

Die

Wärmevertheilung auf der Erdoberfläche

und

ihre Ursachen.

Von

Prof. J. M. Pernter.

Vortrag, gehalten den 16. December 1891.

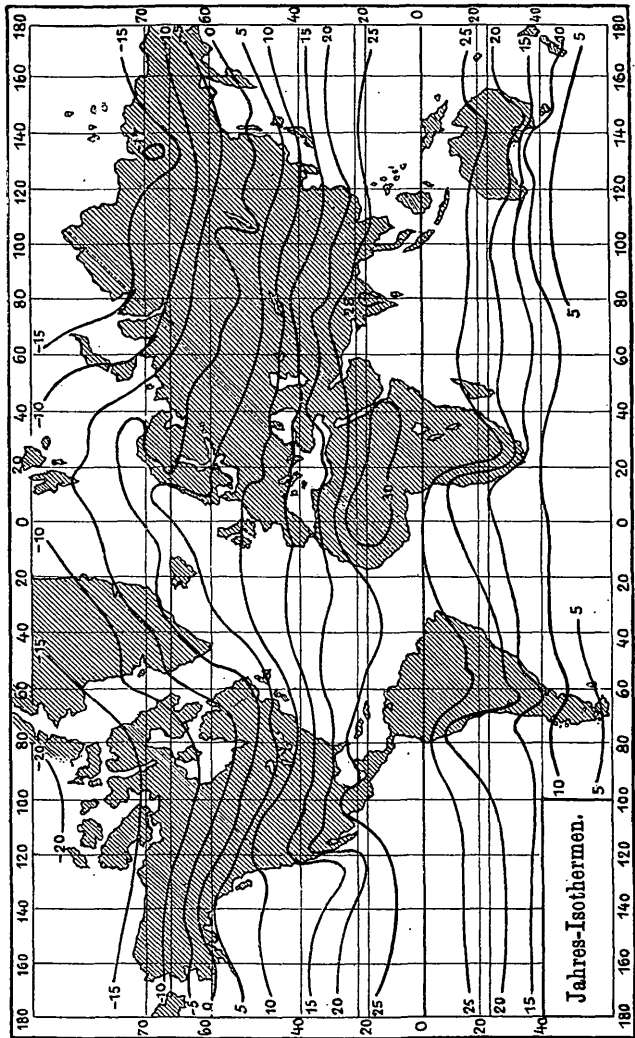
(Mit Demonstrationen.)

Mit drei Kärtchen.

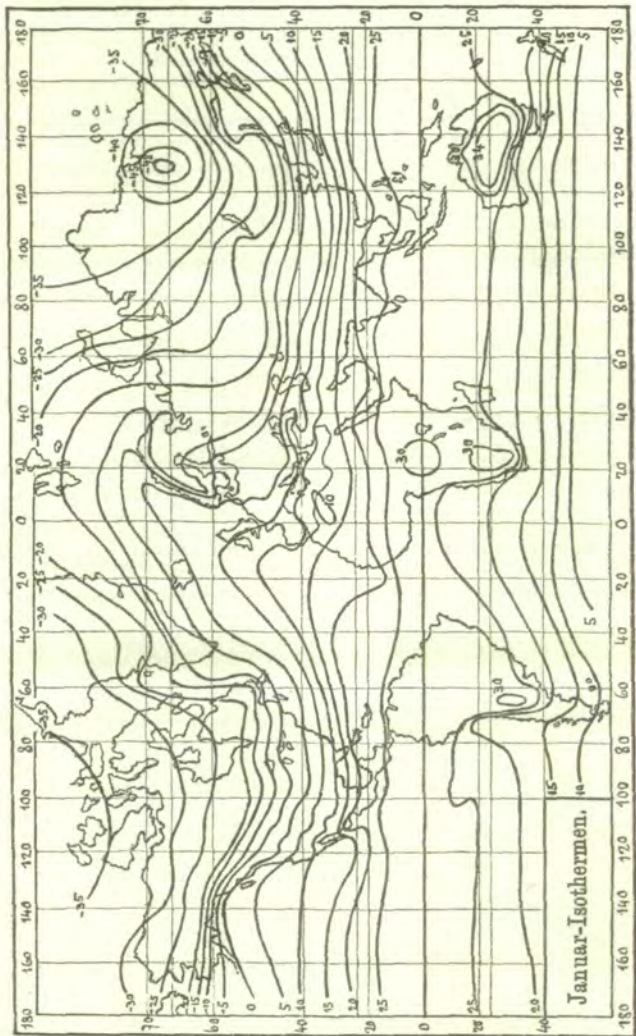
Dass es am Pole kälter und am Äquator wärmer ist als bei uns, ist Ihnen allen wohlbekannt; dergleichen ist die sibirische Kälte ebenso sprichwörtlich wie die afrikanische Hitze, und keinem von Ihnen wird es unbekannt sein, dass Europa gegenüber den asiatischen und amerikanischen Küstengebieten gleicher geographischer Breite in Bezug auf die Wärmevertheilung bevorzugt erscheint. Dass es aber auf den Bergen je höher desto kälter wird, das weiß jedermann aus eigener Erfahrung. Unter diesen Umständen werden Sie es verwunderlich finden, dass ich Sie über die Wärmevertheilung auf der Erdoberfläche, also über Ihnen wohlbekannte Dinge, unterhalten will. Nichtsdestoweniger wage ich Ihnen hierüber zu sprechen, und zwar aus zwei Gründen: Erstens — entschuldigen Sie meine Kühnheit — bin ich der Ansicht, dass es noch manche Einzelheiten in der Wärmevertheilung auf der Erdoberfläche gibt, die Ihnen nicht bekannt sind, und dürfte es gerade recht angezeigt sein, diese Vertheilung auf Grund der von Hann neu entworfenen Isothermenkarten näher anzusehen.

