: In Jber. u. Mitt. Oberrhein. geol. Ver. N. F. 45 (1963), S. 93.
11. Kraus, E.: In Eiszeitalter u. Gegenwart 12 (1962), S. 18 und 13 (1962), S. 227.
12. Milankovitch, M.: Kanon d. Erdbestrahlung. 1941, S. 361, 510 ff., 608.
- 13a. Schmid, E.: Bericht Internat. Kongr. f. Vor- u. Frühgesch. 1958, Hamburg 1962.
- b. Schmid, E.: In Eiszeitalter und Gegenwart 14 (1963), S. 107.
- 14a. Schwarzbach, M.: Das Klima der Vorzeit. 2. Aufl. 1961.
- b. Schwarzbach, M.: In Die Umschau 64, 1964, H. 5, S. 143.
15. Shotton, W.: In Phil. Transact. Roy. Soc. London B 244, 1961.
16. Weidenbach, F.: In Actes 4. Congrès Int. nat. Rom 1953.
17. van Woerkom, A.: In Shapley's Climatic Change, Cambridge 1953, S. 147.
18. Woldstedt, P.: a) In Eiszeitalter u. Gegenwart 12 (1962), S. 18; b) ebenda 13 (1962), S. 115; c) Das Eiszeitalter. 2. Aufl., 1954.
- 19a. Wundt, W.: In Quartär 10/11 (1958/59), S. 15.
- b. In Festschrift für L. Zotz. 1960, S. 559.
- c. In Polarforschung IV (1959), H. 1/2, ersch. 1961.
- d. In Meteorolog. Zeitschr. 1934, H. 2, S. 49.
- e. In Geolog. Rundschau 34 (1944), S. 713.
20. Zeuner, F.: The Pleistocene Period, 2. Aufl. London 1959.
21. Zotz, L.: Methoden d. Altsteinzeitforschung in: Altsteinzeitkunde Mitteleuropas, Bonn 1951.