

## 6.

**Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. — Mathematische Theorie der durch die Sonnenstrahlung verursachten Wärmeerscheinungen.**

Herausgegeben von der Südslawischen Akademie der Wissenschaften und Künste in Zagreb und dem Unterrichtsministerium des Königreiches der Serben, Kroaten und Slovenen. Paris, Gauthier-Villars und Cie 1920. 8° (XVI + 340 Seiten). Selbstanzeige.

Napisao — Von

Dr. M. Milankovitch,

o. ö. Professor an der Universität in Belgrad.

Das Werk stellt sich zur Aufgabe, auf Grund physikalischer Gesetze, mit Vermeidung empirischer Arbeitsmethoden den mathematischen Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und dem Temperaturzustand der Planeten abzuleiten, um die erhaltenen Resultate auf Probleme der kosmischen Physik anzuwenden.

Der Bestrahlungszustand der Planeten ist periodischen und säkularen Änderungen unterworfen. Zu den ersteren gehört der tägliche und der jährliche Gang der Bestrahlung, zu den letzteren die langsam verlaufenden Variationen dieser Gänge, verursacht durch die säkularen Änderungen der Bahn- und Rotationselemente der Planeten. Alle diese Vorgänge, welche durch die Bewegung der Himmelskörper verursacht werden, sind einer exakten mathematischen Beschreibung zugänglich, weil diese Bewegungen sich nach bekannten mathematischen Gesetzen vollziehen. Bedeutend schwieriger ist die Beschreibung der thermischen Erscheinungen, welche an den Oberflächen der Planeten durch die oben erwähnten Vorgänge hervorgerufen werden, besonders wenn der Einfluß der Atmosphären berücksichtigt werden soll. In diesem Falle müssen hinsichtlich des Zustandes der Planeten und ihrer Atmosphären gewisse vereinfachende Annahmen gemacht werden, über welche später noch ausführlicher berichtet werden soll. Trotz dieser Annahmen offenbart die auf diese Weise entwickelte Theorie die charakteristischen Linien des klimatischen Bildes jener Planeten, deren Inneres keinen bemerkbaren Einfluß auf die Temperatur der Oberfläche mehr ausübt.



Das Werk gliedert sich, wie aus nachstehender Zusammenstellung ersichtlich ist, in zwei Teile; der erste umfaßt die Theorie, der zweite die Anwendung. Diese Einteilung hat den Zweck, den Nichtmathematikern, namentlich den Meteorologen die Ergebnisse des Werkes in übersichtlicher Form darzubieten.

## Erster Teil.

### Theorie.

#### Kapitel I.

Die Bestrahlung der Planeten durch die Sonne ohne Berücksichtigung des Einflusses der Atmosphären.

1. Einleitung — Die Solarkonstante. — 2. Rekapitulation einiger Begriffe und Sätze der sphärischen Astronomie. — 3. Die Bestrahlung der Planetoberfläche in einem gegebenen Zeitpunkte. — 4. Der tägliche Gang der Bestrahlungen und die tägliche Strahlungsmenge. — 5. Die Diskontinuität des Bestrahlungsganges und deren Elimination. — 6. Reihenentwicklungen. — 7. Der jährliche Gang der Bestrahlung. — 8. Die Quantität der Bestrahlung während eines beliebigen Zeitabschnittes des Jahres. — 9. Die Quantitäten der Bestrahlung während der astronomischen Jahreszeiten. — 10. Die den beiden Hemisphären während eines beliebigen Intervalles des Jahres zugestrahlten Quantitäten. — 11. Die ungleiche Dauer der astronomischen Jahreszeiten. — 12. Die säkularen Änderungen der Bahn- und Rotationselemente der Planeten. — 13. Die säkularen Änderungen der Bestrahlung der Planeten.

Nach den uns zur Verfügung stehenden Erfahrungen kann angenommen werden, daß die Ergiebigkeit der Sonnenstrahlung, abgesehen von kurzperiodischen Schwankungen, keinen nachweisbaren zeitlichen Änderungen unterworfen ist und daß die Intensität der Sonnenstrahlung, gemessen in der mittleren Entfernung der Erde von der Sonne, eine konstante Größe ist (Solarkonstante). Infolgedessen wird die Beschreibung der Verteilung der Sonnenstrahlung auf den Oberflächen der Planeten, wenn man von deren Atmosphären absieht, zu einem einfachen geometrischen Problem. Auch die zeitlichen Änderungen dieser Verteilung hervorgerufen durch die Rotation der Planeten, d. h. der tägliche Gang der Bestrahlung, sind

leicht zu verfolgen, und die tägliche Strahlungsmenge, welche einem beliebigen Elemente der Planetoberfläche zugestrahlt wird, ohne Schwierigkeit zu bestimmen. Einigen Schwierigkeiten begegnet man erst bei der Beschreibung des jährlichen Bestrahlungsganges. Nachdem mit jedem Untergang der Sonne unter den Horizont der in Betracht gezogenen Stelle der Planetoberfläche die Bestrahlung dieser Stelle gleich Null wird, und da diese denselben Wert bis zum nächsten Sonnenaufgang behält, so ist der jährliche Gang der Bestrahlung einer gegebenen Stelle der Planetoberfläche eine diskontinuierliche Funktion. Diese Diskontinuität kann durch die Einführung der mittleren Bestrahlung der Breitenkreise eliminiert werden; in dem Werke wird darauf ausführlicher eingegangen um einige Irrtümer zu beseitigen, welche in der Theorie platzgegriffen haben. Zur Bestimmung der Quantitäten der Sonnenstrahlung, welche innerhalb beliebiger Teilintervalle des Jahres den einzelnen Breiten zugestrahlt werden, hat Wiener seinerzeit Legendre'sche elliptische Funktionen und Hargreaves harmonische Funktionen benützt. Im vorliegenden Werke wird keine dieser beiden Methoden benützt, weil es von Vorteil ist, den Ausdrücken für den jährlichen Gang der Bestrahlung solche Form zu geben, welche sich für die Bestimmung der säkularen Änderungen dieses Ganges eignet und welche auch für den später abzuleitenden Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und dem Temperaturzustand des Planeten verwendet werden kann. Aus diesem Grunde wird der jährliche Gang durch rasch konvergierende trigonometrische Reihen dargestellt, aus welchen alle wichtigen Eigenschaften dieses Ganges ersehen werden können. Dann werden die säkularen Änderungen der Bestrahlung der Planeten, hervorgerufen durch die säkularen Variationen der Bahn- und Rotationselemente, eingehend untersucht und es werden Methoden angegeben, wie dieselben berechnet werden können.

#### Kapitel II.

Die Bestrahlung der Planeten durch die Sonne mit Berücksichtigung des Einflusses der Atmosphären.

14. Grundtatsachen. — 15. Das Bouguer-Lambert'sche Gesetz. — 16. Die auf die Planetoberfläche auffallende direkte Sonnenstrahlung bei wolkenlosem Himmel. — 17. Die von der Planetoberfläche absorbierte direkte und diffuse Sonnenstrahlung. —

18. Die säkularen Änderungen der Bestrahlung der Planetoberflächen. — 19. Die säkularen Änderungen der Bestrahlung, dargestellt durch fiktive Breiteschwankungen. — 20. Über die Konstitution der Planetatmosphären. — 21. Das Beer'sche Gesetz und seine Folgerungen.

In diesem Kapitel werden die im ersten Kapitel erörterten Fragen von dem Standpunkte behandelt, daß auf die Beeinflussung der Sonnenstrahlung durch die Atmosphäre der Planeten Rücksicht genommen werden soll. Diese Beeinflussung wird mathematisch durch die Gesetze von Bouguer-Lambert, und von Beer zum Ausdruck gebracht, nach welchen die Schwächung der Sonnenstrahlung durch Absorption und Dispersion der Intensität der Sonnenstrahlung, dem zurückgelegten Weg und der Dichte der in der Atmosphärenschicht enthaltenen absorbierenden Gase direkt proportional ist. Unter Zugrundelegung dieser Gesetze, welche ursprünglich nur für das Sonnenlicht aufgestellt worden sind, welche aber auf die gesamte Sonnenstrahlung erstreckt werden können, bietet die mathematische Beschreibung des Einflusses der Atmosphären auf die Bestrahlung der Planeten durch die Sonne keine prinzipielle Schwierigkeiten und nur die numerische Auswertung dieses Einflusses wird komplizierter, indem meist zu mechanischen Quadraturen gegriffen werden muß.

