

## Ein neues Kapitel der exakten Wissenschaften und dessen Anwendung in den beschreibenden Naturwissenschaften

Von

M. MILANKOVITCH

Einer freundlichen Einladung der Karls-Universität in Prag und der Masaryk-Universität in Brünn Folge leistend, hatte ich die Ehre, an diesen beiden Universitäten Vorträge über die Ergebnisse meiner Forschungen auf einem neuen Gebiet der Anwendung der mathematischen Wissenschaften zu halten. Ich unternehme es hiemit, über den Inhalt dieser Vorträge zusammenfassend zu berichten.

Es war keine leichte Aufgabe, über die Ergebnisse meiner fünfundzwanzigjährigen Arbeit auf dem in Betracht zu ziehenden Gebiete der Wissenschaft Bericht zu erstatten, doch erwies sich im vorliegenden Falle meine Aufgabe dadurch wesentlich erleichtert, dass alle meine Forschungen auf dem betreffenden Gebiete einem einzigen, allerdings sehr breit angelegten Problem entsprossen sind. Dieses von mir vor fünfundzwanzig Jahren erspähte und aufgestellte Problem entsprang folgenden Ueberlegungen.

Die Bewegung der Planeten gehorcht dem ehernen Gesetz der Himmelsmechanik, dem Newtonschen Gravitationsgesetz, die Bestrahlung der Planeten durch die Sonne dem exakten geometrischen Bestrahlungsgesetz. Durch die Benützung dieser beiden Gesetze ist es möglich, den Bestrahlungsgang der Planeten, der sich aus ihrer Drehbewegung und ihrem Umlauf um die Sonne ergibt, mathematisch zu beschreiben. Der Zusam-

menhang zwischen dem Bestrahlungszustand und dem Temperaturzustand der Planeten, den Gesetzen der Physik gehorchend, kann ebenfalls erfasst und mit Benützung des durch die Mathematische Physik geschaffenen Apparates mathematisch dargestellt werden. Es erscheint also möglich, auf der durch die erwähnten Naturgesetze gegebenen festen Grundlage eine mathematische Theorie des Bestrahlungsganges der Planeten und der thermischen Effekte dieser Erscheinung zu errichten. Gelingt ein solcher Aufbau, und hat man die Leistungsfähigkeit der neuen Disziplin an den Ergebnissen der empirischen Forschung erprobt, dann können mit Hilfe dieser neuen wissenschaftliche Waffe die Grenzen unserer direkten Wahrnehmungen auf einer breiten Strecke räumlich und zeitlich überschritten werden. Räumlich, indem man die durch die Strahlung der Sonne hervorgerufenen thermischen Erscheinungen auch dort zu erforschen imstande sein wird, wo uns eine direkte Beobachtung versagt ist, also in den hohen Schichten unserer Atmosphäre und an den Oberflächen der Planeten, zeitlich, indem man die thermischen Erscheinungen auf der Erdoberfläche und in der Erdatmosphäre Schritt für Schritt in die Vergangenheit zu verfolgen fähig sein wird, um auf diese Weise einen Einblick in das Klima/geologischen Vorzeit zu gewinnen.

Der Aufstellung dieses Problems, seiner Lösung und deren Anwendung in den exakten und in den beschreibenden Naturwissenschaften ist eine lange Reihe meiner Veröffentlichungen entsprungen, deren namentliche Aufzählung hier überflüssig erscheint, weil ich die wichtigsten Ergebnisse aller dieser Arbeiten nach und nach in drei Werken zusammengefasst habe, so dass ich nur diese hier besonders zu erwähnen brauche. Es sind dies:

„Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. Paris, Gauthier-Villars 1920.“

„Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen. Berlin, Borntraeger 1930.“

„Astronomische Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate. Berlin, Borntraeger 1938.“

Diese drei Veröffentlichungen bilden, indem sie sich gegenseitig vervollständigen, den stufenweisen Aufbau eines neuen Zweiges der exakten Wissenschaften.

In dem zuerst erschienenen Werke, in der „Théorie mathématique“, sind die Grundfragen des gestellten Problems: die Bestrahlung der Planeten durch die Sonne, die Beeinflussung dieser Bestrahlung der Planeten durch die Planetatmosphären und der Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und dem Temperaturzustand der Planetoberflächen und ihrer Atmosphären, theoretisch gelöst und an dem Klima der Erde und den Temperaturen der inneren Planeten erprobt worden.

Die „Mathematische Klimalehre“, die als dessen theoretische Einleitung dem Köppen-Geigerschen Handbuch der Klimatologie einverleibt wurde, befasst sich nur mit dem Klima der Erde und, wie im Titel angegeben, mit den vorzeitlichen Aenderungen dieses Klimas.

Meine letzte Veröffentlichung auf diesem Gebiete, die soeben fertiggedruckten „Astronomischen Mittel zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate“, die einen besonderen Abschnitt des Gutenbergschen Handbuches der Geophysik bildet, und die sich ausschliesslich mit dem Klima der Vorzeit befasst, bringt durch die unlängst erfolgte und darin mitgeteilte Lösung des Polverlagerungsproblems und durch die Ermittlung des Zusammenhanges zwischen dem vorzeitlichen Gang der Erdbestrahlung und den zugehörigen Verschiebungen der Schneegrenze meine langjährige Arbeit zu ihrem Abschluss.

Von allen Ergebnissen meiner wissenschaftlichen Arbeit haben jene, die sich auf die Erforschung des vorzeitlichen Klimas beziehen, die ausgiebigste Anwendung in den beschreibenden Naturwissenschaften erfahren, haben diese Ergebnisse bisher in über 50 Veröffentlichungen der Klimatologen und der Geologen Aufnahme und Berücksichtigung gefunden. Dies veranlasst mich, meinen Bericht auf diesen Teil meiner Untersuchungen zu beschränken.