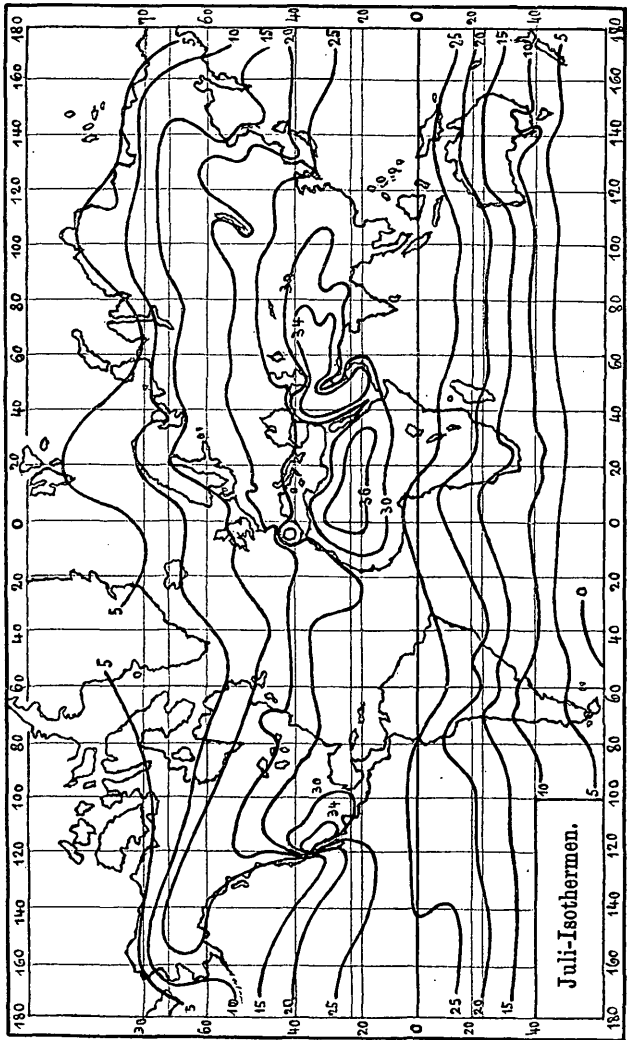
Zweitens lege ich das Hauptgewicht in diesem Vortrage auf die Ursachen dieser Wärmevertheilung, und da glaube ich in der Lage zu sein, Ihnen gar manche Gesichtspunkte zu eröffnen, die Ihnen bisher entgangen sein dürften.

Sie sehen hier drei Karten vor sich, welche Ihnen die thatsächliche Vertheilung der Temperatur auf der Erde darstellen, wie sie Hann nach dem vorliegenden Beobachtungsmateriale entworfen hat. Gleich der Anblick dieser Karten bringt uns eine Eigenthümlichkeit dieser Wärmevertheilung in Erinnerung, die von größtem Belange ist: die Temperaturvertheilung auf der Erde ist nicht nur von der geographischen Lage, sondern auch von den Jahreszeiten abhängig, sie ist nicht das Jahr hindurch stets dieselbe, sondern sie wechselt von Monat zu Monat, man könnte sagen von Tag zu Tag. Man müsste daher wenigstens für jeden Monat eine solche Karte entwerfen, wenn man die Wärmevertheilung auf der Erde genau und in allen Einzelheiten kennen lernen wollte. Sie sehen hier zwei Monate, den kältesten und den wärmsten, besonders dargestellt. Zwischen diesen zwei Extremen bewegen sich die übrigen Monate. Die bekannte Ursache dieser mit den Jahreszeiten wechselnden Wärmevertheilung ist die Neigung der Erdachse gegen die Bahn, in welcher die Erde die Sonne umkreist. Im Juli fallen die Sonnenstrahlen auf die nördliche Hemisphäre senkrechter auf als auf die südliche, im Jänner auf die südliche senkrechter als auf die nördliche. Im Juli scheint



Jahres-Isothermen.







die Sonne auf der nördlichen Hemisphäre länger, hat diese längere Tage als auf der südlichen, im Jänner tauschen die beiden Hemisphären die Rollen. Die Wirkung dieser Verhältnisse sehen Sie in den Isothermenkarten für Juli und Jänner vor sich.

Suchen wir weiter jene von der Zeit unabhängige räumliche Vertheilung der Wärme auf der Erde, welche den Jahresdurchschnitt darstellt, indem man die Monatsmittel der Temperatur benützt, um die mittlere Jahrestemperatur zu finden, so sehen wir die Resultate dieser Zusammenfassung in der Karte niedergelegt, welche man die Karte der Jahresisothermen nennt. Diese Karte stellt den Gesamteffect der das Jahr über veränderlichen Wärmevertheilung dar und gibt so ein von der Zeit, wenigstens für Jahrhunderte, unabhängiges Bild der Wärmevertheilung auf der Erdoberfläche. Auch dieses Bild trägt deutlich die Spuren der obersten Ursache jeder Wärme und Wärmevertheilung auf der Erde: der Sonne.

Der mittlere Ort der Sonne im Jahresdurchschnitt ist der Äquator, um welchen sie regelmäßig, mit circa $23\frac{1}{2}^{\circ}$ Ausschlag nach Nord und Süd, hin- und herpendelt. Wir sehen nun zwar die wärmsten Gegenden nicht am Äquator, sondern etwas nordwärts davon, wofür die Ursache noch zur Sprache kommen wird, es ist aber ganz deutlich zu sehen, dass die wärmste Zone der Erde in der That die zwischen 23° Nord und 23° Süd gelegene ist. Außerhalb, d. h. nördlich und südlich davon gegen die Pole zu, erkennt man deutlich ein

stetes Kälterwerden auf allen Meridianen, in dem Maße, als die Sonnenstrahlen für die höheren Breiten immer schiefer werden und daher an Kraft verlieren.

Noch viel deutlicher als durch die vorliegende Karte der Jahresisothermen, auf welcher manche Unregelmäßigkeiten erscheinen, deren Ursachen wir noch aufzusuchen haben werden, erkennt man den eben genannten Einfluss der Sonne, wenn man für jeden Parallelkreis die mittlere Temperatur bestimmt. Sie sehen auf der Karte, dass die Isothermen, obwohl sie ebenfalls im Durchschnitte alle von West nach Ost verlaufen und jede folgende Isotherme immer nördlicher liegt als die vorhergehende, sich also nirgends schneiden, dennoch in keinem Falle genau parallel mit den Breitenkreisen verlaufen. Ein und derselbe Breitenkreis schneidet dabei stets mehrere Isothermen, mit anderen Worten: auf keinem Breitenkreise herrscht überall die gleiche Temperatur, sondern die verschiedenen Orte eines Breitenkreises haben auch eine mehr weniger verschiedene Temperatur. Nimmt man nun das Mittel dieser verschiedenen Temperaturen eines jeden Breitenkreises, so erhält man die mittlere Temperatur der Breitenkreise. Diese wurden, aus den von Hann entworfenen Karten, von Spitaler für jeden fünften Breitengrad berechnet. Die Resultate dieser Rechnungen sehen Sie hier angeschrieben:

Äquator	Nordbreite	Südbreite
		25·9
5 ⁰	26·1	25·5
10	26·4	25·0
15	26·3	24·2
20	25·6	22·7
25	23·7	20·9
30	20·3	18·5
35	17·1	15·2
40	14·0	11·8
45	9·6	8·9
50	5·6	5·9
55	2·3	3·2
60	— 0·8	—
65	— 4·3	—
70	— 9·9	—

Nördlich von 70⁰ Nord und südlich von 55⁰ Süd liegen zu wenig Beobachtungen vor, als dass es möglich wäre, die Mitteltemperatur der Parallelkreise zu bestimmen; wir werden später ein anderes Mittel kennen lernen, dies zu thun.