### Kapitel III.

Der Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und Temperaturzustand der Planeten ohne Berücksichtigung des Einflusses der Atmosphären.

22. Die Temperaturen der Planetoberfläche im stationären Bestrahlungszustand. — 23. Die Differentialgleichung der Wärmeleitung im Boden. — 24. Die Temperaturen der festen Planetoberfläche, wenn die Bestrahlung eine einfache trigonometrische Funktion der Zeit ist. — 25. Die Temperaturen der festen Planetoberfläche, wenn die Bestrahlung eine beliebige periodische Funktion der Zeit ist. — 26. Die Fortpflanzung der Temperaturwellen im Boden. — 27. Die Darstellung des täglichen Bestrahlungsganges durch Fourier'sche Reihen. — 28. Die Darstellung des jährlichen Bestrahlungsganges durch Fourier'sche Reihen. — 29. Der Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und dem Temperaturzustand der Wasserbedeckungen

des Planeten. — 30. Einige spezielle Fälle zum vorstehenden Paragraphen. — 31. Der Einfluß der Rotationsdauer des Planeten auf dessen Temperaturzustand.

Wird von dem Einfluß der Atmosphären abgesehen, so ist der Temperaturzustand der Planetoberfläche das Endergebnis folgender drei Wirkungen: der Bestrahlung der Planetoberfläche durch die Sonne, der Wärmeleitung im Boden und der Ausstrahlung der Planetoberfläche. Dadurch werden der Planetoberfläche gewisse Wärmemengen zu- bzw. abgeführt und es ist dabei die durch die Leitung der Planetoberfläche zugeführte Wärmemenge eine Funktion des Temperaturzustandes im Boden und jene durch Ausstrahlung von der Planetoberfläche abgeführte eine Funktion der Temperatur der Planetoberfläche. Auf der Planetoberfläche wird sich in jedem Moment jene Temperatur einstellen, bei welcher die gesamte Wärmezufuhr gleich der Wärmeabfuhr ist. Die Wärmezufuhr durch die Sonnenstrahlung ist im ersten Kapitel ausführlich behandelt worden; die Wärmezufuhr durch Leitung im Boden gehorcht den Gesetzen der mathematisch bereits sehr ausgebildeten Fourier'schen Theorie der Wärmeleitung, während uns zur Bestimmung der Wärmeabfuhr durch Ausstrahlung die verschiedenen theoretisch oder empirisch begründeten Strahlungsgesetze zur Verfügung stehen. Im vorliegenden Werke wird nur von dem Stefan-Boltzmann'schen Austrahlungsgesetz Gebrauch gemacht, welches zwar nur für vollkommen schwarze Körper streng richtig ist, und für andere Körper, in nicht ganz einwandfreier Weise, mit dem Kirchoff'schen Gesetz kombiniert werden muß, welches aber gerade durch seine Anwendungen sich in diesem Werke als ein Naturgesetz von weittragender Bedeutung erwies. So sind die Grundlagen gegeben, um die durch die Sonnenstrahlung hervorgerufenen thermischen Erscheinungen auf der festen Oberfläche der Planeten mathematisch zu verfolgen. In diesem Kapitel ist auch der Versuch gemacht worden, den Temperaturzustand der Wasserbedeckungen in den Bereich der Untersuchungen zu ziehen und es konnte, trotz einschränkender Annahmen, der Mechanismus der Erscheinung mathematisch erfaßt werden. Den Schluß des Kapitels bildet eine beachtenswerte Folgerung aus dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz, daß die mittlere Temperatur der Planetoberfläche auch eine Funktion der Rotationsgeschwindigkeit des Planeten ist und mit abnehmender Geschwin-

### Kapitel IV.

Der Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und dem Temperaturzustand der Planeten mit Berücksichtigung des Einflusses der Atmosphären.

32. Eine Bedingungsgleichung zwischen der Ausstrahlung der Planetoberfläche und der Gegenstrahlung der Planetatmosphäre. — 33. Der Einfluß einer Atmosphärenschicht geringer Mächtigkeit auf den Temperaturzustand des Planeten. — 34. Einige spezielle Fälle zum vorstehenden Paragraphen. — 35. Die Differentialgleichungen der Strahlungsvorgänge in den Atmosphären der Planeten. — 36. Die Integration der Differentialgleichungen des § 35 für den Fall des stationären Bestrahlungszustandes. — 37. Einige spezielle Fälle zum vorstehenden Paragraphen. — 38. Die Integration der Differentialgleichungen des § 35 für den Fall des variablen Bestrahlungszustandes. — 39. Das Gesetz der Dichte- und Temperaturabnahme der Atmosphäre im Strahlungsgleichgewicht. — 40. Die thermodynamischen Vorgänge in den Planetatmosphären.

In diesem Kapitel wird der Einfluß der Atmosphären auf den Temperaturzustand der Planeten untersucht und es werden auch die thermischen Erscheinungen in den Atmosphären selbst in den Bereich der Untersuchungen einbezogen. Um alle diese Vorgänge mathematisch erfassen zu können, müssen gewisse vereinfachende Annahmen gemacht werden. So wird vor allem angenommen, daß die Temperatur des in Betracht gezogenen Teiles der Atmosphäre in einem gegebenen Moment nur eine Funktion der Höhe über der Planetoberfläche ist, d. h. es wird vorausgesetzt, daß — nachdem auf die Krümmung der Planetoberfläche für diesen Teil der Atmosphäre keine Rücksicht genommen werden muß — die Atmosphäre aus unendlich dünnen ebenen Schichten gebildet ist, deren jede, in ihrer ganzen Ausdehnung, homogen und isotherm ist. Die Ausstrahlung jeder dieser Schichten durch ihre beiden Begrenzungsflächen gehorcht dem kombinierten Kirchhoff-Stefan'schen Gesetz, d. h. sie ist proportional dem Absorptionsvermögen der Schicht für die dunklen Strahlungen und der vierten Potenz ihrer absoluten Temperatur. Jeder Schicht wird jene Temperatur zuge-

und zwar so, daß der Überschuß der Einstrahlung nur zur Temperaturerhöhung der Schicht benutzt wird und keine mechanische Arbeit zu leisten hat. Die dynamischen Vorgänge werden also nicht berücksichtigt und erst am Ende des Kapitels in den Bereich der Untersuchungen gezogen. Unter diesen Voraussetzungen zeigt es sich, daß im Falle eines stationären Bestrahlungszustandes der Verlauf der Temperaturabnahme in der Atmosphäre mit der Höhe wesentlich davon abhängt, wie viel verschiedene absorbierende Gase die Atmosphäre enthält. Weist diese nur ein einziges Gas auf, welches die dunkle Ausstrahlung der Planetoberfläche nennenswert absorbiert, so nimmt die Temperatur mit der Höhe ständig ab und nähert sich asymptotisch einem Grenzwerte, welcher von der Intensität der Sonnenstrahlung und den Absorptionseigenschaften der Atmosphäre abhängt. Enthält die Atmosphäre mehrere stark absorbierende Gase, so ist der Verlauf der Temperaturabnahme ein ganz verschiedener und es können die Minimalwerte der Temperatur schon in endlichen Höhen auftreten, so daß an diesen Stellen sich Temperaturinversionen ausbilden. Ein variabler Bestrahlungszustand ruft naturgemäß einen variablen Temperaturzustand auf der Planetoberfläche und in der Atmosphäre hervor, und wenn der Bestrahlungszustand einen oszillatorischen Charakter aufweist, wie dies in der Natur tatsächlich der Fall ist, so pflanzen sich die Temperaturoszillationen von der Planetoberfläche aus in die Höhe unter Beibehaltung der Periode, aber mit abnehmender Amplitude. Es ist dies eine ähnliche Erscheinung der Fortpflanzung der Temperaturwellen im Boden, welche im vorigen Kapitel behandelt wurde, nur sind im vorliegenden Falle die Ausdrücke für diese Fortpflanzung bedeutend komplizierter.

## Zweiter Teil.

### Anwendungen.

#### Kapitel I.

Der Bestrahlungszustand und das mathematische Klima der Erde.