Meine Forschungen auf diesem Gebiete gingen von folgenden Ueberlegungen aus. Die Himmelsmechanik lehrt, dass die Bahn der Erde um die Sonne und die Orientierung der Drehachse der Erde im Weltraume langsamen, aber fortwährenden Aenderungen unterworfen sind. Ich stellte mir also zur Aufgabe, diese Aenderungen und ihre thermischen Effekte mit Benützung der Lehren der Himmelsmechanik und mit Hilfe des von mir geschaffenen Apparates in die Vergangenheit zu

verfolgen, um auf diese Weise ein Bild des vorzeitlichen Klimas zu entwerfen.

Wohl hat es auch vor mir nicht an Versuchen gefehlt, die geologisch nachgewiesenen Aenderungen des Erdklimas, die in den sogenannten Eiszeiten ihren stärksten Ausdruck fanden, astronomisch zu erklären, aber alle diese alten astronomischen Theorien der Eiszeiten können nicht als Lösungsversuche des soeben exakt gekennzeichneten Problems aufgefasst werden, weil, wie ich dies bereits in meiner „Théorie mathématique“ nachweisen konnte, von keinem einzigen Autor dieser Theorien das Zusammenwirken aller veränderlichen astronomischen Elemente erfasst und der Apparat der Himmelsmechanik und jener der Mathematischen Physik ausreichend und sachgemäss angewendet wurde, sondern nur gewisse, einzelne Komponenten der Erdbewegung ihre unvollständige Berücksichtigung fanden. Ein weiterer Grund des Misserfolges der alten Eiszeitentheorien ist darin zu suchen, dass man damals über die wärmespendende Macht der Sonnenstrahlung ganz ungenügend unterrichtet war und dass man den numerischen Wert der Solarkonstante gar nicht kannte, so dass es meinen Vorgängern versagt wäre, ihre Untersuchungen, selbst dann, wenn diese auf einer gesunden theoretischen Basis gefusst hätten, bis zu greifbaren numerischen Resultaten zu verfolgen. Ein glücklicher Zufall wollte es, dass gerade zur Zeit, als ich meine Untersuchungen in Angriff genommen hatte, der numerische Wert der Solarkonstante zuverlässig ermittelt ward, so dass ich in die Lage versetzt wurde, meine theoretischen Untersuchungen mit zahlenmässigen Endergebnissen zu beschliessen. Hier kam mir also ein glückliches Zusammentreffen zur Hilfe, und das Glück ist ein mächtiger Helfer bei jeglichem Unterfangen.

Ich will nun versuchen, die Grundzüge meiner Untersuchungen möglichst kurz und anschaulich zu schildern. Ich werde dabei verzichten müssen, mich des für diese Untersuchungen geschaffenen mathematischen Apparates zu bedienen, weil hiezu ein ganzer Vorlesungszyklus erforderlich wäre. Ich werde mich nur einiger einfachen geometrischen Figuren bedienen.

Eine solche Figur sieht man hier aufgezeichnet (Fig. 1). In derselben stellt  $S$  den Mittelpunkt der Sonne und die Ellipse  $PIAIII P$  die Bahn der Erde dar;  $P$  ist das Perihelium,  $A$

das Aphelium. Denkt man sich in  $S$  eine gegen die Nordseite der Himmelskugel gerichtete Senkrechte  $SV$  zur Ebene der Erdbahn errichtet, die Parallele  $SN$  zur Drehachse der Erde gezogen und durch die Geraden  $SV$  und  $SN$  die Ebene  $E$  gelegt, so steht diese Ebene senkrecht auf der Ebene der Erdbahn und schneidet diese längs der Geraden  $II IV$ . Der Punkt  $II$  stellt die Lage

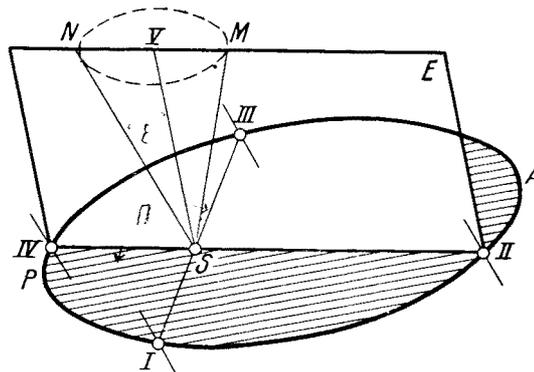


Fig. 1

der Erde zur Zeit des Sommersolstitiums, der Punkt  $IV$  jene zur Zeit des Wintersolstitiums dar. Wenn in der Ebene der Erdbahn durch  $S$  die Senkrechte zur Geraden  $II IV$  gezogen wird, so trifft diese die Erdbahn in den Punkten  $I$  und  $III$ , die die beiden Äquinoktiallagen der Erde darstellen;  $I$  entspricht dem Frühlingsäquinoktium,  $III$  dem Herbstäquinoktium. Die Zeitintervalle, die zwischen den Durchgängen der Erde durch die vier Kardinalpunkte  $I, II, III, IV$  verfließen, stellen die astronomischen Jahreszeiten dar; dabei entspricht das Bahnintervall  $I II III$  dem nördlichen Sommerhalbjahr, das Bahnintervall  $III IV I$  dem nördlichen Winterhalbjahr. Da die Bewegung der Erde dem zweiten Keplerschen Gesetz zufolge derart erfolgt, dass der Radiusvektor Sonne-Erde in gleichen Zeiten gleiche Flächen überstreicht, so ist, weil der Ellipsen-sektor  $I II III$  grösser ist als der Sektor  $III IV I$ , das Sommerhalbjahr der nördlichen Hemisphäre gegenwärtig um 7 Tage 14 Stunden länger als das Winterhalbjahr.

Der jährliche Verlauf der Bestrahlung der Erde durch die Sonne hängt nur von der Form der Erdbahn und ihrer Lage zur Drehachse der Erde ab. Die Form der Erdbahnellipse ist durch ihre grosse Halbachse  $a$  und durch ihre Exzentrizität  $e$  eindeutig gegeben, die Lage der Erdbahn zur Drehachse der Erde ist durch die beiden Winkel  $VSN$  und  $III SP$  festgelegt.