Sehen wir von der schon erwähnten Anomalie ab, dass nämlich der wärmste Breitenkreis nicht gerade der Äquator ist, so bemerken wir im übrigen die Temperatur um so tiefer sich senken, je mehr man sich dem Pole nähert. Die Abhängigkeit vom Sonnenstande ist also eine vollkommene, und wir werden somit wiederum auf die Sonne als die Hauptursache der Wärme und Wärmevertheilung auf der Erdoberfläche hingewiesen.

Dies gibt uns nun zunächst Veranlassung, diesen Sonneneinfluss näher kennen zu lernen.

Unsere Erde bewegt sich um die Sonne auf einer Bahn, auf welcher die Sonnenstrahlen an jedem Punkte durchschnittlich eine solche Intensität besitzen, dass sie jedem Quadratcentimeter Fläche, auf den sie senkrecht auffallen, in jeder Minute vier¹⁾ Wärmeeinheiten spenden, d. h. eine Wärmemenge, welche einen Cubikcentimeter Wasser von 0⁰ auf 4⁰ erwärmen würde. Da nun die Erde stets eine Fläche gleich dem Flächeninhalte eines Kreises der Sonnenstrahlen darbietet, welcher den Umfang der Erde besitzt, so nimmt sie jeden Augenblick einen Bündel Sonnenstrahlen auf, der in jeder Minute eine Wärmemenge von mehr als 8000 Millionen (8.098,000.000) Wärmeeinheiten spenden kann. Damit ist das Wärmefeld, in welchem sich unsere Erde bewegt, klargelegt. Vielleicht erhalten Sie eine deutlichere Vorstellung hievon, wenn Sie erfahren, dass die Sonnenstrahlen imstande wären, einen Eisgürtel, welcher über die ganze Bahn, auf welcher sich die Erde um die Sonne bewegt, ausdehnen würde

¹⁾ Man nennt diese Zahl die Sonnenconstante, und alle folgenden Rechnungen sind mit derselben geführt. Man hat zwar in letzter Zeit nach Langley's Untersuchungen drei Wärmeeinheiten angenommen, und vielen schien auch dies schon zu viel. Manche Erwägungen ließen aber vermuthen, dass die drei Wärmeeinheiten noch bedeutend zu wenig seien, und die letzten Untersuchungen von Knut Ångström haben in der That das Resultat zutage gefördert, dass man wenigstens vier Wärmeeinheiten annehmen muss.

und eine Mächtigkeit von 144·8 *m* besäße, in einem Jahre wegzuschmelzen. Es dürfte auch zum weiteren Verständnisse dieses Wärmefeldes, in welchem sich die Erde bewegt, beitragen, wenn ich Ihnen mittheile, in welchen Verhältnissen sich diesbezüglich die übrigen Planeten befinden. Wir haben gehört, dass jeder Quadratcentimeter der Erdbahn in jeder Minute vier Wärmeeinheiten von der Sonne gespendet erhält. Da wir wissen, dass die Intensität der Strahlung im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrate der Entfernung von der Sonne steht, so ergeben sich uns folgende analoge Werte für alle übrigen Planeten:

	Mercur	Venus	Erde	Mars
Wärmeeinheiten per Minute .	26·7	7·64	4	1·72
„ „ Stunde .	—	—	—	—
	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptun
„ „ Minute .	0·148	0·0443	0·0108	0·0044
„ „ Stunde .	8·88	2·66	0·65	0·27

Wir müssen nach unserem Gefühle und unseren Begriffen von Wärme gestehen, dass sich unsere Erde im günstigsten Wärmefelde bewegt, denn die fast doppelte Kraft des Wärmefeldes der Venus würde uns entschieden zu unangenehm erscheinen, und das um mehr als die Hälfte kältere Wärmefeld des Mars wird gewiss noch weniger unsere Sehnsucht erregen, von den übrigen Planeten gar nicht zu reden.

Durch diese Darlegungen sind wir nun zwar zur Kenntnis der Wärmemenge gekommen, welche die Sonne unserer Erde spendet, wieviel davon aber die Erde in sich aufnimmt, ist damit noch nicht bestimmt;

es liegt das eben nicht in der Hand des Spenders, sondern zum großen Theile in der Natur und Fähigkeit des Empfängers, in unserem Falle der Erde. Wir haben gesehen, dass unsere Erde auf der Fläche eines ihrer größten Kreise jede Minute über 8000 Millionen Wärmeeinheiten von der Sonne gespendet erhält. Die Erde nimmt diese Wärmemenge aber nie auf einer solchen Fläche eines größten Kreises auf, sondern stets auf der Hälfte ihrer ganzen Oberfläche, die überdies in Halbkugelform gekrümmt ist. Diese Halbkugel ist an sich doppelt so groß als die Fläche eines größten Kreises und ist selbst wieder nur die Hälfte der Oberfläche der ganzen Erde. Da sich nun die Erde fortwährend um ihre Achse dreht, so ändert sich die den Sonnenstrahlen dargebotene Fläche immerwährend so, dass die Wirkung der Sonnenstrahlen das Jahr über sich über die ganze Erdoberfläche vertheilt. Da ferner die Sonne im Laufe des Jahres sich $23\frac{1}{2}^{\circ}$ nach Nord und Süd vom Aequator entfernt, so giebt es keinen größten Kreis der Erde, auf dessen Fläche die Sonnenstrahlen stets senkrecht auffallen. Das Alles hat zur Folge, als würden der Erde in jeder Minute nur 5140 Millionen Wärmeeinheiten gespendet. Würde sich diese Wärme das ganze Jahr hindurch gleichmäßig über die ganze Erde vertheilen, so würde jeder Quadratcentimeter der Erdoberfläche jährlich 337.600 Wärmeeinheiten von der Sonne empfangen. Stellen Sie sich vor, die ganze Erde wäre von einer Eisschichte bedeckt, so würde diese Wärmemenge immer noch hin-

reichen, um dieselbe in einem Jahre ganz abzuschmelzen, wenn diese Schichte auch eine Mächtigkeit von $46.5 m^1$) besäße — vorausgesetzt, dass jede Neubildung von Eis ausgeschlossen wäre.