41. Definition des mathematischen Klimas. — 42. Die Solar-konstante und die mittleren Transmissionsverhältnisse der Erdatmosphäre. — 43. Die täglichen Strahlungsmengen. — 44. Über-

titäten der Bestrahlung während beliebiger Teilintervalle des Jahres. — 46. Das Klima der Erde bei Abwesenheit der Atmosphäre. — 47. Die Glashauswirkung der Erdatmosphäre. — 48. Die mittleren jährlichen Temperaturen der Breitenkreise bei ruhender Atmosphäre. — 49. Der vertikale Aufbau einer im Strahlungsgleichgewicht sich befindlichen trockenen Luftatmosphäre. — 50. Zur Frage der oberen Temperaturinversion in der Atmosphäre. — 51. Die vertikale Fortpflanzung der Temperaturoszillationen in ruhender Atmosphäre.

In diesem Kapitel wird der gegenwärtige Bestrahlungszustand der Erde, sein täglicher und jährlicher Verlauf mathematisch beschrieben; um dann aus demselben das mathematische Klima der Erde abzuleiten, d. h. jenes Klima, welches den Voraussetzungen der in dem Werke niedergelegten Theorie entspricht. Der Bestrahlungszustand der Erde, mit und ohne Berücksichtigung der Atmosphäre, ist schon durch Wiener bzw. durch Angot mathematisch beschrieben worden, und so mußten ihre Angaben nur vervollständigt werden; sie wurden auch durch graphische Darstellungen veranschaulicht. Für den weiteren Schritt, d. h. für die Ableitung des Temperaturzustandes der Erde aus deren Bestrahlungszustand, ist die Kenntnis des numerischen Wertes der Solarkonstante von ausschlaggebender Bedeutung und es ist ein für das Zustandekommen dieses Werkes besonders glückliches Zusammentreffen, daß Abbot und Fowle von der Smithsonian Institution zu Washington ihre diesbezügliche zehnjährige Arbeit im Jahre 1912 beendigten und deren Resultate im Jahre 1913 veröffentlichten. Der von ihnen gefundene Wert von 1.932 Gramm-Kalorien pro  $\text{cm}^2$  und Minute, welchen der Verfasser auf 2 Gramm-Kalorien abgerundet hat, kann als die erste verlässliche Bestimmung dieser für den theoretischen Aufbau der Klimatologie und Meteorologie so wichtigen Zahl bezeichnet werden. Mit den früher von anderen Forschern angegebenen Werten wäre der Versuch des Verfassers, die thermischen Erscheinungen in der Atmosphäre auf rein theoretischem Wege abzuleiten und numerisch zum Ausdruck zu bringen, gewiß gescheitert. Mit den von Abbot und Fowle gefundenem Wert hingegen ergab die in dem Werke niedergelegte Theorie günstige Resultate, welche den Verfasser zur Behauptung ermächtigten, daß, wenn man den Erdball selbst als einen riesigen Pyrheliometer auffasse, aus dessen Temperaturzustand der obige numerische Wert der Solarkonstante

Transmissionskoeffizienten der Erdatmosphäre erwiesen sich ebenfalls als sehr zutreffend. So waren also verlässliche numerische Angaben über die Intensität der Sonnenstrahlung und über die Transmissionsverhältnisse der Atmosphäre gewonnen, um mit Hilfe derselben ein Bild des mathematischen Klimas zu entwerfen.

Den im theoretischen Teil klar vorgezeichneten induktiven Weg folgend, wurde zuerst der thermische Zustand der Erde beschrieben, welcher auf derselben sich einstellen würde, wenn sie von keiner Atmosphäre umgeben wäre und überall eine feste Oberfläche hätte. In diesem Falle würde diese Oberfläche eine mittlere Temperatur aufweisen, welche nur um fünf Celsiusgrade tiefer wäre als die beobachtete. Dieser Wert bringt die sogenannte Glashauswirkung der Erdatmosphäre numerisch zum Ausdruck, welche viel geringer ist als früher angenommen wurde. Die Ursache dieser Erscheinung ist dem Umstande zuzuschreiben, daß die Erdatmosphäre mit ihren Wolken ein sehr hohes Reflexionsvermögen besitzt, so daß von der auffallenden Sonnenstrahlung volle 40 Prozent durch Reflexion an den Wolken, an den Molekülen der Atmosphäre und der Erdoberfläche selbst, unbenutzt für den Wärmehaushalt der Erde in den Weltraum zurückwandern. Es wird auch gezeigt, daß bei Abwesenheit der Atmosphäre die täglichen und die jährlichen Temperaturoszillationen auf der Erdoberfläche viel größer sein würden; so würde beispielsweise die mittlere tägliche Schwankung am Äquator volle 64 Celsiusgrade betragen.

Wird der Einfluß der Atmosphäre berücksichtigt, so erhält man mit Anwendung der in dem Werke niedergelegten Theorie die folgenden mittleren jährlichen Temperaturen der Breitenkreise:

Geogr. Breite	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Temperatur	+ 32.8	+ 31.6	+ 28.2	+ 22.1	+ 13.7	+ 2.6	- 10.9	- 24.1	- 32.0	- 34.8

Diese Temperaturen unterscheiden sich von den beobachteten dadurch, daß sie für die niederen Breiten etwas höher und für die höheren Breiten etwas niedriger als die beobachteten sind. Die Ursache dieser Erscheinung ist vornehmlich in dem Umstande zu erblicken, daß die Theorie die dynamischen Vorgänge, d. h. die

mungen mindern die Gegensätze zwischen den tropischen und polaren Regionen ab, und streben einen Temperaturlausgleich an. Es ist klar, daß dieselben den mittleren Temperaturzustand der ganzen Erdoberfläche und Atmosphäre nur unwesentlich beeinflussen können und ihre Wirkung wird größtenteils eliminiert, wenn man nur die mittlere Temperatur der ganzen Erdoberfläche und der anliegenden Atmosphärenschicht in Betracht zieht. Tut man dies, so findet man zwischen den errechneten und beobachteten Werten einen Unterschied von nur  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

Im vorliegenden Kapitel wird auch der vertikale Aufbau der Erdatmosphäre einer eingehenden theoretischen Untersuchung unterzogen. Zuerst wird der vertikale Aufbau einer trockenen im Strahlungsgleichgewicht sich befindlichen Luftatmosphäre beschrieben und es werden dann die Ergebnisse der Theorie mit den Beobachtungen verglichen. Dieser Vergleich zeigt deutlich, daß die Strahlungsvorgänge die ausschlaggebenden Faktoren für diesen Aufbau sind, und daß die bisher benützte Theorie, welche diesen Aufbau durch adiabatische Zustandsänderungen trockener oder feuchter Luft zu erklären trachtet, nur eine sekundäre Erscheinung erfaßt hat. Noch deutlicher zeigt sich die vorherrschende Rolle der Strahlungserscheinungen im vertikalen Aufbau der Erdatmosphäre dadurch, daß die in dem Werke niedergelegte Strahlungstheorie in der Lage ist, zwei erst unlängst beobachtete überraschende Erscheinungen der Erdatmosphäre zu erklären und quantitativ zu beschreiben.

Die erste dieser Erscheinungen ist die sogenannte obere Temperaturinversion in der Atmosphäre, d. h. die Tatsache, daß die mittlere Lufttemperatur mit der Höhe nicht unbegrenzt abnimmt, sondern beim elften Kilometer einer Temperaturinversion Platz macht. Aus der im ersten Teile entwickelten Theorie folgt nicht nur unzweideutig, daß eine solche Inversion in der Erdatmosphäre infolge des Vorhandenseins des atmosphärischen Wasserdampfes und der Kohlensäure, sich einstellen muß, sondern die numerischen Werte der Absorptionsvermögen dieser zwei Gase ergeben noch, daß diese Inversion in einer Höhe von 10.530 Meter stattfinden soll. Dieser, auf rein theoretischem Wege gefundene Wert stimmt also mit dem beobachteten Werte auf das beste überein.

Die zweite der erwähnten Erscheinungen ist die Fortpflanzung der jährlichen Temperaturoszillationen von der Erdoberfläche aus vertikal in die Höhe. Anlässlich der erst in neuester Zeit stattgefundenen empirischen Konstatierung dieser Erscheinung überraschte

die Tatsache, daß die jährlichen Temperaturoszillationen, namentlich in großen Höhen, nur ganz wenig abgeschwächt werden. Diese Tatsache folgt zwanglos aus der Theorie der Strahlungsvorgänge in der Erdatmosphäre, welche unter Zugrundelegung der mittleren Transmissionsverhältnisse die folgende Abschwächung und Verspätung der jährlichen Temperaturoszillationen in verschiedenen Höhen liefert.