Der Winkel  $VSN$  stellt die Neigung der Drehachse der Erde zur Erdbahnebene oder die Schiefe der Ekliptik  $\varepsilon$  dar. Der Winkel  $III SP$  stellt, weil die Sonne zur Zeit des Frühlingsäquinoktiums in der Richtung  $IS$  auf der Himmelskugel projiziert erscheint, die Länge des Perihels zum Frühlingspunkt dar. Diesen Winkel wollen wir mit  $\Pi$  bezeichnen. Der jährliche Gang der Erdbestahlung ist also eine Funktion der Zeit und der astronomischen Elemente  $a$ ,  $e$ ,  $\varepsilon$  und  $\Pi$ . Mit Benützung des eingangs erwähnten Bestahlungsgesetzes ist es also möglich, den jährlichen Verlauf der Bestahlung der Erde, also ihrer Breitenkreise, ihrer Hemisphären oder beliebiger Zonen der Erdoberfläche mathematisch exakt zu beschreiben. Ich will nun, ohne auf die analytische Darstellung dieses Bestahlungsganges einzugehen, mit Hilfe der hier aufgezeichneten Fig. 2 die Hauptmerkmale dieses Bestahlungsganges kurz besprechen.

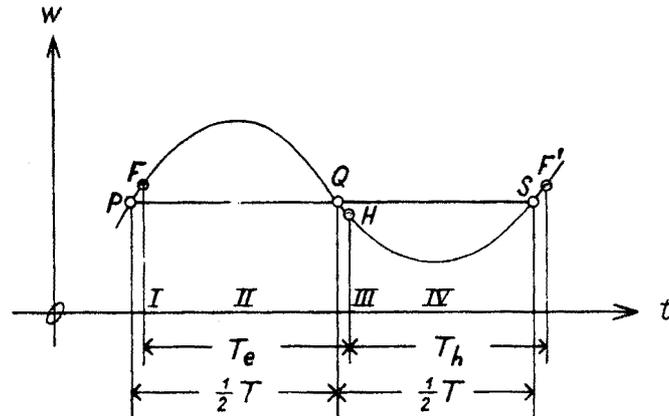


Fig. 2

Stellt man den jährlichen Gang der Bestahlung einer gegebenen, sagen wir nördlichen geographischen Breite graphisch dar, indem man die Abszissenachse zur Zeitskala wählt und die den einzelnen Zeitpunkten zugehörigen Bestahlungen als Ordinaten aufträgt, so bekommt man eine Kurve von der Form, wie wir sie in der Fig. 2 dargestellt sehen. In dieser Figur sind die Zeitpunkte des Frühlingsäquinoktiums, des Sommersolstitiums, des Herbstäquinoktiums und des Wintersolstitiums der Reihe nach mit  $I$ ,  $II$ ,  $III$  und  $IV$  gekennzeichnet. Es

fällt dabei sofort auf, dass die Bestrahlungen zur Zeit des Frühlingsäquinoktiums und des Herbstäquinoktiums nicht einander gleich sind. Dies rührt davon her, dass zu diesen Zeiten die beiden Entfernungen der Erde von der Sonne verschieden sind. Auch weisen die mit  $T_s$  und  $T_h$  bezeichneten Zeitintervalle des Sommer- bzw. des Winterhalbjahres, wie bereits gesagt, verschiedene Längen auf.

Dieser jährliche Bestrahlungsgang, der für jede geographische Breite berechnet werden kann, und der in der äquatorialen Zone der Erde seine besondere Eigentümlichkeiten aufweist, auf die ich hier nicht näher eingehen kann, würde sich Jahr für Jahr unabänderlich wiederholen, wenn die Bahn der Erde um die Sonne unveränderlich wäre und die Drehachse der Erde ihre Orientation im Raume behielte. Dies ist aber, wie bereits erwähnt, nicht der Fall. Die gegenseitigen Störungen der Planeten verändern langsam aber allmählich die Form und Lage der Erdbahn, während die auf die Erde einwirkenden anziehenden Kräfte von Sonne und Mond die Achse der Erde im Raume drehen und dadurch die bekannte Präzession der Tag- und Nachtgleichen verursachen. Diese Präzession hat zur Folge, dass die Gerade  $SN$ , die wir in der Fig. 1 parallel zur Erdachse gezogen hatten, während des Zeitintervalles von rund 26 000 Jahren den Kreiskegel  $NSM$  beschreibt. Die Achse dieses Kegels ist  $SV$  und dessen Oeffnungswinkel ist gleich  $2\varepsilon$ . Infolge dieser von der Sonne und des Mondes angezwungenen Bewegung der Drehachse der Erde dreht sich die Ebene  $E$  um die Gerade  $SV$  als Achse, und die Kardinalpunkte  $I, II, III, IV$  wandern im Sinne des Uhrzeigers längs der Erdbahn. Sie würden während des erwähnten Zeitintervalles von 26 000 Jahren einen vollständigen Umlauf auf dieser Bahn vollführen, wenn diese Bahn unveränderlich wäre. Infolge der erwähnten gegenseitigen Störungen der Planeten eilt die grosse Achse der Erdbahnellipse den Kardinalpunkten entgegen, weshalb diese Punkte einen vollständigen Umlauf auf dieser Bahn (von Perihel bis Perihel) in rund 21 000 Jahren vollführen. Während dieser Zeit, die allerdings nur als ein Durchschnittswert zu betrachten ist, nimmt die Grösse  $\Pi$  um  $360^\circ$  zu.

Durch die erwähnten Störungen ändert die Erdbahn auch ihre Form, indem ihre Exzentrizität  $e$  ungleiche Oszillationen

mit einer mittleren Periode von etwa 92 000 Jahren vollführt. Durch diese Störungen wird aber, wie die Himmelsmechanik lehrt, die Länge  $a$  der grossen Halbachse der Erdbahn nicht in Mitleidenschaft gezogen. Die Ebene der Erdbahn schwankt ausserdem im Raume, so dass sich die Rotationsachse der Erde gegen diese Ebene zu verneigen und aufzurichten scheint. Die Folge davon ist, dass die bisher als unveränderlich angenommene Gerade  $SV$  ihre Orientierung im Raume allmählich ändert, wodurch wieder der Kegel  $NSM$  seine Unbeweglichkeit und Regelmässigkeit verliert. Aus allen dem folgt eine oszillierende Aenderung der Ekliptikschiefe  $\varepsilon$  mit einer mittleren Periode von etwa 40 000 Jahren.