Allein in Wirklichkeit ist die Vertheilung der von der Erde aufgenommenen Sonnenwärme durchaus keine gleichmäßige. Die Sonnenstrahlen kommen ja zu um so vollkommenerer Wirkung, je senkrechter, und sind um so schwächer, je schiefer sie auffallen. Da nun die Erde eine Kugel ist, so treffen die Sonnenstrahlen in jedem Augenblicke immer nur einen Punkt der Erdoberfläche senkrecht, alle übrigen Punkte erhalten um so schiefere Strahlen, je weiter sie auf der beschienenen Halbkugel von diesem bevorzugten Punkte abliegen. Wenn nun die Erde alle Lagen im Laufe eines Jahres einnehmen würde, so dass der Reihe nach jeder Punkt der Erdoberfläche senkrechte Strahlen erhielte, so würde eine gleichmäßige Vertheilung allerdings eintreten. Allein die Erde dreht sich im Weltenraume um eine feste Achse, welche — soweit unser Interesse in dieser Frage in Betracht kommt — ihre Lage unverändert beibehält. Die Folge davon ist, dass, bei der Neigung der Erdachse gegen ihre Bahn von etwa $23\frac{1}{2}^\circ$, nur jene Orte der Erdoberfläche, welche vom Äquator nicht mehr als $23\frac{1}{2}^\circ$ abstehen, den Vorzug genießen, dass die Sonnenstrahlen im Laufe des Jahres abwechselnd senkrecht

¹) Rechnen wir mit der Langley'schen Sonnenconstante, so findet man pro Jahr und Quadratcentimeter 251.100 Wärmeeinheiten und als Mächtigkeit der Eiskecke $34.6 m$.

auf sie auffallen, alle übrigen Orte müssen sich mit einer bald größeren bald geringeren Schiefe der Einstrahlung begnügen. Und wie die Neigung der Sonnenstrahlen, so ist die Dauer der Bestrahlung durch diese Eigenthümlichkeit der Lage der Erdachse verschieden zu verschiedenen Zeiten für die verschiedenen Orte der Erdoberfläche.

Zieht man alle diese Verhältnisse in Betracht, so lässt sich die Vertheilung der Sonnenwärme über der Erdoberfläche berechnen. Wir wollen diese Vertheilung zur Darstellung bringen, indem wir angeben, wie viel Wärme jeder Quadratcentimeter eines jeden Breitenkreises im Laufe eines Jahres von der Sonne erhält. Damit wir nicht zu große Zahlen anschreiben müssen, nehmen wir als Einheit diejenige Wärmemenge, welche ein Quadratcentimeter am Äquator am Tage der Tag- und Nachtgleiche als Tagessumme zugestrahlt bekommt. Diese Einheit beträgt 1849 Wärmeeinheiten.¹⁾ Um daher die folgenden Zahlen in Wärmeeinheiten zu verwandeln, sind sie mit 1849 zu multiplicieren.

Breite	0	10	20	30	40
Wärmemenge per Jahr auf Quadratcentimeter . . .	350.3	345.5	331.5	307.9	276.8
Breite	50	60	70	80	90
Wärmemenge per Jahr auf Quadratcentimeter . . .	239.8	199.2	166.2	150.2	145.4

¹⁾ Würde man die Langley'sche Sonnenconstante verwenden, so erhielte man als Wert für die obige Einheit 1387 Wärmeeinheiten.

Ein Vergleich dieser Zahlen mit den in der obigen Tabelle (S. 125) mitgetheilten Mitteltemperaturen der Breitenkreise zeigt deutlich die Abhängigkeit der Temperaturvertheilung auf der Erdoberfläche von der Vertheilung der von der Sonne erhaltenen Wärmemenge der einzelnen Breitenkreise.

Wir haben aber bisher nur die von der Sonne gespendete Wärmemenge und ihre Vertheilung über die kugelförmige, um eine gegen die Erdbahn geneigte Achse rotierende Erde kennen gelernt, ohne zu untersuchen, wie und von welchen Körpern dieselbe aufgenommen wird. Da tritt nun zuerst unsere Atmosphäre hindernd zwischen die Erdoberfläche und die von der Sonne kommenden Strahlen. Unsere Atmosphäre schwächt die durch dieselbe dringenden Sonnenstrahlen ganz gewaltig, selbst die senkrecht, also auf dem kürzesten Wege durch sie hindurchgehenden Strahlen verlieren 40 %¹⁾ ihrer Kraft, die schief, also auf längeren Wegen hindurchgehenden werden aber noch viel mehr geschwächt. Man kann diese Schwächung berechnen und es ergibt sich, dass die gesammte durch die Atmosphäre hindurch auf unsere Erdoberfläche gelangende Wärmemenge nur 436 Tausendstel, also nicht einmal

¹⁾ Schon nach den Untersuchungen von Langley war dieser große Betrag der Absorption wahrscheinlich geworden, nach den seitherigen Untersuchungen, besonders denen von Knut Ångström, ist es zweifellos, dass 40 % eher zu wenig sind. Ich werde daher stets diese Zahl für die Rechnung benützen.

die Hälfte derjenigen ist, welche ohne Dazwischenkunft der Atmosphäre der Erdoberfläche zukäme. Bei gleichmäßiger Vertheilung derselben über die ganze Erdoberfläche würde daher jeder Quadratcentimeter derselben nicht, wie wir oben berechneten, 337.600 Wärmeeinheiten per Jahr erhalten, sondern nur 147.200 Wärmeeinheiten.¹⁾ Berechnen wir mit dieser Zahl die Mächtigkeit der Eisschichte, mit welcher die Erdoberfläche bedeckt sein könnte, und die in einem Jahre von den Sonnenstrahlen weggeschmolzen würde, so ergibt sich jetzt eine Schichtendicke nicht von 46·8 m, wie im Falle wo keine Atmosphäre dazwischentritt, sondern nur von 20·3 m.²⁾ Allein wir wissen ja schon, dass es eine solche gleichmäßige Vertheilung der Sonnenstrahlung nicht gibt, und die Dazwischenkunft der Atmosphäre schwächt nicht nur überall die jedem Parallelkreise an sich zukommende Wärme, sondern verschärft noch die Ungleichheit der Vertheilung. Denn in den Gegenden, denen an sich schon mehr Sonnenwärme zukommt, schwächt sie die Strahlen weniger, weil sie da viel weniger schief durch die Atmosphäre gehen, während sie in den Breiten, die an sich schon benachtheiligt erscheinen, diesen Nachtheil noch vergrößert, weil dort die Strahlen viel schief durch die Atmosphäre dringen und daher auf

¹⁾ Bei Benützung der Langley'schen Sonnenconstante ergäben sich nur 109.460 Wärmeeinheiten.