Höhe in Metern	500	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000
Amplitude der jährl. Temperaturschwankung in Prozenten der Amplitude über den Boden	95	85	76	70	68	66
Verspätung in Tagen hinter der Oszillation über dem Boden	3	9	16	20	22	23

Die Erforschung des Mechanismus der Strahlungsvorgänge in der Atmosphäre war indessen nur eines der Ziele im vorliegenden Werke. Das zweite, vielleicht wichtigere Ziel war, die Grundlagen für eine Theorie zu sammeln und zu schaffen, durch welche man die Grenzen unserer direkten Beobachtungen räumlich und zeitlich überschreiten könnte. Räumlich, indem man die thermischen Erscheinungen auch dort zu verfolgen in der Lage wäre, wohin man mit den Meßinstrumenten nicht gelangen kann, d. h. in den höheren Regionen unserer Atmosphäre und an den Oberflächen der übrigen Mitglieder unseres Sonnensystems; zeitlich durch das Studium des Klimas der geologischen Vergangenheit. So war es möglich, die folgenden zwei Kapitel diesen Fragen zu widmen.

## Kapitel II.

Die säkularen Änderungen der Erdbestahlung und das paläoklimale Problem.

52. Die säkularen Änderungen der Bahn- und Rotationselemente der Erde. — 53. Hilfstabellen zur Berechnung der säkularen Änderungen der Erdbestahlung. — 54. Der säkulare Gang der Erdbestahlung. — 55. Numerische Beispiele zum vorstehenden Paragraphen. — 56. Die astronomischen Theorien der Eiszeiten.

solare Klima der extremen Bestrahlungszustände der Erde. — 59. Die Möglichkeit weiterer Änderungen der astronomischen Elemente. — Polverlagerungen. — 60. Über noch einige Ursachen der Veränderlichkeit des Erdklimas. — 61. Das paläoklimale Problem.

Zur Berechnung der säkularen Änderungen der Bahn- und Rotationselemente der Erde stehen uns gegenwärtig die von Stockwell aufgestellten Formeln zur Verfügung, deren Revision mit Berücksichtigung der Fortschritte der Relativitätstheorie jedoch notwendig erscheint. Für den säkularen Bestrahlungsgang der Erde kommen davon nur die säkularen Änderungen der Exzentrizität der Erdbahn, der Schiefe der Ekliptik und der Länge des Perihels, bezogen auf den jeweiligen Frühlingspunkt, in Betracht. Pilgrim hat für einen Zeitraum von über einer Million Jahre die Änderungen dieser drei Elemente berechnet; im vorliegenden Kapitel wird ein Teil seiner Resultate wiedergegeben und zwar für das Zeitintervall von dem 500. Jahrtausend vor dem Jahre 1850 bis zum

Geogr. Breite	Ein Zuwachs der Ekliptikschiefe von einem Grad verursacht folgende prozentuelle Änderungen der Größen		
	$W_e$	$W_h$	$W_T$
0°	— 0·35	— 0·35	— 0·35
5°	— 0·20	— 0·52	— 0·35
10°	— 0·04	— 0·69	— 0·34
15°	+ 0·11	— 0·87	— 0·33
20°	+ 0·26	— 1·07	— 0·30
25°	+ 0·42	— 1·29	— 0·27
30°	+ 0·59	— 1·54	— 0·22
35°	+ 0·76	— 1·83	— 0·16
40°	+ 0·96	— 2·17	— 0·08
45°	+ 1·17	— 2·60	+ 0·03
50°	+ 1·41	— 3·14	+ 0·19
55°	+ 1·69	— 3·84	+ 0·42
60°	+ 2·04	— 4·78	+ 0·78
65°	+ 2·51	— 5·77	+ 1·39
70°	+ 3·18	— 4·62	+ 2·49
75°	+ 3·57	— 4·31	+ 3·17
90°	+ 4·02	0·00	+ 4·02

40. Jahrtausend nach diesem Jahre. Diesen Angaben folgt eine Reihe von Hilfstabellen, welche zur Berechnung der säkularen

die vorstehende als die wichtigste eingeschaltet, welche die prozentuellen Änderungen der jahreszeitlichen Strahlungsmengen bei einem Zuwachs der Ekliptikschiefe von einem Grad zum Ausdruck bringt.

Mit dieser Tabelle wurde zum ersten Male bewiesen, daß an den höheren geographischen Breiten, welche gerade für das Eiszeitproblem in Frage kommen, mit den Änderungen der Ekliptikschiefe dieselben klimatischen Effekte zu erzielen sind, wie mit den übrigen zwei variablen astronomischen Elementen, daß also an diesen Breiten der Einfluß aller drei erwähneter astronomischer Elemente in Betracht gezogen werden muß.

Die hier in Betracht gezogenen jahreszeitlichen Strahlungsmengen sind die folgenden: die Strahlungsmenge  $W_e$ , welche verschiedenen Breitenkreisen im Laufe des Sommerhalbjahres (vom Frühlings-Äquinoktium bis zum Herbst-Äquinoktium) zugestrahlt wird, die Strahlungsmenge  $W_h$ , welche auf das Winterhalbjahr d. h. auf den Rest des Jahres sich bezieht, und endlich die Strahlungsmenge  $W_T$ , welche im Laufe des ganzen Jahres den verschiedenen Breiten zugestrahlt wird. Diese Strahlungsmengen werden durch die Änderungen der Schiefe der Ekliptik stark beeinflusst, durch die Änderungen der Länge des Perihels gar nicht, und durch die Änderungen der Exzentrizität der Erdbahn nur unmerklich berührt. Die Änderungen dieser zwei letzteren astronomischen Elemente haben dagegen einen namhaften Einfluß auf die Längen  $T_e$  und  $T_h$  der Zeitintervalle, während welcher die obigen Mengen  $W_e$  und  $W_h$  zugestrahlt werden, d. h. auf die Länge der Sommer- bzw. Winterhalbjahres, welche Größen auch säkular veränderlich sind. Verfolgt man die säkularen Änderungen aller dieser fünf Größen  $W_e$ ,  $W_h$ ,  $W_T$ ,  $T_e$  und  $T_h$  für verschiedene Breitenkreise, so erhält man ein erstes deutliches Bild des säkularen Ganges der Erdbestrahlung, welches hier in aller Kürze skizziert werden soll.

Die Schiefe der Ekliptik oszilliert ziemlich regelmäßig mit einer Amplitude von rund einem Grad um ihren gegenwärtigen Wert, und mit einer Periode von 40·4 Jahrtausenden. Der Einfluß dieser Oszillationen auf die Erdbestrahlung ist aus der obigen Tabelle ersichtlich. Eine Zunahme der Ekliptikschiefe vermindert die jährlichen Strahlungsmengen  $W_T$  der tropischen Regionen und vergrößert jene der polaren Regionen, mit einem Worte: eine Zunahme der Ekliptikschiefe mindert die geographischen Gegensätze zwischen dem Äquator und den Polen herab. Eine Verminderung

Eine Zunahme der Ekliptikschiefe hat aber außerdem noch folgende Änderungen der Erdbestrahlung zur Folge. Sehen wir von der äquatorialen Zone zwischen dem zehnten nördlichen und dem zehnten südlichen Breitenkreis ab, in welcher Zone die vier Jahreszeiten gar nicht ausgebildet sind, so verursacht eine Zunahme der Ekliptikschiefe sonst überall auf der Erde eine Zunahme der sommerlichen Strahlungsmenge  $W_s$  und eine Abnahme der winterlichen  $W_w$ . Anders gesprochen, die Zunahme der Ekliptikschiefe verschärft die Gegensätze zwischen Sommer und Winter, während diese Gegensätze durch eine Abnahme der Ekliptikschiefe abgemildert werden. Zusammenfassend kann man sagen, daß eine Zunahme der Ekliptikschiefe die geographischen Gegensätze der Erdbestrahlung abmildert und die jahreszeitlichen Gegensätze verschärft. Diese Abmilderung und Verschärfung macht sich auf beiden Hemisphären in gleichem Maße und im gleichen Sinne geltend.