Von den zur Berechnung des Bestrahlungsganges der Erde erforderlichen vier astronomischen Elemente sind also die drei Elemente  $\Pi$ ,  $e$  und  $\varepsilon$  säkularen Aenderungen unterworfen, und alle diese Aenderungen müssen bei der Ermittlung des vorzeitlichen Ablaufes der Erdbestrahlung berücksichtigt werden. Es war ein verhängnisvoller Fehler aller meiner Vorgänger, dass sie die Aenderungen aller dieser drei astronomischen Elemente nicht in den Bereich ihrer Untersuchungen einbezogen hatten.

Die Himmelsmechanik liefert die erforderlichen Mittel, die säkularen Aenderungen, welche die astronomischen Elemente  $\Pi$ ,  $e$  und  $\varepsilon$  im Laufe der Vorzeit erfahren hatten, exakt zu berechnen. Diesbezügliche Berechnungen haben in Jahre während der Arbeit Leverrier und nach ihm Stockwell durchgeführt. Ich habe die Rechnungsergebnisse dieser beiden Astronomen bei meinen Untersuchungen benützt und dabei gleichlautende Resultate erhalten. Dabei erfreute ich mich der wertvollen Mitarbeit meines Kollegen Michkovitch, des vortrefflichen Direktors des neuerbauten astronomischen Observatoriums in Belgrad, der die Leverrierschen Berechnungen mit den aus den neuesten Bestimmungen der Planetenmassen sich ergebenden Korrekturen behaftete und mir auf diese Weise ein zuverlässiges astronomisches Material lieferte, mit dessen Benützung ich meine Untersuchungen durchführen konnte.

Ich unternahm es also, zu berechnen, wie die Bestrahlung der Erde durch die Sonne während der Vorzeit verlaufen ist. Es ergab sich dabei, dass das astronomische Material vollkommen ausreichend ist, um diesen vorzeitlichen Gang der Erdbe-

strahlung während der letztverflossenen 650 Jahrtausende, also während des ganzen Quartär-Zeitalters mit der erforderlichen Genauigkeit zu verfolgen, numerisch zu berechnen und graphisch zu veranschaulichen. Den Weg, den ich dabei eingeschlagen habe, kann ich hier nur in seinen Hauptzügen kurz schildern

Kehren wir zu diesem Zwecke wieder zur Fig. 2 zurück! In einem beliebigen Jahre der geologischen Vorzeit war der jährliche Bestrahlungsgang, der in Betracht gezogenen Breite der Erdoberfläche wegen der Veränderlichkeit der astronomischen Elemente ein anderer als gegenwärtig. Die Strahlungsextreme erreichten damals andere Werte als gegenwärtig, auch war die Dauer der astronomischen Jahreszeiten eine andere. Der Unterschied zwischen der Länge des Sommerhalbjahres und jener des Winterhalbjahres, der, wie gesagt, gegenwärtig 7 Tage 14 Stunden beträgt, kann ja infolge der Variabilität der astronomischen Elemente den Wert von + und — 31 Tagen 20 Stunden erreichen. Dies alles muss berücksichtigt werden, wenn man den damaligen Bestrahlungszustand der Erde mit dem gegenwärtigen vergleichen will.

Aus der Fig. 2 ist ersichtlich, dass die astronomischen Halbjahre  $T_e$  und  $T_h$  das Jahr keinesfalls in ein Intervall der stärkeren Bestrahlung und in ein Intervall der schwächeren Bestrahlung gliedern, weil die Bestrahlung im Endintervalle des Sommerhalbjahres geringer ist als jene zu Ende des Winterhalbjahres. Dies rührt davon her, dass die Gliederung des Jahres in astronomische Jahreszeiten nach dem alleinigen Kriterium der Dauer des Tages durchgeführt erscheint, aber nicht nach dem Kriterium der Stärke der Bestrahlung. Während beim ersten Kriterium nur die Deklination der Sonne massgebend ist, hängt die Bestrahlung der Erde durch die Sonne auch von der augenblicklichen Entfernung der Erde von der Sonne ab. Aus diesem Grunde weisen die astronomischen Jahreszeiten, die, wie wir gesehen haben, eine ungleiche Dauer besitzen, keinen innigen Zusammenhang mit der Erdbestrahlung auf. Ueberdies variieren sowohl die Längen dieser Intervalle, als auch die Ungleichheiten der Erdbestrahlung an ihren Enden fortwährend. Dies ist die Ursache, warum man mit Hilfe der astronomischen Jahreszeiten keinen tieferen Einblick in den vorzeitlichen Gang der Erdbestrahlung gewinnen kann.

Alle diese Unzukömmlichkeiten können vermieden werden, wenn man das Jahr in zwei gleich lange, also wirkliche Halbjahre gliedert, von denen das eine alle jene Tage umfasst, während welcher die Bestrahlung der in Betracht gezogenen Breite stärker war als an irgend einem Tage des anderen Halbjahres. Man hat also den erwähnten Ueberschuss von Tagen auf die beiden Halbjahre aufzuteilen und die wärmeren Tage dem Sommerhalbjahr, die kälteren Tage dem Winterhalbjahr zuzuweisen.

Es ist ein nicht sehr einfaches, aber ein klar umschriebenes mathematisches Problem, eine solche Gliederung des Jahres durchzuführen. Ich brauche hier auf die analytische Lösung dieses Problems nicht näher einzugehen, weil ich sie an der Hand der Fig. 2 geometrisch deuten kann, denn diese Lösung gründet sich auf folgender geometrischen Ueberlegung. Es ist jene zur Abszissenachse parallele Gerade  $PQS$  zu ziehen, die die Kurve der Bestrahlung derart schneidet, dass die Abschnitte  $\overline{PQ}$  und  $\overline{QS}$  einander gleich werden. Diese beiden Abschnitte stellen dann offenbar jene beiden Zeitintervalle des Jahres dar, die den soeben gestellten Forderungen genügen.