²⁾ Mit der Langley'schen Sonnenconstante erhält man 15·1 m.

diesem langen Wege auch noch mehr geschwächt werden. Berechnet man daher die Vertheilung der Sonnenwärme über die Erdoberfläche nach dem Durchgange der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre, so ergeben sich per Quadratcentimeter jedes Breitenkreises und per Jahr folgende Werte, wo als Einheit wieder, wie oben, 1849 Wärmeeinheiten angenommen sind:

Breite	0	10	20	30	40
Wärmemenge per Jahr auf Quadratcentimeter . .	170·2	166·5	155·1	137·6	115·2
Breite	50	60	70	80	90
Wärmemenge per Jahr auf Quadratcentimeter . .	90·6	67·4	47·7	33·5	28·4

Diese Vertheilung entspricht auch schon viel besser dem Bilde, das wir uns gewöhnlich vom Wärmeabfalle vom Äquator bis zum Pole machen. Der Eismantel, der unsere Erdoberfläche bedecken dürfte, um in einem Jahre weggeschmolzen zu werden — natürlich immer vorausgesetzt, dass jede Neubildung von Eis ausgeschlossen wäre — müsste daher eine sehr verschiedene Dicke unter den verschiedenen Breitenkreisen haben; während er am Äquator eine Mächtigkeit von 43·3 *m* besitzen dürfte, würde er in unseren Breiten (unter dem 50. Breitengrade) nur 23·1 *m* und am Pole gar nur mehr 7·2 *m* dick sein dürfen.¹⁾ Allein es kommt noch schlechter. Nicht einmal diese durch

¹⁾ Rechnet man mit der Langley'schen Sonnenconstante, so erhält man folgende Zahlen: Äquator 32·5, 50. Breitenkreis 17·3, Pol 5·4 *m*.

die Schwächung in der Atmosphäre so reducierte Wärmemenge kommt ganz zur Verwertung. Vor allem nimmt die Erde nicht nur Wärme auf, sondern gibt fortwährend durch Ausstrahlung auch Wärme ab, sie verliert also immer wieder von der aufgenommenen Wärme einen Theil durch Ausstrahlung. Dann verwertet aber die Erdoberfläche auch nie die ganze ihr zugetheilte Wärme zu ihrer Erwärmung. Dies wäre nur der Fall, wenn die ganze Erde die Eigenschaft des Rußes besäße, alle auffallenden Strahlen vollkommen zu absorbieren. Dies thut sie aber nicht, sondern sie reflectiert ein gut Theil der ihr zugestrahlten Wärme, und dieser Theil geht für ihre eigene Erwärmung verloren. Ueberdies ist ja die Atmosphäre nicht stets durchsichtig, sondern gar oft von Wolkenmassen erfüllt, welche den Sonnenstrahlen den Weg zur Erdoberfläche verlegen. Die Bewölkung bildet eine weitere Ursache der Verminderung jener Wärme, welche die Erdoberfläche von der Sonne erhalten sollte. Sie werden hieraus schon erkennen, welche Schwierigkeiten sich demjenigen entgegenstellen, welcher die Temperaturvertheilung auf der Erdoberfläche aus der Vertheilung der Kraft der Sonnenstrahlung über dieselbe zu berechnen versucht.

Doch diese Schwierigkeiten mehren sich noch um ein bedeutendes. Das Resultat unserer bisherigen Darlegungen ist eine Vertheilung der Wärme über die Erdoberfläche, welche zwar vom Äquator zu den Polen einen regelmäßigen Wärmeabfall aufweist, aber für den

Breitenkreis eine ganz gleichmäßige ist, so dass jeder Quadratcentimeter eines und desselben Breitenkreises gleich viel Wärme erhält, und man sollte meinen, dass die Folge davon sein müsse, dass alle Orte desselben Breitenkreises dieselbe mittlere Temperatur besitzen müssten, mit anderen Worten, dass die Isothermen überall mit den Breitenkreisen zusammenfallen müssten. Ein Blick auf die Isothermenkarten sagt uns, dass dies durchaus nicht eintreffe. Was kann die Ursache dieses unregelmäßigen Verlaufes der Isothermen sein? Wir kommen hier zu den Ursachen der Unregelmäßigkeiten der Wärmevertheilung auf der Erdoberfläche. Die erste und wichtigste Ursache dieser Unregelmäßigkeit ist die Ungleichartigkeit der Erdoberfläche. Wasser und Land, bewachsene Gebiete und Steppen und Wüsten, Schnee- und Eisfelder wechseln nicht nur in der Richtung vom Äquator zu den Polen, sondern selbst auf einem und demselben Parallelkreise in bunter Reihenfolge ab. Alle diese verschiedenen Oberflächenbedeckungen haben nicht nur eine verschiedene Fähigkeit, die Wärmestrahlen aufzunehmen und zu reflectieren, sondern überdies erwärmen sie sich auch verschieden hoch bei einer gleichen Menge aufgenommener Wärme. So ist Ihnen allen wohlbekannt, dass 1 cm^3 Wasser durch Aufnahme einer Wärmeeinheit sich nur um 1° erwärmt, während 1 cm^3 Felsgrund von derselben Wärmeeinheit um 5° erwärmt wird. Dies sind die beiden Extreme in Bezug auf Erwärmungsfähigkeit, welche die Erdoberfläche darbietet. Im allgemeinen

erwärmt sich bei gleicher Wärmeaufnahme das Land mehr als doppelt so stark wie das Wasser. Dieser Unterschied wird aber noch gesteigert; denn erstens reflectiert die glatte Wasseroberfläche mehr Strahlen als die rauhe Landfläche und nimmt daher von der auffallenden Wärme weniger auf als das Land, zweitens wird auch nicht die ganze vom Wasser aufgenommene Wärme zur Erwärmung verwendet, sondern ein nicht unbedeutender Theil bei der Verdunstung verbraucht und so gebunden, dass er für die Erwärmung ganz verloren geht, wie man zu sagen pflegt, latent wird.

Eine weitere Ursache dieser Unregelmäßigkeiten in der Wärmevertheilung liegt in der Beweglichkeit der flüssigen Oberfläche. Das Wasser in den Meeren bleibt nicht ruhig an seinem Platze, sondern es entwickeln sich in denselben Strömungen, warme und kalte, und dadurch wird warmes Wasser in kalte Gegenden und kaltes Wasser in wärmere Gegenden überführt, was für die Vertheilung der Wärme auf der Erdoberfläche vielfache störende Verschiebungen zur Folge haben muss.