In einer Hinsicht ähnlich, in anderer aber verschieden macht sich der Einfluß der Exzentrizität der Erdbahn und der Länge des Perihels auf den Gang der Erdbestrahlung geltend. Die Länge des Perihels nimmt, ziemlich regelmäßig anwachsend, alle 20·7 Jahrtausende um  $360^\circ$  zu. Hat diese Größe den Wert von  $90^\circ$  erreicht, so steht die Äquinoktiallinie senkrecht auf der großen Achse der scheinbaren Sonnenbahn, und das Sommerhalbjahr der nördlichen Hemisphäre hat auf Kosten des Winterhalbjahres seine maximale Länge erreicht. Ist die Länge des Perihels auf  $270^\circ$  angewachsen, so ist wieder das nördliche Winterhalbjahr bis zu einem Maximum angewachsen. Auf der südlichen Hemisphäre liegen die Verhältnisse umgekehrt. Durch die Änderungen der Länge des Perihels wechseln also alle zehn Jahrtausende auf jeder Hemisphäre längste Sommerhalbjahre mit den kürzesten ab, und zwar so, daß wenn die nördliche Hemisphäre das längste Sommerhalbjahr hat, die südliche das kürzeste aufweist. Eine Zunahme der Exzentrizität der Erdbahn verschärft diese Oszillationen in der Dauer der Jahreszeiten.

Im säkularen Gange der Erdbestrahlung machen sich die Änderungen der Dauer der Jahreszeiten nun folgendermaßen geltend.

Wenn die Dauer des nördlichen Sommerhalbjahres im Wachsen begriffen ist, so wird die sommerliche Strahlungsmenge, welche durch die Exzentrizität der Erdbahn und die Länge des Perihels nicht beeinflusst wird, in länger und länger werdenden Zeitintervallen den Breitenkreisen der Nordhemisphäre zugestrahlt, d. h. die

Jahr zu Jahr schwächer; die mittlere winterliche Bestrahlung wird dagegen, wie leicht einzusehen, von Jahr zu Jahr intensiver. Mit einem Worte, die jahreszeitlichen Gegensätze mindern sich ab. Dies gilt aber nur für die nördliche Hemisphäre. Das Sommerhalbjahr der südlichen Hemisphäre koinzidiert mit dem Winterhalbjahr der nördlichen, wird also in diesem Stadium immer kürzer und kürzer, d. h. die sommerliche Bestrahlung wird immer intensiver, die winterliche dagegen immer schwächer. Während also durch die erwähnten Änderungen sich die jahreszeitlichen Gegensätze auf der nördlichen Hemisphäre abmildern, verschärfen sie sich auf der südlichen. Ist die Länge des nördlichen Sommerhalbjahres im Abnehmen, so ist die Wirkung eine entgegengesetzte. Eine Zunahme der Exzentrizität der Erdbahn — welche Größe mit einer Periode von etwa 46 Jahrtausenden um ihren mittleren Wert oszilliert — macht die soeben geschilderte Wirkung nur noch ausgesprochener.

Aus dem vorstehenden folgt, daß alle drei veränderliche astronomische Elemente: die Schiefe der Ekliptik, die Länge des Perihels und die Exzentrizität der Erdbahn an der Verschärfung bzw. Abmilderung der jahreszeitlichen Gegensätze beteiligt sind und zwar, wie die Rechnung zeigt, an den höheren Breiten in fast demselben Maße. Nachdem jedoch die Oszillationen dieser drei Elemente verschiedene Perioden aufweisen, nachdem ferner die Wirkungen der Änderungen der Ekliptikschiefe auf beiden Hemisphären sich in demselben Sinne, die Wirkungen der übrigen zwei Elemente in entgegengesetztem geltend machen, so wird der säkulare Gang der Bestrahlung der erwähnten Breiten ein sehr unregelmäßiger und für die beiden Hemisphären weder ein gleich- noch ein entgegengesetztlaufender. Der regelmäßige oszillatorische Charakter, welcher den säkularen Änderungen der einzelnen astronomischen Elemente innewohnt, kommt in ihrer gemeinsamen Wirkung auf den Bestrahlungszustand der Erde nicht mehr zum Ausdruck. Dies ersieht man am deutlichsten an der Hand einiger numerischer Beispiele.

Nachdem auf diese Weise der säkulare Gang der Erdbestrahlung mathematisch erfaßt wurde, kann ein endgültiges Urteil über die sogenannten astronomischen Theorien der Eiszeiten gefällt werden. Alle diese Theorien gehen von der feststehenden Tatsache der säkularen Änderungen der Erdbestrahlung aus, nur knüpft fast jede von ihnen an die Änderungen eines oder höchstens zweier der erwähnten drei Elemente an. Die Theorie des Eiszeitalters

wird fast immer ganz außer Acht gelassen. So hat beispielsweise Croll den Einfluß der Schiefe der Ekliptik nicht genügend berücksichtigt, sonst wären ihm die Einwände, welche man gegen den astronomischen Teil seiner Theorie erhoben hat, erspart geblieben. Ach Ball hat die ausschlaggebende Wirkung der Änderungen der Ekliptikschiefe nicht richtig erkannt.

Erst in neuester Zeit hat man den Wirkungen dieses astronomischen Elementes mehr Beobachtung geschenkt. Hargreaves hat eine elegante Methode angegeben, wie diese Wirkungen berechnet werden können, doch hat er diese letzteren nur hinsichtlich der jährlichen Strahlungsmengen numerisch dargestellt. Die Verschärfung bzw. Abmilderung der jahreszeitlichen Gegensätze, welche mit der Variabilität der Ekliptikschiefe erzielt werden kann, hat er sondenbarerweise nicht berechnet. Ekholm widmete der Frage, wie sich die Änderungen der Ekliptikschiefe im klimatischen Bilde der Erde fühlbar machen, eine ausführliche Arbeit, doch beschränkte er sich dabei auf das Studium der Wirkung des letzten Maximums und des letzten Minimums der Ekliptikschiefe. Zu diesen zwei Zeiten werden aber die Wirkungen der Ekliptikschiefe durch den Einfluß der übrigen zwei astronomischen Elemente teilweise kompensiert. Spitaler untersuchte zwar den für die Vereisungen günstigsten Fall der Erdbestrahlung, welcher durch die Variabilität aller drei astronomischer Elemente erzielt werden kann, doch fußen seine Berechnungen leider auf den theoretischen Untersuchungen von Hopfner, welche fehlerhaft sind.

So ist bisher die Frage der säkularen Änderungen der Erdbestrahlung nur unvollkommen behandelt worden.

Und diese Änderungen sind größer als bisher angenommen wurde.

Dies wird am deutlichsten ersichtlich, wenn man die beiden extremen Bestrahlungszustände der Erde in Betracht zieht. Diese Bestrahlungen sind exakt mathematisch zu beschreiben und sind gegeben durch die extremen Werte, welche die astronomischen Elemente erreichen können. Der erste dieser Zustände ruft bei einer Ekliptikschiefe von  $24^{\circ}36'$ , einer Exzentrizität der Erdbahn von 0.0677 und einer Länge des Perihels von  $270^{\circ}$  die größten jahreszeitlichen Gegensätze auf der Nordhemisphäre hervor. In diesem Falle dauert das Sommerhalbjahr der Nordhemisphäre nur 166.88 Tage, das Winterhalbjahr dagegen 198.36 Tage. Um einen rationellen Vergleich dieser Bestrahlungszustände mit dem gegen-

wärtigen zu erhalten, können die Strahlungsmengen berechnet werden, welche in diesem Zustande während der Dauer des gegenwärtigen Sommerhalbjahres bzw. des Winterhalbjahres den einzelnen Breiten zugestrahlt werden. Dann können die so erhaltenen Unterschiede mit der gegenwärtigen Bestrahlung durch Breitenänderungen dargestellt werden. Auf diese Weise findet man, daß in diesem extremen Falle die Bestrahlung des Nordpols während der Dauer des gegenwärtigen Sommers so stark war, wie gegenwärtig die Bestrahlung des 68. Breitenkreises, die Bestrahlung des 70. Breitenkreises so intensiv, wie gegenwärtig die Bestrahlung des 60. Breitenkreises, mit einem Worte, man müßte gegenwärtig zehn bis einundzwanzig Grade gegen Süden wandern um dieselben sommerlichen Bestrahlungen zu finden, wie sie damals geherrscht haben. Die winterlichen Bestrahlungen waren damals geringer als die gegenwärtigen und entsprachen Breitenänderungen gegen Norden, von viereinhalb bis neun Graden.