Diese beiden Zeitintervalle habe ich die „kalorischen Halbjahre“ benannt, weil sie durch die Anzahl der Kalorien bestimmt sind, die der in Betracht gezogenen geographischen Breite im Laufe dieser Halbjahre zugestrahlt werden. Jenes Halbjahr, das alle Tage der stärkeren Bestrahlung umfasst, sich also der grösstmöglichen Strahlungsmenge erfreut, heisst das kalorische Sommerhalbjahr, das andere das kalorische Winterhalbjahr.

Ich habe bereits erwähnt, dass die grosse Halbachse der Erdbahn keinen säkularen Aenderungen unterworfen ist, wie dies neben Lagrange auch Laplace in seinem berühmten Stabilitätsbeweis des Planetensystems bewiesen hat. Daraus folgt aber, dass auch die Umlaufzeit der Erde um die Sonne keinen säkularen Aenderungen unterliegt, so dass das siderische Jahr und — wenn man vernachlässigbare, das Ausmass von einigen Sekunden nicht überschreitende Variationen ausser Acht lässt — das tropische Jahr ihre Längen im Laufe der Zeiten unverändert behalten. Deshalb haben auch die kalorischen Halbjahre stets dieselbe Dauer von 182 Tagen 14 Stunden 54 Minuten.

Die kalorischen Halbjahre geben uns das Mittel in die Hand, den Gang der Erdbestrahlung exakt zu verfolgen. Denn

hat man den Beginn und das Ende der kalorischen Halbjahre ermittelt, so kann man auch die Strahlungsmengen berechnen, die während dieser Halbjahre der in Betracht gezogenen geographischen Breite zugestrahlt werden. Hat man diese Berechnung sowohl für die Gegenwart als auch für das in Betracht gezogene Jahr der Vorzeit durchgeführt, dann können die erhaltenen Werte direkt untereinander verglichen werden, weil sie sich alle auf gleiche Zeitintervalle beziehen. Man kann dadurch exakt zum Ausdruck bringen, wie sich an den einzelnen Breiten der Erde die sommerlichen bzw. die winterlichen Strahlungsmengen im Laufe der Vorzeit geändert hatten.

Derartige Berechnungen habe ich nach und nach für die geographischen Breiten von  $5^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$ ,  $35^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $55^{\circ}$ ,  $65^{\circ}$ ,  $75^{\circ}$  nördlich und südlich und für die mit den zugehörigen Breitenkreisen von  $45^{\circ}$  bzw.  $55^{\circ}$  begrenzten Polarkalotten der Erde durchgeführt. Die aus diesen Berechnungen sich ergebenden numerischen Tabellen stellen mit ihren 9079 Zahlen eine in mathematischer Sprache verfasste Geschichte der Erdbestrahlung der letztverflossenen 600 Jahrtausende dar.

Diese rechnerische Arbeit, die mich mit der zugehörigen Forschung fast vierzehn Jahre beschäftigte, habe ich in drei Etappen durchgeführt. Meine erste derartige Berechnung geschah auf Veranlassung von Köppen und Wegener, die mich einluden, einen diesbezüglichen Beitrag für ihr im Jahre 1924 erschienenes Werk „Die Klimate der geologischen Vorzeit“ zu liefern. Bei der Durchführung dieser Berechnung hatte ich das Glück, mich der Ratschläge des grossen Klimatologen Köppen zu erfreuen. Er riet mir, mein Augenmerk auf die Aenderungen der sommerlichen Bestrahlung der hohen nördlichen Breiten zu richten, denn diese Aenderungen mussten das Bild des vorzeitlichen Klimas am einschneidendsten beeinflusst haben. Eine Verminderung der sommerlichen Bestrahlung musste eine entsprechende Verschiebung der Schneegrenze nach unten und einen Vorstoss der Gletscher in die Täler zur Folge gehabt haben, und diese Erscheinung war der augenscheinlichste Effekt der vorzeitlichen Klimaschwankungen, der die deutlichsten Spuren auf der Erdoberfläche hinterlassen hatte.

Ich berechnete, diesem Ratschlage folgend, die Amplituden der vorzeitlichen Aenderungen der sommerlichen Bestrah-