Endlich betheiligen sich an diesem Transporte anderswo erworbener Wärme in großem Maßstabe die Winde; sie führen kalte Luft in wärmere Gebiete und warme in kältere und bringen dadurch die mannigfaltigsten Verschiebungen zustande, welche sich als Unregelmäßigkeiten im Laufe der Isothermen bemerklich machen. Bei uns in Europa hilft alles zusammen, Meeresströmung und Winde vereinigen sich, um die

normale Wärmevertheilung im Sinne einer warmen Anomalie zu beeinflussen, während der Osten von Nordamerika und, mit Ausnahme des Sommers, auch der Nordosten von Asien im entgegengesetzten Sinne beeinflusst erscheinen, wie Sie das aus dem Verlaufe der Isothermen auf den vorliegenden Karten ersehen können. Dazu kommt nun aber auch, dass in den Jahreszeiten, wo die Einstrahlung der Sonne gering ist oder gar fehlt, das Land eine bedeutendere Ausstrahlung und als Folge eine größere Erkaltung erfährt als das Wasser. Diese Verhältnisse bringen es mit sich, dass im Winter nicht der Nordpol der kälteste Punkt der nördlichen Halbkugel ist, sondern sich zwei Kältepole bilden; der eine, und zwar der kältere, im Nordosten Sibiriens, der andere kaum halb so kalte im Nordwesten von Grönland. Selbst im Jahresmittel ist nicht der Pol der kälteste Ort, sondern ein seitwärts vom Pole im Nordwesten Grönlands befindliches Gebiet. Auf der Seite des atlantischen Meeres buchten sich auch im Jahresmittel die Isothermen hoch ins Eismeer hinauf aus. — Es ist auch eine Folge der ungleichen Vertheilung von Land und Wasser in den Tropen und der Verschiedenheit der Bodenoberfläche in den tropischen Ländern, dass das wärmste Gebiet der Erde nicht unter dem Äquator, sondern nördlich davon unter 10^0 Nordbreite liegt. Ebenso verdankt es die Südhemisphäre dem Überwiegen des Wassers, dass ihre höchsten Temperaturen im Sommer derselben niedriger bleiben als die höchsten Sommertemperaturen der Nordhemisphäre, und dass

hinwiederum auf der Südhemisphäre keine so niedrigen Wintertemperaturen zu verzeichnen sind wie auf der Nordhemisphäre.

Es dürfte Sie vielleicht interessieren, zu erfahren, welches die höchste und welches die niedrigste Temperatur war, welche bisher auf der Erde beobachtet wurde. Diese Frage beantworten Ihnen die Isothermenkarten nicht. Sie ersehen aus denselben nur, dass das höchste Monatsmittel der Juli in Afrika aufweist mit 36° C., als Monatsmittel freilich eine fürchterlich hohe Temperatur, und dass das niedrigste Monatsmittel der Jänner in Nordostsibirien aufweist mit -50° C. — eine noch viel entsetzlicher kalte Temperatur, als die 36° C. heiß erscheinen. Das sind aber, wie gesagt, nur mittlere Monatstemperaturen. Die absolut höchste und niedrigste Temperatur stellt dieselben natürlich in Schatten. Die höchste bisher bekannte Lufttemperatur im Schatten beobachtete Duveyrier in der Sahara zu 67.5° C., die niedrigste Temperatur wurde am 15. Jänner 1885 an der meteorologischen Beobachtungsstation in Werchojansk zu -68° C. beobachtet. Das gibt als absolute Wärmeschwankung einen Abstand von 135.5° C.

Es ist höchst interessant, zu untersuchen, wie sich der Einfluss der verschiedenen Vertheilung von Wasser und Land in den Mitteltemperaturen der Nord- und Südhemisphäre äußert. Die Nordhemisphäre übertrifft an Ländermassen etwa um das Vierfache die Südhemisphäre. Wenn man nun imstande ist, die mittlere Temperatur der ganzen Nordhemisphäre einerseits und

die der ganzen Südhemisphäre andererseits zu bestimmen, so muss der Einfluss dieser so verschiedenen Vertheilung von Land und Wasser deutlich zum Ausdruck kommen. Von der Bestimmung der mittleren Jahrestemperatur der beiden Hemisphären dürfte zwar nicht zu erwarten sein, dass dieselbe sonderlich verschieden ausfalle, da ja im Sommer die Ländermassen sich stärker erwärmen, dafür aber im Winter auch tiefer erkalten, während die Wassermassen zwar im Sommer sich weniger stark erwärmen, hingegen aber im Winter sich weniger abkühlen. In der That ergibt die Bestimmung der mittleren Jahrestemperatur für die Nordhemisphäre 15.4° C., für die Südhemisphäre 14.8° C. Der Unterschied ist so gering, dass man ihn mit Recht den mehrfachen Unsicherheiten der Rechnung zuschreiben darf und daher sagen kann: die mittlere Jahrestemperatur der beiden Hemisphären ist gleich, und zwar rund 15.0° C., woraus sofort folgt, dass die mittlere Jahrestemperatur der ganzen Erde gegenwärtig — und wohl noch auf lange Zeit — rund 15.0° C. ist. Sollte sich aber der kleine Unterschied zwischen der mittleren Jahrestemperatur der Nord- und Südhemisphäre, den wir oben angaben, als Wirklichkeit herausstellen,¹⁾ so können wir mit Bestimmtheit sagen, dass derselbe seine Ursache nicht in der ungleichen Ver-

¹⁾ Vielleicht findet derselbe darin seine Erklärung, dass gegenwärtig das Sommerhalbjahr auf der Südhemisphäre um 8 Tage kürzer ist als das Winterhalbjahr.

theilung von Wasser und Land, sondern in anderen Verhältnissen haben müsse.