Die Kombination der astronomischen Elemente von einer Ekliptikschiefe von  $21^{\circ}58'30''$ , einer Exzentrizität der Erdbahn von 0.0677 und einer Länge des Perihels von  $90^{\circ}$  ruft die geringsten jahreszeitlichen Gegensätze auf der Nordhemisphäre hervor. Dann dauert auf derselben der Sommer 198.36 Tage, der Winter 166.88 Tage. Berechnet man die Strahlungsmengen, welche in diesem Falle während der Dauer des gegenwärtigen Sommers den einzelnen Breitenkreisen zugestrahlt werden, so findet man, daß man gegenwärtig gegen Norden um zehn bis sechsundzwanzig Grade vorrücken müßte, um dieselben sommerlichen Bestrahlungen zu finden. Die winterlichen Bestrahlungen waren damals größer und entsprachen Breitenänderungen von drei bis sieben Graden gegen Süden.

Ähnliche Berechnungen stellte Culverwell an, doch hat er, wie die meisten Forscher des Eiszeitenproblems, die möglichen Änderungen der Ekliptikschiefe außer Acht gelassen, weshalb er viel geringere Unterschiede zwischen den beiden extremen Bestrahlungszuständen erhielt. Es ist deshalb nicht zu verwundern, daß seine Berechnungen geradezu als eine Waffe gegen die astronomischen Eiszeitentheorien benutzt wurden.

Doch sind die soeben angeführten Änderungen nicht die einzigen, welche der Bestrahlungszustand unserer Erde erleiden kann. Vor allem sind die von Stockwell angegebenen Grenzen, zwischen welchen die astronomischen Elemente variieren können, gewiß nicht abschließend zu betrachten. So hat G. H. Darwin gezeigt, daß

wenn man die Flutreibungen berücksichtigt, für weit zurückliegende Zeiten, welche aber noch in das geologische Zeitalter fallen, zu bedeutend kleineren Werten der Ekliptikschiefe gelangt, als es die untere von Stockwell angegebene Grenze ist. Weiters ist die Möglichkeit größerer Verlagerungen der Erdpole nicht von der Hand zu weisen, so daß man für ferne Zeiten auch mit nennenswerten Änderungen der geographischen Breiten rechnen muß. Schließlich ist die Intensität der Sonnenstrahlung nicht für ewige Zeiten als unveränderlich zu betrachten, so daß die Solarkonstante nur dem Namen nach eine Konstante ist.

Aber selbst bei unveränderlichem Bestrahlungszustand der Erde kann deren Temperaturzustand geändert werden. In den Gleichungen, welche im ersten Teile des Werkes abgeleitet wurden, und welche den Zusammenhang zwischen dem Bestrahlungs- und dem Temperaturzustand der Erde zum Ausdruck bringen, kommen außer den astronomischen Elementen und den Strahlungsgrößen noch solche Größen vor, welche die Eigenschaften der Atmosphäre sowie der Erdoberfläche mathematisch kennzeichnen, und diese sind: das Reflexionsvermögen der Erde samt ihrer Atmosphäre, der Transmissionskoeffizient der Atmosphäre für die Sonnenstrahlung und der Transmissionskoeffizient der Atmosphäre für die Erdausstrahlung. Keine von diesen Größen ist als konstant zu betrachten, weil Änderungen der Wolkenbedeckung des Himmels, des Wasserdampf- oder Kohlensäuregehaltes der Erdatmosphäre vom Einfluß auf die erwähnten Größen sind. Jede Änderung dieser Größen geht mit einer Änderung des Temperaturzustandes Hand im Hand. Aus diesem Grunde haben de Marchi und Arrhenius die großen klimatischen Schwankungen der Vorzeit durch Änderungen des Gehaltes der Atmosphäre an den erwähnten zwei Gasen zu erklären versucht. Die im Werke niedergelegte Theorie ermöglicht es, diese Fragen numerisch zu beantworten, und so zeigt es sich, daß ein vollständiges Verschwinden der atmosphärischen Kohlensäure ein Sinken der Lufttemperatur von etwa vier Grad verursachen würde. Mit den Änderungen der atmosphärischen Kohlensäure könnten demnach nicht jene Effekte erzielt werden, wie es Arrhenius annahm, wenigstens nicht im Sinne der Temperaturabnahme.

Aus allem Vorangeführten folgt, daß der Temperaturzustand der Erde auch säkular veränderlich ist und zwischen ziemlich weiten Grenzen schwanken muß. Wie sich durch diese Schwankungen

außerhalb des Rahmens dieses Werkes liegt. Besonders abseits liegt die Frage der Eiszeiten, weil diese weniger eine thermische Erscheinung waren, als eine Folge geänderter Niederschlagsverhältnisse. Einfacher ist es, an die engere Frage heranzutreten, u. zw., ob die klimatischen Verhältnisse gegenwärtig in einer solchen Änderung begriffen sind wie es die Theorie fordert. Auf diese Frage können uns folgende drei Erscheinungen Antwort geben: 1. die Verschiebung der geographischen Grenzen und der Höhengrenzen der Pflanzenwelt, 2. die Niveauschwankungen gewisser Seen, 3. die Vorstöße und Rückgänge der Gletscher. In der Tat, wenn sich die jahreszeitlichen Gegensätze verschärfen, d. h. wenn der Sommer wärmer wird, verschieben sich die Grenzen gewisser Pflanzen gegen Norden und in die Höhe. Wenn hingegen die jahreszeitlichen Gegensätze sich abmildern, d. h. wenn die Sommertemperatur sinkt und wenn die Änderung der geographischen Gegensätze eine Vermehrung der Niederschläge in unseren Zonen verursacht, dann steigen die Niveaus der Seen, und die Gletscher stoßen in die Täler vor. Die Beobachtungen der ersten oben angeführten Erscheinung geben eine sehr befriedigende Antwort auf die oben gestellte Frage. Aus den zwei anderen Erscheinungen konnte bisher keine endgültige Antwort auf die gestellte Frage gewonnen werden. Hier liegt die Schwierigkeit in dem Umstande, daß, was die astronomischen Ursachen anbelangt, die Gegenwart eine Periode des Gleichgewichtes der Seespiegelhöhen und der Gletscher sein sollte. So können die Effekte astronomischer Ursachen der Klimaschwankungen durch anderweitige Einflüsse leicht entstellt werden.

Es ist gewiß, daß während der geologischen Vorzeit außer den im vorliegenden Werke in Betracht gezogenen Einflüssen auch andere Kräfte auf das Klima der Erde eingewirkt haben, und dies macht das paläoklimale Problem sehr kompliziert. Der Verfasser wünschte das Werk ganz im Geiste der theoretischen Physik zu halten. Ohne dieser Einschränkung könnte mit Hilfe empirisch gewonnener Gesetze zwischen den geographischen Gegensätzen, der Menge der Niederschläge und der Höhe der Schneegrenze das paläoklimale Problem und namentlich das Eiszeitenproblem ausführlicher behandelt werden, doch würde dies die Überschreitung des festgelegten Rahmens des Werkes bedeuten, welches nur jenes physikalische Werkzeug liefern soll, ohne welchem von einer wissenschaftlichen Behandlung des paläoklimalen Problems keine Rede sein kann.

### Kapitel III.

#### Theoretische Untersuchungen über das Klima einiger Planeten und des Erdmondes.

62. Über die Bildung planetarischer Krusten. — 63. Das Klima des Planeten Merkur. — 64. Das Klima des Planeten Venus. — 65. Das Klima des Planeten Mars. — 66. Die Temperaturen der Mondoberfläche.