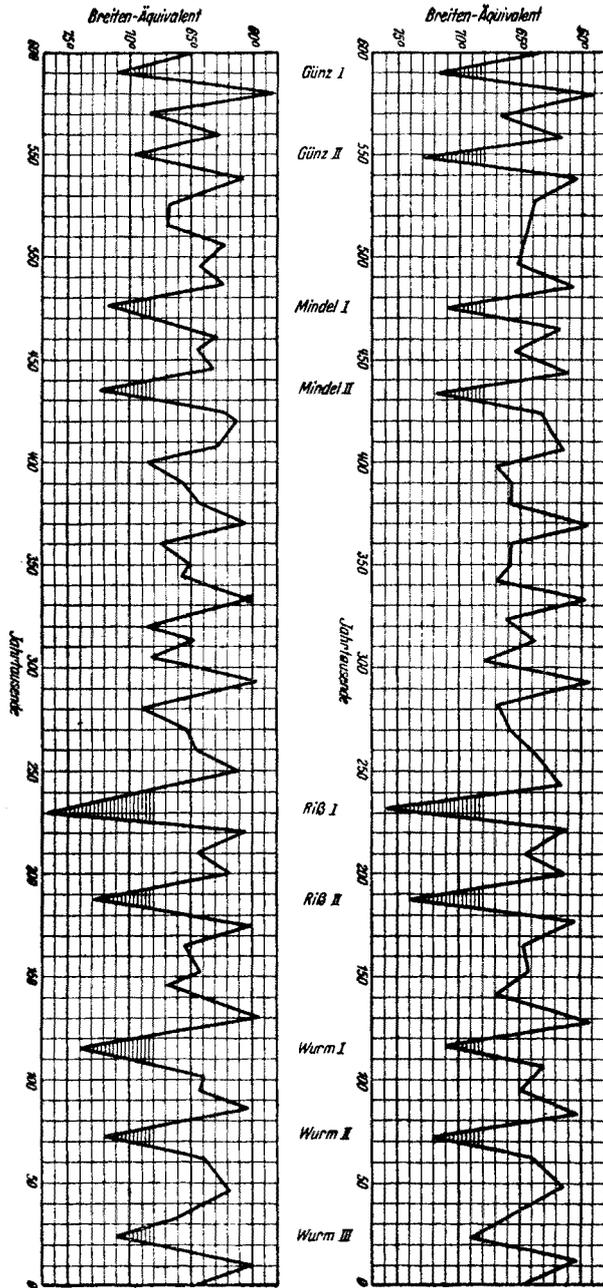


Fig. 3

Amplituden der säkularen Aenderungen der sommerlichen Bestrahlung des 65° nördlicher Breite

Oben : Diagramm, berechnet mit Hilfe der Stockwellschen Formeln.

Unten : Diagramm, berechnet mit Hilfe der Leverrier-Milankovitchschen Formeln.

lung der geographischen Breiten von  $55^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $65^{\circ}$  nördlich und stellte das Ergebnis dieser Berechnung auch graphisch dar, indem ich die stattgefundenen Strahlungsänderungen durch fiktive Breiteschwankungen veranschaulichte.

Diese Zackenlinien, von den deutschen Gelehrten „Strahlungskurven“ benannt, wiesen, wie aus der beiliegenden Fig. 3 ersichtlich, neun gewaltige Einbrüche der kühlen Sommer auf. Diese neun stark ausgebildeten Minima der sommerlichen Bestrahlung gehören den Jahrtausenden 590, 550, 476, 435, 230, 187, 116, 72, 23 an. Sie sind, wie aus diesen Zahlen ersichtlich, über das in Betracht gezogene Intervall der geologischen Vorzeit nicht gleichmässig verteilt, sondern sie treten in vier von einander getrennten Gruppen auf, indem die ersten sechs Minima zu drei Paaren, und die letzten drei zu einer Gruppe vereinigt erscheinen. In diesen vier Gruppen erkannte Köppen die deutlichen Belege der vier quartären Eiszeitphasen jenen von Günz, Mindel, Riss und Würm. Das Ausmass und die zeitliche Verteilung dieser vier Gruppen stimmte auf das vortrefflichste mit den damaligen geologischen Befunden überein, es blieb aber noch die Frage zu beantworten, wieso es kam, dass die Spuren der Komponenten der einzelnen Gruppen den Eindruck von je einer Eiszeitphase erweckt zu haben schienen. Diese Frage fand rasch ihre Beantwortung durch die bald einsetzenden, ja teilweise schon vor der Veröffentlichung der Strahlungskurven durchgeführten Forschungen einer stattlichen Reihe von Klimatologen und Geologen. An dieser weit verzweigten wissenschaftlichen Arbeit, über deren Ergebnisse ich hier leider nicht ausführlicher berichten kann, haben sich folgende Forscher hervorragend beteiligt: Köppen, Wundt, Soergel, Eberl, Grahmann, Toepfer, Zeuner, Gams, Gagel, Hyypä, Girmounsky, Sauramo, Beurlen, Bubnoff, Bülow, Bertsch, Dietrich, Keilhack, Klebelsberg, Klimaszevski, Knauer, Peters, Reichel, Reinig, Selzer, Staub, Steinmann, Vardanianz, Wasmund, Wright u. a. Aus den Arbeiten dieser Forscher ging unzweideutig hervor, dass alle in meinen Strahlungskurven verzeichneten Minima der Bestrahlung in weiten Gebieten Europas, ja selbst in den Alpen deutliche Spuren hinterlassen hatten, und dass die frühere Gliederung des Quartärs durch eine detail-

liertere mit dem Rhythmus der Strahlungskurve übereinstimmende „Vollgliederung“ zu ersetzen ist. Durch diese Feststellung ergab sich die Möglichkeit, die einzelnen Phasen des Eiszeitalters mit Hilfe der Strahlungskurve astronomisch zu datieren. Dadurch hat das Eiszeitalter seinen Kalender erhalten.

Unser gegenwärtige bürgerliche und kirchliche Kalender ist seinem Wesen nach nichts anderes als eine Abzählung der Himmelserscheinungen. In seinen Elementen, dem Tag, dem Monat und dem Jahr, spiegeln sich die astronomischen Erscheinungen, die Drehbewegung der Erde, der Umlauf des Mondes und die Umkreisung der Sonne durch die Erde, wieder. Genauso verhält es sich mit dem durch die Strahlungskurven geschaffenen Kalender des Eiszeitalters. In ihm spiegeln sich die Himmelserscheinungen höherer Kategorie wieder, die periodische Schwankung der Ekliptikschiefe, die oszillierende Schwankung der Exzentrizität der Erdbahn und der Umlauf des Perihels. Die Ungleichheit und die Ungleichmässigkeit dieser periodischen Erscheinungen ist es, die die äusserst komplizierten, aber Schritt für Schritt verfolgbaren Schwankungen der Erdbestrahlung verursachen, die ihrerseits tiefe Spuren im Antlitz der Erde hinterlassen hatten.