Konnten wir nun zwar im Jahresmittel den Einfluss der verschiedenen Vertheilung von Wasser und Land nicht entdecken, so muss er um so entschiedener in den extremen Jahreszeiten und besonders in den extremsten Monaten Juli und Jänner hervortreten. Man findet in der That als mittlere Temperatur:

	Südhemisphäre	Nordhemisphäre
Jänner . .	17·54° C.	7·97° C.
Juli . . .	12·35	22·35

Man sieht hieraus, dass der wärmste Monat der Südhemisphäre (Jänner) um 4·81° C. kühler ist als der wärmste Monat der Nordhemisphäre (Juli) und hinwieder dass der kälteste Monat der Südhemisphäre (Juli) um 4·38° C. wärmer ist als der kälteste Monat der Nordhemisphäre (Jänner). Man erkennt in diesen Verhältnissen in der auffallendsten Weise den oben geschilderten Einfluss des Überwiegens des Landes auf der nördlichen Erdhälfte gegenüber der südlichen. Aber am ausgeprägtsten kommt derselbe zum Ausdrucke, wenn wir die mittlere Jänner- und Julitemperatur der ganzen Erde bilden. Wir finden als mittlere Temperatur der ganzen Erde im Jänner 12·8, im Juli 17·4° C., d. h. also die ganze Erde im Juli um 4·6° wärmer als im Jänner. Der Sommer der Nordhälfte ist somit gleichzeitig der Sommer der Erde als Ganzes und der Winter der Nordhälfte der Winter der Erde als Ganzes. Die ungleiche Vertheilung von Land und Wasser

bewirkt, dass auch die ganze Erde als Ganzes genommen ihren Sommer und ihren Winter hat.

Nachdem wir so den großen Einfluss kennen gelernt haben, welchen die Art der Oberflächenbeschaffenheit auf die Gestaltung der Wärmeverhältnisse unserer Erde ausübt, liegt es nahe, die neugierige Frage aufzuwerfen, wie die Temperaturvertheilung aussehen würde auf einer Erde sei es mit einer reinen Land-, sei es mit einer reinen Wasserbedeckung.¹⁾

Vor allem dürften unter so gleichartigen Verhältnissen die Isothermen ganz regelmäßig, d. h. parallel mit den Breitenkreisen verlaufen, denn die Luftströmungen hätten keine Veranlassung zu Unregelmäßigkeiten und es würde sich ein allgemeines Windsystem entwickeln, das für jeden Parallelkreis in seiner ganzen Ausdehnung gleichartig sein müsste. Die Wasserströmungen würden aber auf einer Erde mit voller Landbedeckung ganz fehlen, auf einer solchen mit voller Wasserbedeckung aber wäre wieder kein Grund für irgendwelche Unregelmäßigkeiten in den Strömungen.

¹⁾ Alle diese sowie die vorhergehenden Berechnungen müssen sich einer Formel bedienen, welche die Temperaturvertheilung auf der Erdoberfläche wiedergibt. Solche Formeln wurden von mehreren Forschern im engen Anschlusse an die Beobachtungen, wie man sagt, empirisch aufgestellt, so von Dove, Forbes und Spitaler. Da letzterer das reichlichste Beobachtungsmateriale zur Verfügung hatte, habe ich mich an seine Formel und die von ihm mittels derselben berechneten Werte gehalten. Spitalers Formel lautet:

$$T_{\varphi} = -2.43 + 17.61 \cos \varphi + 7.05 \cos 2 \varphi + 19.29 n \cos 2 \varphi.$$

10*

Wenn nun auch im Verlaufe der Isothermen kein Unterschied sich bei voller Land- oder voller Wasserbedeckung ergeben würde, so würde dafür die Erwärmung selbst eine ganz andere sein in jedem der beiden Fälle. Die mittleren Temperaturen der Breitenkreise würden sein:

	0	10	20	30	40
Bei voller Landbedeckung	41·5	39·7	34·3	26·0	15·7
„ „ Wasserbedeckung	22·2	21·5	19·5	16·3	12·3
Unterschied	19·3	18·2	14·8	9·7	3·4
Bei voller Landbedeckung	4·3	—6·8	—16·6	—23·6	—28·8° C.
„ „ Wasserbedeckung	7·7	2·8	—1·8	—5·5	—9·5° C.
Unterschied	—3·4	—9·6	—14·8	—18·1	—19·3° C.

Die mittlere Jahrestemperatur der ganzen Erde wäre bei voller Landbedeckung 20·2° C., bei voller Wasserbedeckung aber nur 13·8° C. Sie sehen, dass die thatsächliche Mitteltemperatur der ganzen Erde von 15·0° C. derjenigen einer ganz mit Wasser bedeckten Erde bedeutend näher liegt als der einer ganz mit Land bedeckten, was ja nur dem wirklichen Überwiegen der Wasserbedeckung — sie beträgt 73 % der ganzen Erdoberfläche — entspricht. Man sieht auch aus der obigen Tabelle, dass die volle Landbedeckung in Bezug auf die Temperaturvertheilung zu den gewaltigsten Unterschieden Veranlassung gibt, so dass zwischen Pol und Äquator selbst in den Jahresmitteln eine Differenz von 70·3° C. bestünde, während bei voller Wasserbedeckung dieser Unterschied nur auf 31·7° sich erheben würde, d. h. auf etwa die Hälfte der ersteren. Die Wasserbedeckung mildert also die Extreme.

Daher kommt es, dass bei voller Landbedeckung die mittleren Temperaturen der Parallelkreise nur bis zum 45. Breitenkreise wärmer sind als bei voller Wasserbedeckung, vom 45. Breitenkreise bis zum Pole aber die wärmeren Temperaturen der Wasserbedeckung anheimfallen. Würde unsere Erde aus zwei Hemisphären bestehen, deren Trennungslinie der Äquator wäre und deren eine nur mit Wasser, die andere nur mit Land bedeckt wäre, so würden beide eben behandelten Fälle sich auf derselben verwirklichen. Die mittlere Temperatur der ganzen Erde betrüge dann 16.5° C., wäre also höher als die jetzt wirklich vorhandene; sie wäre aber noch immer nicht die günstigste, die zu erzielen ist. Wie wir gesehen haben, ist bis 45° Breite die Landbedeckung, von da bis zum Pole die Wasserbedeckung wärmer. Die höchste Mitteltemperatur der Erde würde also erreicht, wenn vom Äquator beiderseits bis zum 45. Breitenkreise Land und von da bis zu den Polen Wasserbedeckung vorhanden wäre. Bei einer solchen Auftheilung der Erdoberfläche zwischen Wasser und Land würde die Mitteltemperatur der Erde den höchsten Wert erreichen, und zwar 22.8° C.

Beklagen Sie es nicht, dass uns diese Vertheilung von Wasser und Land nicht zutheil wurde, denn abgesehen davon, dass der Verkehr über diese compacte ungeheure Ländermasse von unerhörten Schwierigkeiten begleitet wäre, würden die Temperaturverhältnisse auf dem Lande selbst nichts weniger als angenehm sein. Schon die mittlere Jahrestemperatur der

ganzen Landzone wäre unerträglich, nämlich 31.7° C., zu geschweigen von den mittleren Temperaturen in der Nähe des Äquators; und was würden da für Temperaturmaxima auftreten! Wir müssen nach diesen Erörterungen vielmehr bekennen, dass wir mit den gegenwärtigen thatsächlichen Verhältnissen vollauf zufrieden sein können, da dieselben sowohl für die Lebens- wie für die Verkehrsbedingungen der Menschen äußerst günstig sind.