Die mathematischen Theorien des ersten Teils des Werkes lassen sich auch auf die der Erde benachbarten Mitglieder unseres Sonnensystems anwenden, ja einige derselben erfüllen in einem höheren Maße die Voraussetzungen der Theorie als der Erdball. Die Temperaturen der Oberflächen dieser Himmelskörper sind auch nur durch die Sonnenstrahlung bedingt, denn ihr Inneres hat schon lange aufgehört, einen Einfluß auf die Temperatur ihrer Oberfläche auszuüben. Dies wird am deutlichsten ersichtlich, wenn man die Bildung ihrer Krusten mathematisch verfolgt, und dies läßt sich ohne Zuhilfenahme irgend welcher Hypothese über den Zustand des Planetinneren tun. Haben sich bei fortwährender Abkühlung des ursprünglich glühenden Planeten auf der Oberfläche desselben die ersten Schollen gebildet, welche in der zähflüssigen Masse nicht versanken, sondern eine zusammenhängende Decke bildeten, so änderte sich der ganze Prozeß der Abkühlung des Planeten, und diese erfolgte nicht mehr am Wege der Ausstrahlung und Konvektion, sondern am Wege der Wärmeleitung durch die neugebildete Kruste hindurch. Dieser Vorgang kann aber mathematisch verfolgt werden. Es zeigt sich dann, wenn man diesen Vorgang auf unserer Erde ins Auge faßt, daß es nur eines Zeitraumes von zehn Jahrtausenden bedurfte, damit der aus dem Erdinnern hervorquellende Wärmestrom zu gering geworden sei, um einen nennenswerten Einfluß auf die Temperatur der Erdoberfläche auszuüben. Es wird dabei natürlich von den eruptiven Vorgängen auf der Erde, welche in diesem Anfangsstadium jedenfalls sehr lebhaft waren, abgesehen. Der weitere Abkühlungsprozeß und die Verdickung der Erdkruste erfolgt dann sehr langsam. So hat es wenigstens 122 Millionen

der Erdkruste freigewordene Wärme ihren Weg durch diese Kruste herausfind. Das tatsächliche Alter der Erdkruste ist aber jedenfalls größer als die obige Zahl, weil ihre Abkühlung durch dreierlei Einflüsse verzögert war. Erstens, durch den Wärmefluß, welcher, aus dem Inneren der Erde kommend, die Kruste durchsetzte; zweitens durch die Wärmemengen, welche infolge der Kontraktion des Erdkörpers und die damit verbundene Gravitationsarbeit frei wurden und, drittens, durch den Zerfall radioaktiver Substanzen, welche im Erdkörper enthalten sind, wodurch ganz gewaltige Wärmemengen frei werden sollen. In welchem Maße diese drei Ursachen den Abkühlungsprozeß der Erde verzögerten, läßt sich ohne Zuhilfenahme willkürlicher Hypothesen nicht angeben, weil man über den Zustand des Erdinnern nicht unterrichtet ist. So ist es besser sich mit der obigen Zahl zufriedenzustellen, welche als eine sichere untere Grenze des Alters der Erdkruste angesehen werden darf.

Die Temperaturverhältnisse auf der Oberfläche des Planeten Merkur könnten mathematisch mit großer Genauigkeit beschrieben werden, wenn man über die Rotationsverhältnisse dieses Planeten und über die Eigenschaften seiner Oberfläche genauer unterrichtet wäre, denn dieser Planet dürfte allem Anscheine nach keine nennenswerte Atmosphäre besitzen, welche von Einfluß auf den thermischen Zustand seiner Oberfläche wäre. Im vorliegenden Werke wurde den diesbezüglichen Untersuchungen die Voraussetzung zu Grunde gelegt, daß die Rotationsdauer des Planeten gleich seiner Umlaufzeit um die Sonne sei, eine Annahme, welche sehr viel Wahrscheinlichkeit besitzt.

Viel komplizierter liegen die Verhältnisse auf dem Planeten Venus, welcher von einer dichten Atmosphäre umgeben ist. Das außerordentliche Reflexionsvermögen dieses hell erglänzenden Planeten rührt von den Wolkenbildungen in seiner Atmosphäre her, welche so dicht sind, daß sie die feste Oberfläche des Planeten ganz verdecken und unseren Blicken entziehen. Dieser Umstand vereinfacht allerdings in einer gewissen Hinsicht die Anwendung der Theorie, weil man mit gutem Grunde die Wolkenbedeckungen der Venusatmosphäre gleich 100 Prozent setzen kann. Wird überdies angenommen, daß diese Wolkenbildungen aus Wasserdampf bestehen, und bezeichnet  $n$  jene uns allerdings unbekannt Zahl, welche angibt, wie viel Mal mehr Wasserdampf in der Vertikalsäule der Venusatmosphäre enthalten ist als in der Erdatmosphäre, so läßt sich die

durch diese Zahl ausdrücken. Auf diese Weise bekommt man die in der nachstehenden Tabelle eingetragenen Werte.

$n$	1	2	3	4	$\infty$
Temperatur	25°	54°	70°	80°	97°

Welche von den in der Tabelle eingetragenen Zahlen der Wirklichkeit am nächsten liegt, darüber können nur weitere auf spektroskopischen Beobachtungen fußende Untersuchungen über die Konstitution der Venusatmosphäre lehren. Es ist bemerkenswert, daß die Temperatur ihrer untersten Schicht jedenfalls kleiner ist als 100° C, weil man für  $n = \infty$  den Grenzwert von 96·8° C erhält.

Die hochinteressante Frage, ob auf dem Planeten ein organisches Leben möglich wäre, kann nach den bisherigen Erfahrungen nicht definitiv beantwortet werden. Selbst wenn die mittlere Temperatur der untersten Luftschicht für ein organisches Leben erträglich wäre, fragt es sich, ob die Gegensätze zwischen Tag und Nacht und zwischen Sommer und Winter nicht zu groß und dadurch die Tage und der Sommer für ein organisches Leben nicht zu warm seien. Diese Fragen hängen von der Rotationsdauer des Planeten und der Neigung seiner Rotationsachse ab. Eine kurze Rotationsdauer des Planeten verflacht den täglichen Temperaturgang, d. h. gleicht die Gegensätze zwischen Tag und Nacht aus. Dieser Ausgleich könnte sich in der feuchten, wolkigen Venusatmosphäre als sehr weitgehend erweisen, und die Nächte könnten dort nicht viel kühler als die Tage sein. Eine geringe Neigung der Rotationsachse gleicht die jahreszeitlichen Gegensätze aus und ein im Vergleich zum Winter heißer Sommer wäre in diesem Falle nicht zu befürchten. Eine geringe Neigung der Rotationsachse würde aber vornehmlich dadurch günstige Bedingungen für die Entwicklung des organischen Lebens schaffen, weil bei einer solchen Neigung, selbst im Falle einer hohen Mitteltemperatur der ganzen untersten Atmosphärenschicht, die Polargegenden sich eines kühlen Klimas erfreuen würden. Ein starker Ausgleich aller täglichen und jahreszeitlichen Gegensätze würde sich aber besonders in den Meeren der Venus vollziehen, und wenn solche Meere die Oberfläche dieses Planeten bedecken, so wird in ihnen zuerst das Leben erblühen, geradeso wie

Ein ganz besonders günstiges Objekt für die Anwendung der in diesem Werke mitgeteilten Theorie ist der Planet Mars. Seine Atmosphäre zeichnet sich durch besondere Klarheit und Durchsichtigkeit aus, und Wolkenbedeckungen, welche der Anwendung mathematischer Gesetze auf das Erdklima so hinderlich waren, kommen in der Marsatmosphäre äußerst selten vor. Die bereits fast gänzlich nivellierte Oberfläche dieses Planeten begünstigt nicht minder die Anwendung mathematischer Theorien, weil man auf derselben nennenswerte lokale Störungen zonaler Gesetzmäßigkeiten nicht zu befürchten hat. Auch die in den seichten Marsmeeren entstehenden Strömungen haben bei weitem nicht jene Wirkung auf das Klima, wie die Meeresströmungen der Erde. Wir haben weiters alle Ursache anzunehmen, daß die Masse der Marsatmosphäre bedeutend kleiner ist als die der Erde und daß die dynamischen Vorgänge in derselben belangloser sind als jene in der Erdatmosphäre. Dieser Planet erfüllt demnach in einem hohen Grade die Voraussetzungen der in diesem Werke niedergelegten Theorie.

Die Rotationsverhältnisse dieses Planeten sind uns auch genau bekannt und über sein Reflexionsvermögen sind wir auf Grund direkter Messungen wahrscheinlich besser unterrichtet als über jenes der Erde. Nachdem überdies der Transmissionskoeffizient der Marsatmosphäre für die eindringende Sonnenstrahlung jedenfalls nicht viel verschieden von eins ist, so hätten wir demnach alle numerischen Angaben, welche für die Anwendung der Theorie notwendig sind, wenn wir nur noch den numerischen Wert des Transmissionskoeffizienten der Marsatmosphäre für die dunkle Ausstrahlung seiner Oberfläche kennen würden.