Meine ersten Strahlungskurven veranschaulichten den Rhythmus dieser Schwankungen. Sie offenbarten uns, wann sich die Gegenden Europas warmer, wann kühler Sommer erfreuten. Kühle Sommerhalbjahre verschoben die Schneegrenze nach unten, warme nach oben. Aber aus jenen ersten Strahlungskurven war das Ausmass dieser Verschiebungen, also der quantitative klimatische Effekt der Strahlungsschwankungen nicht direkt ablesbar. Es stand deshalb noch die Frage offen, ob der durch die Veränderlichkeit der astronomischen Elemente hervorgerufene Bestrahlungsgang der Erde, an dessen durch die Rechnung sich ergebenden Rhythmus nicht zu zweifeln ist, ausreichend war, um die grossen Klimaschwankungen des Quartärs in ihrem vollen Ausmass zu erklären. Deshalb glaubten manche, dass noch eine weitere kosmische Erscheinung, etwa eine allgemeine Abkühlung der Erde hiez zu erforderlich wäre.

Es war deshalb wünschenswert, meine Berechnungen des säkularen Ganges der Erdbestrahlung durch die Ermittlung der klimatischen Effekte dieses Ganges zu vervollständigen, um zu

sehen wie gross diese Effekte gewesen sind. Einen Schritt in dieser Richtung habe ich bereits in meiner „Mathematischen Klimalehre“ gemacht, aber den entscheidenden erst unlängst vollführt. Dabei ging ich von der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der durch Köppen graphisch veranschaulichten Höhenlage der Schneegrenze in den verschiedenen Breiten und der zugehörigen dem kalorigen Sommerhalbjahr entsprechenden Bestrahlung dieser Breiten. Die mathematische Analyse dieses Zusammenhanges ergab, dass zwischen diesen beiden Erscheinungen ein Korrelationsfaktor von 0,996 besteht. Dieser ausserordentlich hohe Korrelationsfaktor ist der mathematische Beleg dafür, dass die Höhenlage der Schneegrenze eine lineare Funktion der Strahlungsmenge des kalorigen Sommerhalbjahres ist. Daraus folgte ohne Schwierigkeit, dass jeder Veränderung dieser Menge von einer kanonischen Einheit eine Verschiebung der Schneegrenze von einem Meter entspricht.

Ich fand nachträglich, dass dieses Resultat auch aus dem in der „Mathematischen Klimalehre“ abgeleiteten Zusammenhang zwischen Bestrahlung und Temperatur zwangsläufig folgt. Dort habe ich nämlich gezeigt, dass der Aenderung der Strahlungsmenge von einer kanonischen Einheit eine Temperaturänderung von 0,0068 Grad entspricht. Nun ist dieser Dezimalbruch fast ganz genau gleich dem Verhältnis 1 : 150, was zu besagen hat, dass jeder Aenderung der Strahlungsmenge des kalorigen Sommerhalbjahres um 150 Strahlungseinheiten eine Aenderung der mittleren Temperatur dieses Halbjahres von einem Grad entspricht. Die Beobachtungen zeigen, dass man im Sommer um 150 Meter hinaufsteigen muss, um eine um einen Grad tiefere Temperatur anzutreffen. Daraus folgt ebenfalls, dass jeder Aenderung der sommerlichen Strahlungsmenge von einer Strahlungseinheit eine Verschiebung der Schneegrenze von einem Meter entspricht.

Auf Grund dieses Erkenntnisses konnte der klimatische Effekt des vorzeitlichen Ablaufes der Erdbestrahlung, die daraus resultierenden Verschiebungen der Schneegrenze, auf die denkbar einfachste Weise in den Bereich der mathematischen Untersuchungen einbezogen werden: man hatte die in meinen Tabellen mitgeteilten Zahlen, die die Aenderungen der sommerli-

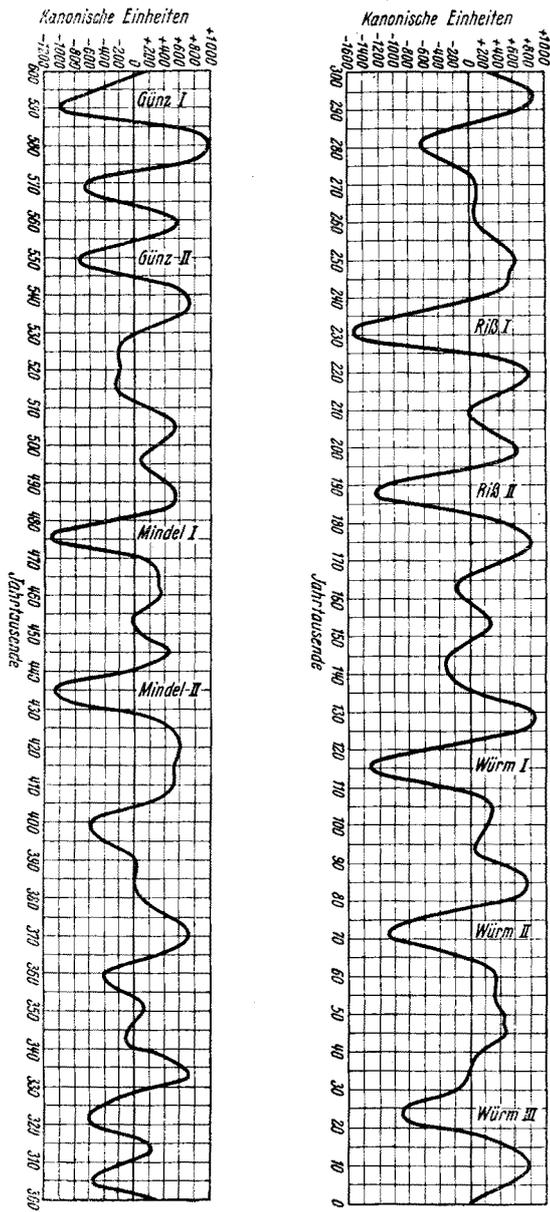


Fig. 4

Säkulärer Gang der sommerlichen Bestrahlung  
 der nördlichen durch den Breitenkreis von 45° begrenzten Kalotte der Erde.

chen Bestrahlung der einzelnen geographischen Breiten in kanonischen Einheiten wiedergeben, einfach als Meter zu deuten, um die zugehörigen Verschiebungen der Schneegrenze zu erhalten. Dabei bedeutet das Vorzeichnen + die Verschiebung der Schneegrenze nach oben, das Zeichnen — die Verschiebung nach unten. Dadurch haben jene Tabellen einen mit der Hand greifbaren klimatischen Inhalt bekommen.