Alle Daten, welche wir bisher über die Temperaturvertheilung auf der Erdoberfläche mittheilten, sind entweder den Beobachtungen entnommen, oder mit Hilfe einer Formel erhalten worden, welche einen empirischen Ausdruck für die Beobachtungen darstellt. Das Ideal aber, das in dieser Beziehung der Meteorologe anstrebt, ist nicht die empirische Formel, sondern die Ableitung einer solchen aus den theoretischen Auffassungen, mit Hilfe welcher nicht nur die wirkliche Vertheilung der Temperatur auf der Erdoberfläche, sondern auch alle möglichen Veränderungen in derselben berechnet werden können. Die Ableitung einer solchen Formel ist aber so schwierig, dass es wohl nie gelingen wird, zu einer vollkommen befriedigenden je zu gelangen. Wenn Sie bedenken, dass dieselbe nicht nur die Vertheilung der von der Sonne gespendeten Wärme, sondern auch die in verschiedenen Breiten sehr verschiedene Schwächung derselben durch unsere Atmosphäre, die verschiedene Erwärmung der sehr capriciös vertheilten Land- und Wassermassen, den

Transport der von Luft und Wasser aufgenommenen Wärme durch Winde und Meeresströmungen und noch vieles andere, worauf ich nicht eingehen will, zum Ausdruck bringen muss, so werden Sie nur erstaunt sein zu erfahren, dass trotz all dieser Schwierigkeiten doch ein Versuch gemacht wurde, wenigstens die der jetzigen Vertheilung entsprechenden Mitteltemperaturen der Parallelkreise a priori zu berechnen.

Dieser Versuch, welchen Zenker 1888 veröffentlichte, ist als erster Versuch viel besser ausgefallen, als man vermuthen sollte. Ich will hier drei Zahlenreihen nebeneinander stellen. Die erste enthält die unmittelbar aus den Beobachtungen abgeleiteten Mitteltemperaturen der Breitenkreise, die zweite die mit Hilfe der empirischen Formel von Spitaler berechneten, die dritte die von Zenker unabhängig von den Beobachtungen auf theoretischer Grundlage berechneten Mitteltemperaturen der Breitenkreise:

	Beobachtung	Spitaler	Zenker
70 ⁰ N	—9·9 ⁰ C.	—9·8 ⁰ C.	—12·0 ⁰ C.
60	—0·8	—3·0	— 4·3
50	5·6	5·7	3·6
40	14·0	13·5	13·4
30	20·3	20·7	20·7
20	25·6	24·2	25·4
10	26·4	25·9	27·9
0	25·9	26·2	28·6
10 S	25·0	25·4	27·7
20	22·7	23·0	24·9

	Beobachtung	Spitaler	Zenker
30	18·5	18·3	19·9
40	11·8	12·4	13·9
50	5·9	7·6	7·8

Wenn Sie beachten, dass selbst die empirische Formel wiederholt Differenzen gegen die Beobachtung von mehr als 1 bis zu 2⁰ ergibt, so werden Sie gewiss finden, dass Zenkers Versuch staunenswerte Annäherungen erzielte und alle Anerkennung verdient; seine Arbeit wurde auch von der Akademie der Wissenschaften in Paris preisgekrönt.

Zum Schlusse könnten wir noch die Frage aufwerfen, ob diese eben geschilderten Temperaturverhältnisse der Erde in absehbarer Zeit einer Änderung unterliegen werden. Die Beantwortung dieser Frage ist mit mancherlei Schwierigkeiten verbunden, wie ja alle in die Zukunft strebenden Probleme; sie verdiente wohl zum Gegenstande eines eigenen Vortrages gemacht zu werden. Einige Bemerkungen will ich aber dennoch heute daran knüpfen. Was die von der Sonne erhaltene Wärmemenge betrifft, so ist zweifellos dafür gesorgt, dass noch für Jahrmillionen dieselbe gleich bleibe — kleine und kurze Schwankungen, welche mit der größeren oder geringeren Sonnenthätigkeit zusammenhängen, etwa abgerechnet. Was die Schwächung der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre betrifft, so wird dieselbe — die ganze Atmosphäre in Betracht gezogen — in absehbarer Zeit keine Änderung erleiden, da die Zusammensetzung der Atmosphäre und die durchschnitt-

liche Trübung derselben durch Wolken und Staub für die ganze Erde sich auf unabsehbare Zeiträume hinaus nicht ändern wird. Die Vertheilung von Wasser und Land wird bei dem vorgeschrittenen Stadium der Abkühlung der Erde kaum je mehr eine nennenswerte Verschiebung erleiden, und infolge dessen werden wohl auch die Meeresströmungen und Winde wesentlich die heutigen bleiben.

Es gibt aber allerdings Veränderungen, welche mit Bestimmtheit eintreten werden und die geeignet sind, wenigstens einigermaßen die Temperaturvertheilung auf der Erdoberfläche möglicherweise zu verschieben. Diese Veränderungen sind astronomischer Natur und beziehen sich auf die veränderliche Lage der großen Achse der Erdbahn im Raume und auf die Veränderlichkeit des Abstandes der Sonne von der Mitte dieser Achse — oder wie die Astronomen sagen auf die Verschiebung der Apsidenlinie und die Veränderlichkeit der Excentricität der Erdbahn. Doch auch von diesen Veränderungen ist durchaus nicht mit Bestimmtheit eine bedeutende Verschiebung in der Temperaturvertheilung auf der Erdoberfläche vorauszusagen, und dann gehen dieselben so langsam vor sich, dass erst nach vielen tausenden von Jahren jene Verhältnisse eintreten werden, welche geeignet scheinen könnten, auf die Temperaturvertheilung auf der Erde verändernd einzuwirken. So sehr es nun an sich interessant sein möchte, alle Eventualitäten der Zukunft eingehend und genau zu erwägen, so würden wir wohl

ziemlich sicher nur zu dem Resultate gelangen, dass wir doch nichts Sichereres darüber zu sagen in der Lage sind, und ich lasse daher diese Frage heute unerörtert, indem ich hoffe, dass Sie in Rücksicht auf die vielen tausend Jahre, die jedenfalls zwischen jetzt und einer eventuellen Veränderung liegen, ohne Beunruhigung die Nachtruhe genießen werden.