Dieser Wert hängt von dem Gehalt der Planetatmosphäre an stark absorbierenden Gasen ab. Als solche hat man in der Erdatmosphäre den Wasserdampf und die Kohlensäure erkannt. Allem Anscheine nach kommt Wasserdampf auch in der Marsatmosphäre vor. Darauf deuten die hellweißen Polarkappen hin, deren Ausdehnung mit der Jahreszeit wechselt und welche vermutlich aus Schnee, vielleicht nur aus dickem Reif bestehen. Auch die dunklen Regionen der Marsoberfläche, welche man als Meere und Seen bezeichnet, und welche ihre Konturen bisweilen ändern, scheinen ebenfalls aus Wasser zu bestehen. Ein endgültige Entscheidung über das Vorkommen und über die Menge des Wasserdampfes in der Marsatmosphäre könnte nur auf spektroskopischem Wege ge-

wonnen werden, doch sind die bisherigen diesbezüglichen Bestimmungen nicht ohne Widerspruch geblieben und können nur als ein qualitativer Nachweis gelten; über die Quantität des Wasserdampfes ergaben sie keinen verlässlichen Aufschluß.

So hätte der Verfasser des Werkes keine Anhaltspunkte, um den numerischen Wert des erwähnten Transmissionskoeffizienten zu bestimmen, wenn ihm nicht eine einwandfrei beobachtete Erscheinung auf der Marsoberfläche über diese Schwierigkeit hinweggeholfen hätte. Man hat nämlich beobachtet, daß die nördliche Polarkappe nie, die südliche aber jeden Sommer entweder ganz verschwindet, oder zu einem kaum nennenswerten Rest zusammenschumpft. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, daß der Planet während des südlichen Sommers in der Sonnennähe sich befindet. Der Umstand, daß dieses Abschmelzen nicht alle Jahre stattfindet, deutet darauf hin, daß die unterste Luftschicht oberhalb des Südpols nur unbedeutend über dem Gefrierpunkt erwärmt wird. Daraus und aus den vorher aufgezählten bekannten numerischen Werten läßt sich auch der unbekannt numerische Wert des erwähnten Transmissionskoeffizienten berechnen. So gewinnt man alle Unterlagen, welche notwendig sind, um aus dem Bestrahlungszustand des Mars, welcher uns genau bekannt ist, den Temperaturzustand zu berechnen. Diese Berechnung ergibt folgende jährliche Temperaturen der Marsoberfläche.

Breite	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Temperatur	— 3°	— 4°	— 7°	— 12°	— 18°	— 27°	— 38°	— 46°	— 51°	— 52°

Diese Temperaturen ergeben eine mittlere Temperatur der ganzen Marsoberfläche von  $-17^{\circ}\text{C}$ .

Die soeben angegebenen Temperaturen der Marsoberfläche scheinen auf den ersten Blick mit der Tatsache in Widerspruch zu stehen, daß die Meere auf dem Mars nicht ständig zugefroren sind. Der Widerspruch wird aber sofort behoben, wenn man annimmt, daß diese Meere im Stadium starker Eintrocknung sich befinden und eigentlich seichte, salzige Tümpel darstellen. Eine konzentrierte Kochsalzlösung friert aber erst bei  $-22^{\circ}\text{C}$ .

Der tägliche Temperaturgang auf dem Mars unterscheidet sich wesentlich von demjenigen auf der Erde. Es läßt sich berechnen, daß bis zu einer Höhe über dem Horizont von  $26^{\circ}47'$  die direkte Sonnenstrahlung auf dem Mars, trotz seiner größeren Entfernung, intensiver ist als auf der Erde. Daraus folgt, daß die direkte Bestrahlung des Marsäquators während der zwei ersten und der zwei letzten Stunden des Tages stärker ist als jene des Erdäquators. Mit zunehmender geographischer Breite nehmen diese beiden Zeitintervalle zu, und die beiden Marspole, auf welchen die Sonnenhöhe den obigen Wert nie erreicht, sind immer einer mächtigeren Sonnenstrahlung ausgesetzt, als die Erdpole bei derselben Sonnenhöhe.

In den ersten Morgenstunden findet auf dem Mars eine rapide Erwärmung des Bodens statt, es entstehen starke Konvektionen in der Luft und ein rasches Verdampfen der Niederschläge, welche während der Nacht den Boden bedeckt haben. Die Dämpfe bilden oberhalb des Bodens eine relativ dünne wärmeschützende Hülle, und wegen derselben ist der stets wolkenlose Tag auf dem Mars ein verhältnismäßig heißer. Ist aber die Sonne untergegangen, so kühlt sich der Boden und die dünne Luft rasch ab, der Dampfgehalt der Atmosphäre wird bald ausgeschieden, und die wärmeschützende Wirkung der atmosphärischen Hülle hört gänzlich auf. Ungehindert strahlt der Planet seine Wärme in den Weltraum aus, und dem heißen Tag folgt eine bitter kalte Nacht.

Auch der jährliche Temperaturgang wird auf dem Mars ein sehr exzessiver sein und seine größte Exzessivität an den Polen erreichen. Dem sonnigen langen Tag, welcher am Nordpole 382, und am Südpole 305 Erdentage währt, folgt die lange, den restlichen Teil des Jahres erfüllende Nacht. Kein Dampf wird sich während dieser Nacht oberhalb der Polargegenden halten können und schutzlos werden diese der größten Kälte ausgesetzt sein.

Wenn die vorstehenden Angaben über das Marsklima nicht vollauf genügend sind, um die viel besprochene Frage der Bewohnbarkeit des Mars negativ zu beantworten, so zeigen sie jedenfalls, daß die Lebensbedingungen dort so verschieden sind von jenen auf der Erde, daß sie die Möglichkeit einer organischen Welt wie es die unsere ist, gänzlich ausschließen.

Das Schlußkapitel des Werkes bilden die theoretischen Untersuchungen über die Temperatur der Mondoberfläche, zu welchen der atmosphärenlose Mond, mit seiner überall festen Oberfläche, sich vorzüglich eignen würde, wenn wir über die Wärmeleitungs-

fähigkeiten seiner Kruste unterrichtet wären, denn von diesen hängt in hohem Maße der Temperaturgang auf der Mondoberfläche ab. In dem Werke ist berechnet worden, wie der tägliche Temperaturgang am Mondäquator auf einer aus granitischem Gestein gebauten Region verlaufen würde. Die Rechnung zeigt, daß in diesem Falle die Temperatur der Mondoberfläche bei Sonnenaufgang rund  $-54^{\circ}$  C, bei der Kulmination der Sonne im Zenit  $+97^{\circ}$  C, bei einer Zenitdistanz von  $15^{\circ}$  nach der Kulmination  $+100.5^{\circ}$  C und bei Sonnenuntergang  $+9^{\circ}$  betragen würde. Die tägliche Temperaturschwankung wäre demnach  $154.5^{\circ}$  C. Aus den allerdings sehr schwierigen und nicht einwandfreien direkten Messungen der Mondstrahlung scheint hervorzugehen, daß die tägliche Amplitude noch größer ist. Wenn dies wirklich der Fall sein sollte, so müßte daraus geschlossen werden, daß die Mondkruste aus anderem Material als hier angenommen gebildet wird, ja man müßte zu der Annahme neigen, daß wir im Monde eine Metallkugel vor uns haben.

Aus der erwähnten Berechnung folgt noch eine interessante Schlußfolgerung. Aus dem berechneten Temperaturgang folgt eine mittlere Temperatur des Mondäquators von  $+12^{\circ}$  C. Hätte der Mond eine große Rotationsgeschwindigkeit, so würde diese Temperatur fast  $+30^{\circ}$  C betragen. Die mittlere Temperatur der Mondoberfläche ist demnach infolge der Verlängerung der Rotationsdauer stark gesunken, während die tägliche Temperaturschwankung sich bedeutend vergrößerte.

Ein ähnliches Schicksal erwartet unsere Erde. Nach der Theorie von G. H. Darwin nimmt ihre Rotationsdauer wegen der Gezeitenreibungen zu, und wenn diese ihr Ziel erreicht haben werden, wird diese Dauer 55 Tage betragen. Aus diesem Grunde nehmen die Mitteltemperaturen auf der Erde ab, und die täglichen Schwankungen nehmen zu.

Ganz allmählich, unterstützt durch die langsame Abnahme der Ergiebigkeit der Sonnenstrahlung und die fortschreitende Verdünnung der Atmosphäre, verschlechtern sich die Lebensbedingungen auf der Erde, während sie auf dem Planet Venus durch dieselben Ursachen verbessert werden. Das Leben geht auf der Erde einem langsamen Untergang entgegen, um auf dem Planet Venus zu neuer Blüte zu erwachen.