Die derart gedeuteten Tabellen zeigen, dass diese durch die Aenderung der Erdbestrahlung direkt an Ort und Stelle hervorgerufenen, also die als lokale und solare zu bezeichnenden Verschiebungen der Schneegrenze wohl ausreichend gewesen sind, um deutliche Spuren zu hinterlassen, also den säkularen Bestrahlungsgang der Erde auf ihrem Antlitz zu markieren, aber nicht ausreichend gewesen sind, um die grossen Vereisungen der Vorzeit in ihrem vollen Ausmass hervorzurufen. Zu diesem vollen Ausmass der Vereisungen war ein weiterer klimatischer Faktor erforderlich. Um diesen Faktor aus dem säkularen Bestrahlungsgange der Erde herauszuschälen und mathematisch zu erfassen, war noch ein letzter Schritt erforderlich. Dieser Schritt war der folgende.

Sind wir imstande, rechnerisch zu verfolgen, wie sich die Schneegrenze im Laufe der Vorzeit nach oben bzw. nach unten verschoben hatte, so sind wir dadurch in die Lage versetzt, auch jene Veränderungen rechnerisch zu verfolgen, die die polaren Eiskalotten während der Vorzeit erfahren hatten. Diese schneeweissen Polarkappen besitzen ein sehr hohes Reflexionsvermögen und sie weisen deshalb einen namhaften Teil der ihnen zugestrahlten Wärmemengen in den Weltraum zurück, so dass dieser zurückgewiesene Teil im Wärmehaushalt der Erde gar nicht zur Ausnützung gelangt. Durch diesen Verlust wird die wärmespendende Bestrahlung der Erde in Mitleidenschaft gezogen, wodurch weitere, sekundäre Verschiebungen der Schneegrenze hervorgerufen werden. Der ausgezeichnete Klimatologe Walter Wundt hat in seinen Schriften auf diesen Umstand nachdrücklich hingewiesen und gezeigt, dass diese Veränderung des Reflexionsvermögens der Erde von bedeutendem thermischen Effekt begleitet sein müsse. Es handelte sich also darum, diesen Effekt mathematisch zu erfassen und zu beschreiben. Ich bemühte mich bereits in meiner „Mathematischen

Klimalehre“, diesbezügliche Berechnungen aufzustellen, aber ich stiess dabei auf Schwierigkeiten. Diese rührten davon her, dass ich keine zuverlässige numerische Angabe über das Reflexionsvermögen der Schneebedeckungen der Erde besas. Eine erfolgreiche Berechnung wäre ohne eine solche verlässliche Angabe gar nicht möglich gewesen. Da kam mir das mich bisher nicht verlassende Glück zur Hilfe.

Im Sommer des Jahres 1933 erhielt ich aus Paris die Doktorsdissertation eines jungen Meteorologen des Observatoriums des „Pic du Midi“, des Herrn Joseph Devaux. Aus dieser Arbeit, die den Titel trug „L'économie radio-thermique de champs de neige et des glaciers“ ging hervor, dass Herr Devaux durch mustergültige wissenschaftliche Forschung in der schneebedeckten Umgebung seines Observatoriums, an den Gletschern der Pyrenen und der Alpen, ja selbst jenen von Grönland das Reflexionsvermögen der Schneebedeckungen der Erde auf das gründlichste erforscht und durch zuverlässige numerische Angaben zum Ausdruck gebracht hat. In seiner Abhandlung, die er mir als dem Verfasser der „Théorie mathématique“ und der „Mathematischen Klimalehre“ überreicht hatte, fand ich alle Angaben, die ich noch zur Durchführung meiner Rechnungen brauchte.

Ich setzte mich sofort an die Arbeit, deren Ergebnisse in den „Astronomischen Mitteln zur Erforschung der erdgeschichtlichen Klimate“ nun vorliegen. Daraus wird man ersehen, dass der mit Berücksichtigung des veränderlichen Reflexionsvermögens der Erde berechnete vorzeitliche Gang der Erdbestrahlung vollkommen ausreicht, um auch die grossen klimatischen Aenderungen des Quartärs in ihrem vollen Umfang zu erklären. Dies folgt augenscheinlich aus dem in der Fig. 4 dargestellten Strahlungsdiagramm, durch welches der säkulare Gang der sommerlichen Bestrahlung der nördlichen durch den Breitenkreis von  $45^{\circ}$  begrenzten Kalotte der Erde dargestellt erscheint. Weil, wie vorstehend angegeben, jeder Aenderung der sommerlichen Bestrahlung um eine kanonische Strahlungseinheit eine Verschiebung der Schneegrenze von einem Meter entspricht, so folgt aus diesem Diagramm, dass die durch den säkularen Bestrahlungsgang der erwähnten Kalotte der Erde hervorgerufene Verschiebung der Schneegrenze das Ausmass von 1500 Meter

erreicht hat. Die abkühlende Wirkung der zeitweilig verbreiterten Eiskalotten der Erde gesellte sich als sekundärer Effekt dem säkularen Gange der Erdbestrahlung hinzu, ja sie war durch diesen Gang hervorgerufen. Deshalb weisen die neuen, mit Berücksichtigung dieses Effektes ermittelten Strahlungskurven denselben Rhythmus wie die früher berechneten auf, und unterscheiden sich nur durch ihre grösseren Amplituden. Aus diesem Grund hat der bisher benützte Kalender des Eiszeitalters auch weiterhin seine Gültigkeit behalten, nur sind jetzt die grossen klimatischen Ereignisse der Vorzeit in diesem Kalender gewissermassen rot unterstrichen.

Durch meine soeben fertiggedruckte Veröffentlichung, in der, wie bereits erwähnt, auch das Polverlagerungsproblem seine ausführliche Behandlung fand, auf die ich aber hier nicht eingehen kann, betrachte ich meine fünfundzwanzigjährige wissenschaftliche Arbeit auf diesem Gebiete als abgeschlossen.

---